



HAL
open science

Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Volume II: rapports thématiques (annexes)

Michel Allenbach, Rémi Andréoli, Virgil Cavarero, Nicolas Caze, Dominique Cluzel, Arnaud Couturier, Florian de Boissieu, Marc Despinoy, Pascal Sébastien Dumas, Frédéric Flouvat, et al.

► To cite this version:

Michel Allenbach, Rémi Andréoli, Virgil Cavarero, Nicolas Caze, Dominique Cluzel, et al.. Fonctionnement des petits bassins versants miniers. Volume II: rapports thématiques (annexes). [Rapport de recherche] Programme FPBVM. Tome Nickel et Environnement, CNRT Nickel et son environnement. 2016, 557 p. ird-02153082

HAL Id: ird-02153082

<https://ird.hal.science/ird-02153082>

Submitted on 12 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

CNRT "Nickel et son environnement"

Rapport scientifique

Edition 2016

BASSINS VERSANTS

Fonctionnement des petits
bassins versants miniers

Volume II - Rapports thématiques

Rapport Scientifique 2015

FONCTIONNEMENT DES PETITS BASSINS VERSANTS MINIERS

VOLUME II – RAPPORTS THEMATIQUES



*Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par
le CNRT « Nickel & son environnement »*

CNRT
NICKEL
& son environnement

Avril 2015



Le Volume II présente, sous forme d'annexes, la compilation des différentes contributions produites par les partenaires du Consortium scientifique pour répondre aux questionnements posés par la problématique du « Fonctionnement des petits bassins miniers ». Il complète la synthèse des résultats du programme (Volume I).

« FONCTIONNEMENT DES PETITS BASSINS VERSANTS MINIERS »

Volume II - Annexes

Avril 2015

Ouvrage collectif coordonné par Michel ALLENBACH (Université de Nouvelle-Calédonie - Pôle Pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement)

Pour le consortium UNC-IRSTEA-IRD- Univ.REUNION-A2EP-METEO-FRANCE.NC

Auteurs

Allenbach Michel (UNC), Andreoli Rémi (BLUECHAM SAS), Cavarero Virgil (Météo France NC), Caze Nicolas (A2EP), Cluzel Dominique (UNC), Couturier Arnaud (UNC), De Boissieu Florian (Océanide), Despinoy Marc (IRD), Dumas Pascal (UNC), Flouvat Frédéric (UNC), Gunkel-Grillon Peggy (UNC), Hoibian Thierry (UNC), Jeanpert Julie (SGNC), Join Jean-Lambert (Univ. Réunion), Kranitz Thierry (Météo France NC), Mangeas Morgan (IRD), Mathys Nicolle (IRSTEA), Metayer Cyril (UNC), Meyer Michael (UNC), Recking Alain (IRSTEA), Richard Didier (IRSTEA), Rouet Isabelle (UNC), Selmaoui-Folcher Nazha (UNC), Temau Tehei (Météo France NC), Touraivane (UNC), Wattelez Guillaume (UNC), Yu Olivia (Météo France NC).

S'ajoutent à ces auteurs les stagiaires du programme accueillis au sein des équipes contributrices, dont les noms suivent : Aksoy Muhammed, Allouin Pierre-Erick, Bazire Nicolas, Carpentier Laureen, Chillou Audrey, Derooy Pierre-Henri, Freydier Perinne, Guyonneau Antoine, Leverman Julia, Moesch Joan, Motto Alexandre, Mu Chengcheng, Navarrot Lucie dont les travaux constituent une importante documentation.

REVISION DU DOCUMENT

Réf.	CSF Fonctionnement des petits bassins versants miniers 15 Mai 2010			
Version	Date	Rédacteur(s)	Qualité du rédacteur(s)	Révision pour CNRT
VF	30/03/2015	Michel Allenbach (UNC - PPME)	Coordinateur du programme	F. Bailly CNRT

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : bassins versants, transport solide, hydrologie, modélisation, métaux, instrumentation, télédétection, hydrogéologie

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

M. Allenbach et coll. (2015) – *Volume II : ANNEXES – Rapports thématiques*. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel & son environnement ».

PREAMBULE

Le programme « **Fonctionnement des petits bassins versant miniers** » a fait l'objet d'une restitution publique le 2 Décembre 2014. Parallèlement à cette restitution, un rapport scientifique a été produit, composé d'une **synthèse** (Volume I) et de la compilation de **l'ensemble des contributions des différents partenaires du consortium** scientifique, sous forme de rapports thématiques (Volume II)/

Ce volume II comprend tous les documents thématiques du programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». Il s'agit des contributions suivantes :

● **Chapitre 1 : Contribution du PPME-EA 3325 de l'Université de Nouvelle-Calédonie et associés**

- 1.1 Géosciences – Cartographie des sensibilités à l'érosion - *Michel Allenbach (UNC)*
- 1.2 Cartographie du régolithe par télédétection hyperspectrale – *Florian de Boissieu (GIE Océanide)*
- 1.3 Modélisation de l'érosion – *Rémi Andréoli (Bluecham SAS)*
- 1.4 Caractérisation physico-chimique des matières en suspension – *Cyrille Metayer & Michaël Meyer (UNC)*
- 1.5 Evolution de la chimie des eaux - *Peggy Gunkel-Grillon et coll. (UNC)*
- 1.6 Modélisation de l'érosion des bassins versants à grande échelle – *Nazha Selmaoui-Folcher (UNC)*
- 1.7 Système d'information inter-opérable – *Touraivane et coll. (UNC)*

● **Chapitre 2 : Contribution de l'IRSTEA, Unité ETNA, Grenoble**

- Fonctionnement hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers - *Nicolle Mathys (IRSTEA)*

● **Chapitre 3 : Contribution de l'IRD, UMR 228 Espace-Dev**

- Potentialités de la télédétection à technologie passive sur les problématiques de morphologie dynamique fluviale en Nouvelle-Calédonie – *Marc Despinoy (IRD)*

● **Chapitre 4 : Contribution de l'Université de la Réunion**

- Influence du cadre hydrogéologique sur l'hydraulicité des petits bassins versants minier – *Jean-Lambert Join et coll. (Univ. Réunion)*

● Chapitre 5 : Contribution de Météo France

- Apport des lames d'eau radar calibrées dans la prévision des précipitations dans les petits bassins versants en Nouvelle-Calédonie – *Temaui Tehei (Météo France, direction interrégionale Nouvelle-Calédonie, Wallis et Futuna)*

Note : La contribution de A2EP-Roche est intégrée au Guide méthodologique des bonnes pratiques de l'hydrologie minière, qui accompagne le présent rapport scientifique final du projet.

- Acquisition et la bancarisation des mesures de terrain (hydrologie, qualité des eaux, transport solide) – Organisation des données pour un réseau de mesures ; Méthodes et procédures de suivi adaptées au contexte de la Nouvelle-Calédonie – *Nicolas Caze (A2EP-Roche)*

CHAPITRE 1 : CONTRIBUTION DU PPME-EA 3325 DE L'UNIVERSITE DE NOUVELLE-CALEDONIE

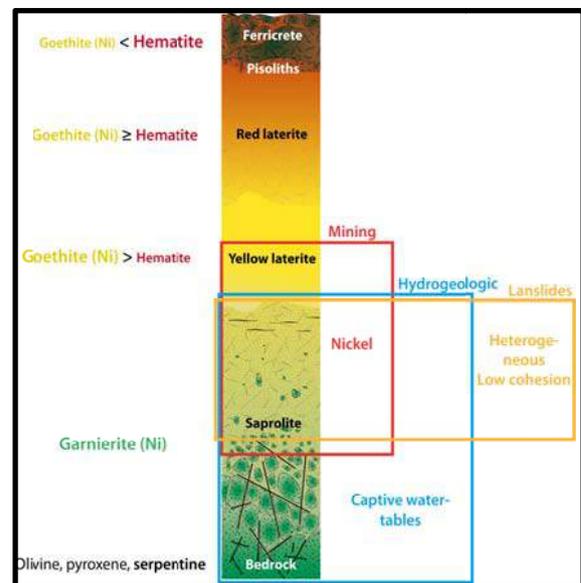
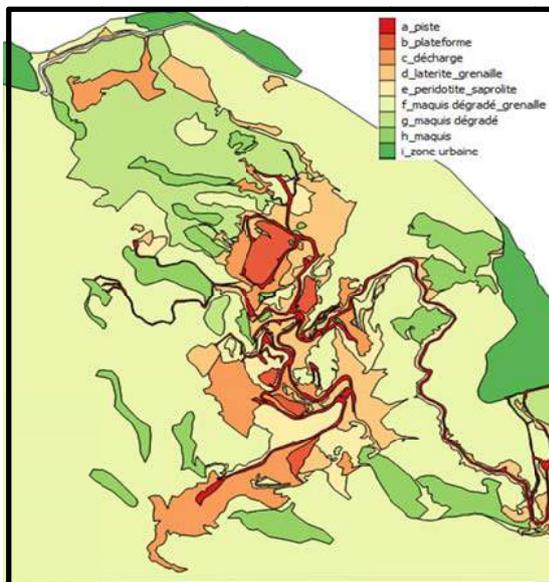
- 1.1. GEOSCIENCES – CARTOGRAPHIE DES SENSIBILITES A L'EROSION - *MICHEL ALLENBACH (UNC)***
- 1.2. CARTOGRAPHIE DU REGOLITHE PAR TELEDETECTION HYPERSPECTRALE – *FLORIAN DE BOISSIEU (GIE OCEANIDE)***
- 1.3. MODELISATION DE L'EROSION – *REMI ANDREOLI (BLUECHAM SAS)***
- 1.4. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION – *CYRILLE METAYER & MICHAËL MEYER (UNC)***
- 1.5. EVOLUTION DE LA CHIMIE DES EAUX - *PEGGY GUNKEL-GRILLON ET COLL. (UNC)***
- 1.6. MODELISATION DE L'EROSION DES BASSINS VERSANTS A GRANDE ECHELLE – *NAZHA SELMAOUI-FOLCHER (UNC)***
- 1.7. SYSTEME D'INFORMATION INTER-OPERABLE – *TOURAIVANE ET COLL. (UNC)***

1.1 Géosciences – Cartographie des sensibilités à l'érosion

Michel Allenbach (UNC)



Fonctionnement des petits bassins versants miniers
Programme CNRT 2010-2014
Rapport PPME-EA 3325 – Volet Géosciences



Auteur : Michel Allenbach

Avec la collaboration de Rémi Andréoli, Didier Lille, Florian de Boissieu, Dominique Cluzel, Pascal Dumas, Thierry Hoibian, Isabelle Rouet et des stagiaires du programme :
Pierre-Eric Alloin, Laureen Carpentier, Antoine Guyonneau
Lucie Navarrot, Perrine Freydier, Alexandre Motto

Fonctionnement des petits bassins versants miniers
Programme CNRT 2010-2014
Rapport PPME-EA 3325 – Volet Géosciences

SOMMAIRE

Préambule : Contexte et motivation, équipe engagée.	3
I. La cartographie détaillée des formations de surfaces.	3
II. Les parcelles d'érosion.....	5
II.1. Principe des parcelles expérimentales.	5
II.2. La recherche d'un matériel adapté.	7
II.3. L'implantation avortée sur le site de Poro.....	8
II.4. La recherche d'un site de substitution.	10
II.5. Conclusion partielle.....	12
III. Cartographie du régolithe par télédétection hyperspectrale sur la zone de Poro. (Rapport Océanide inséré dans le texte sous son format original).	13
IV. L'expertise géologique orientée modélisation de l'érosion.....	45
IV.1. La collaboration avec l'UMR Espace-DEV de l'IRD en matière de modélisation de l'érosion.	45
IV.2. La collaboration avec Bluecham SAS en matière de modélisation de l'érosion.....	45

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Cartographie des formations détaillées : « <i>Susceptibilité à l'émission de MES</i> ». ...	4
Figure 2 : Schéma expérimental d'une parcelle de type Wischmeier à la Martinique (<i>Khamsouk & Roose, 2003</i>).	7
Figure 3 : Cuves à monter « <i>en série</i> ».	8
Figure 4 : Répartiteur en éléments de chaudronnerie classique.	8
Figure 5 : Localisation des sites potentiels d'implantation des parcelles d'érosion à Poro. ...	9
Figure 6 : Vue aérienne zoomée (<i>rectangle jaune</i>) de la zone au située au nord de Prony (<i>ellipse rouge</i>).	10
Figure 7 : Vue 2012 du site des parcelles du CTFT/NC depuis l'amont du site.	11
Figure 8 : Parcelle d'essai resurfacée et clôturée grâce à l'assistance de la SLN.	11
Figure 9 : Schéma du dispositif envisagé.....	11

Fonctionnement des petits bassins versants miniers
Programme CNRT 2010-2014
Rapport PPME-EA 3325 – Volet Géosciences

Préambule : Contexte et motivation, équipe engagée.

Le portage et la coordination du programme du CNRT « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* » ont été assurés par le PPME au nom du consortium. L'un des objectifs du GIP « *CNRT et son environnement* » étant de permettre, par le biais des collaborations créés par les programmes financés, la montée en compétences des équipes locales sur des problématiques environnementales prioritaires pour la Nouvelle-Calédonie, le PPME-EA 3325 s'est inscrit dans cet esprit. Il s'est associé à des partenaires reconnus pour leurs compétences dans les thématiques de l'appel à projet afin d'apporter des éléments de réponse pertinents, complémentaires à son propre potentiel orienté vers la caractérisation physico-chimique des flux sédimentaires, la modélisation des processus du cycle sédimentaire (érosion, transport, sédimentation en amont et aval des petits bassins versants miniers) et la structuration et mise à disposition des bases de données collectées par le programme.

Le travail réalisé au titre du volet 1 (Géosciences) au sein du PPME-EA 3325 a été mené par les 4 personnes citées dans la convention, à savoir :

- le professeur Dominique Cluzel, porteur du programme et leader du volet géosciences ;
- le professeur Michel Allenbach qui a assuré la gestion du programme au fil du temps de sa réalisation ;
- Pascal Dumas, Maître de Conférences en géographie, membre du CNEP – EA 3324 (Centre des Nouvelles Etudes du Pacifique), spécialiste de télédétection ;
- Isabelle Rouet, ATER (attaché temporaire d'enseignement et de recherche) à la signature de la convention et gérante, aujourd'hui, du bureau d'études Rouetis R&D.

Il convient d'ajouter à ces 4 personnes :

- le travail du docteur Thierry Hoibian, technicien au PPME qui a été très souvent associé aux travaux de terrain et de laboratoire réalisés dans le cadre des programmes « *Hydromine* » et « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* », notamment au niveau de l'assistance et de l'encadrement des stagiaires ayant travaillé sur ces programmes ;

- l'intervention du docteur Florian de Boissieu, dans le cadre d'une prestation complémentaire au programme, financée sur moyens propres du PPME, confiée au GIE Océanide pour valoriser l'image hyperspectrale acquise sur la zone de Poro.

I. La cartographie détaillée des formations de surfaces.

Elle a été réalisée et finalisée courant 2014. Il ne s'agit pas d'une carte géologique, dont l'intérêt dans le cadre du projet aurait été limité, mais d'une carte thématique « *Susceptibilité à l'émission de MES* ». L'objectif a été de définir quelles étaient les surfaces qui en cas de précipitations importantes étaient susceptibles d'émettre des particules fines. Les

différentes classes ont été établies sur la base d'observations réalisées sur le terrain lors du passage d'une dépression en 2013. Sur cette base qualitative ont été établies neuf classes de surfaces de susceptibilité décroissante :

- a_pistes
- b_plateformes
- c_décharge
- d_latérite_grenaille
- e_péridotite_saprolite
- f_maquis dégradé_grenaille
- g_maquis dégradé
- h_maquis
- i_zone urbaine

La figure 1 présente la carte produite qui est également accessible sur le portail interopérable du programme via le lien suivant : <http://grimm.univ-nc.nc/geoportail/>

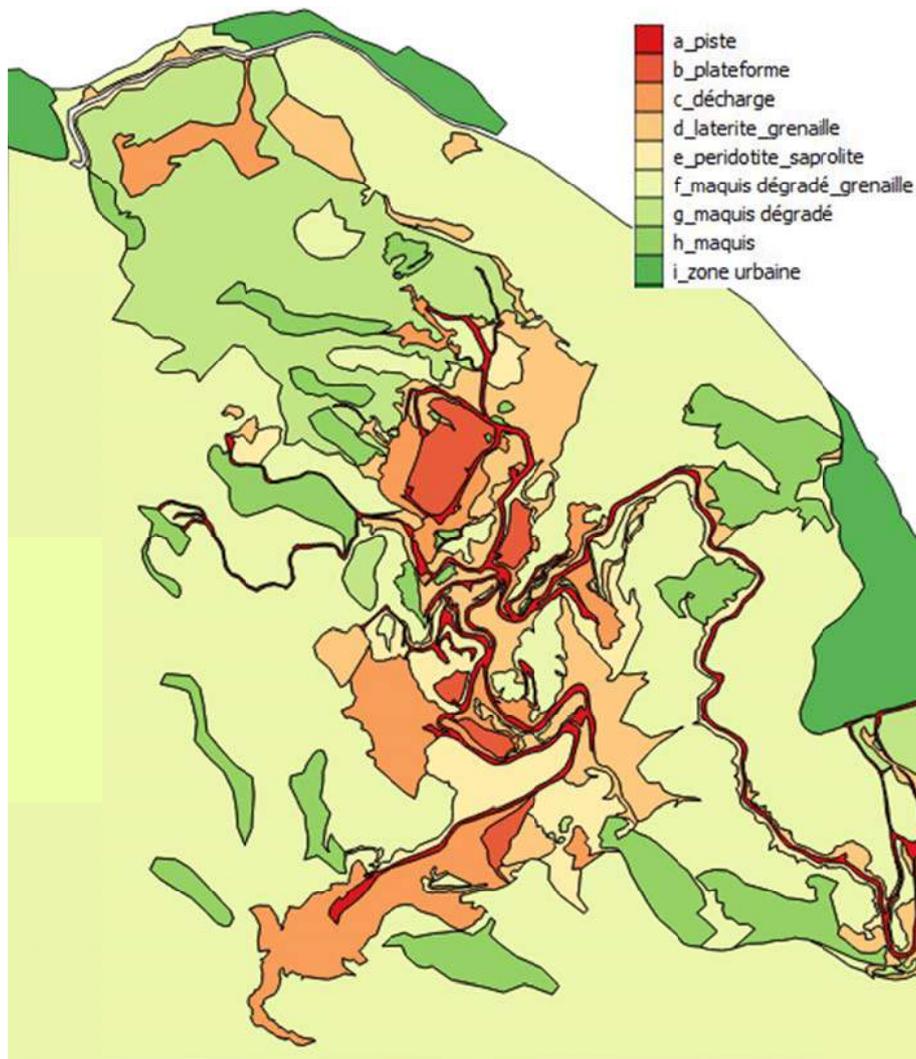


Figure 1 : Cartographie des formations détaillées : « Susceptibilité à l'émission de MES ».

Les pistes (a) sont la source principale de MES en raison du roulage et de leur pente qui favorise le ruissellement. Le pralinage semble être une solution efficace qui limite considérablement à la fois le broyage de la latérite et sa mise en mouvement.

Les plateformes (b) présentent les mêmes caractéristiques de surface et de roulage que les pistes ; cependant leur faible pente limite l'érosion des particules fines. On les trouve aussi bien dans les zones d'exploitation qu'à la partie supérieure des décharges ou sur les plateaux techniques.

Les décharges (c) sont caractérisées dans leur partie superficielle par un matériau de granulométrie très hétérogène (latérites + blocs de roche dure) et faute de revégétalisation suffisante, constituent des zones de départ de particules fines. La forte rugosité et la structure en gradins en ralentissant les écoulements limitent toutefois l'exportation de MES.

Les latérites (d) non remaniées ont une cohésion qui leur permet de résister à un ruissellement modéré, a fortiori lorsqu'elles ont conservé une couverture de grenaille.

Les péridotites (e) même profondément altérées (saprolites) ont une cohésion qui limite considérablement la formation de MES.

Le maquis dégradé (f, g), sujet à plusieurs épisodes d'incendie successifs sur la zone, conserve une maigre couverture végétale arbustive et une proportion importante de fougères. Il n'émet pratiquement pas de MES même si le sol est à nu dans la mesure où subsiste une couche de grenaille en surface.

Les surfaces couvertes de maquis intact (h) de même que les zones urbaines (i) n'émettent pas de MES (pour des raisons différentes)

Il est délicat d'évaluer quantitativement de visu la susceptibilité à la production de MES ; aussi, l'échelle proposée ci-dessous devrait pour être pleinement opérationnelle, être validée par des mesures appropriées (parcelles d'érosion).

1000 = a : pistes
100 = b : _plateformes
50 = c : _décharge
10 = d : _latérite_grenaille
5 = e : _péridotite_saprolite
5 = f : _maquis dégradé_grenaille
3 = g : _maquis dégradé
1 = h : _maquis
1 = i : _zone urbaine

II. Les parcelles d'érosion.

II.1. Principe des parcelles expérimentales.

Il existe deux types de parcelles expérimentales dans le domaine de l'étude de l'érosion hydrique au sens strict. : les parcelles *in situ* et les parcelles reconstituées en laboratoire. Étant

donné le contexte et le peu de données scientifiques disponibles sur le sujet en Nouvelle-Calédonie, les parcelles *in situ* constituent le choix le plus pertinent.

Le principe des parcelles d'érosion *in situ* consiste à isoler une surface de terrain des apports extérieurs d'eaux de ruissellement, de manière à ne considérer comme intrants du système que les pluies (mesurées sur site) tombant à l'intérieur du périmètre. En sortie, un dispositif de piégeage permet de mesurer la quantité de matière exportée par le ruissellement sur la parcelle (eaux et sédiments). Ce dispositif sert à évaluer le volume de sédiments exportés en fonction des pluies effectives, ainsi qu'à évaluer l'infiltration et le volume d'eaux ruisselées. Il donne accès à des bilans plus ou moins précis selon la fréquence et la précision des relevés.

Historiquement, les parcelles d'érosion *in situ* ont surtout été utilisées en milieu agricole. Depuis 1954 aux Etats-Unis, ce type de parcelles a permis à l'USDA (département de l'agriculture américain) de développer une méthode de prédiction des pertes érosives provoquées par les pluies (Wischmeier & Smith, 1978). L'équation universelle de pertes en sols (USLE), modèle d'érosion aujourd'hui très utilisé, est issue des travaux de l'équipe de Wischmeier et elle est toujours en développement ; les parcelles utilisées ont pris le nom de l'auteur. A l'heure actuelle, les parcelles Wischmeier et plus généralement l'évaluation des pertes dues à l'érosion hydrique, servent non seulement à la caractérisation de l'érosion et à la prédiction des pertes érosives, mais aussi par exemple à évaluer les pratiques culturales en milieu agricole et les dispositifs de lutte antiérosive ou encore de réhabilitation des sols dégradés.

En milieu intertropical, de nombreux travaux sur parcelles d'érosion ont été réalisés, notamment en Afrique, à Madagascar et dans l'Outre-Mer français par le CIRAD et l'ORSTOM/IRD (Roose & Sarrailh, 1990). Ces recherches se poursuivent toujours dans de nombreux pays (Roose, Duchaufour et De Noni, 2012).

Bibliographie citée

CTFT/NC, 1976 – *Programme de recherches sur la fixation et la reforestation des terrains miniers. Compte-rendu, 1 p.*

CFFT/NC, 1978 – *Essais terrains miniers Sud – Tournée du 20 janvier 1978. Centre technique forestier tropical, Centre de Nouvelle-Calédonie, 4 p.*

Khamsouk B. et Roose E., 2003 – *Ruissellement et érosion d'un sol volcanique tropical cultivé en systèmes intensifs en Martinique. Cahiers d'étude et de recherches francophones, Agricultures, vol. 11, n° 3, pp. 145-151.*

Roose E. et Sarrailh J.-M., 1990 – *Érodabilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. XXV, n°1-2, pp. 7-30.*

Roose E., Duchaufour H. et De Noni G., 2012 – *Lutte anti-érosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. IRD Editions, Marseille, 758 p. ISBN 978-2-7099-1728-5*

Wischmeier W. H. & Smith D. D., 1978 – *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. USDA, Agriculture handbook n° 537, 64 p.

La figure 2 présente le principe des parcelles d'érosion pour une installation agricole en Martinique, le dispositif est adapté à un régime des pluies de type cyclonique. En sortie de parcelle, les flux sont divisés pour limiter la collecte d'eaux et autoriser les mesures lors d'événements pluvieux extrêmes.

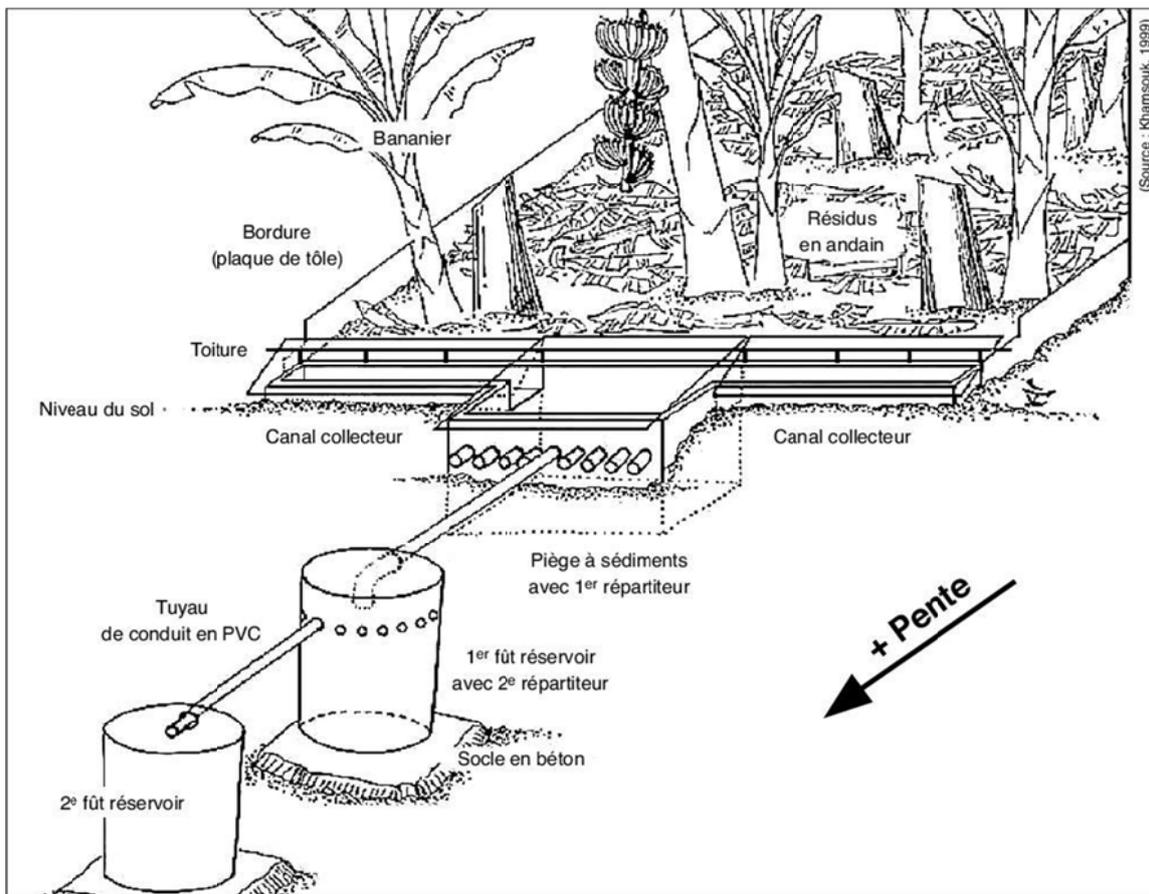


Figure 2 : Schéma expérimental d'une parcelle de type Wischmeier à la Martinique (Khamsouk & Roose, 2003).

L'installation de parcelles d'érosion *in situ* en Nouvelle-Calédonie a donné lieu, à notre connaissance, à une seule expérimentation sur parcelles de type Wischmeier. Établies à Prony il y a plus de quarante ans (1973-1974) par le Centre technique forestier tropical, ces parcelles ont été suivies pendant quelques années, mais l'étude n'a semble-t-il pas donné lieu à publication. Les documents d'archives indiquent la mise en place d'un essai de 4 parcelles, dont 2 nues et 2 revégétalisées (CTFT/NC, 1976). Le terrain d'étude est un talus en pente à 50 %, constitué de déblais miniers de latérites profondes. Les résultats sont reportés pour une année de suivi, avec un bilan érosif de 250t/ha pour un an et une pluviométrie totale de 2 266 mm (1974-1975; CTFT/NC, 1978).

II.2. La recherche d'un matériel adapté

Dans le cadre de ce projet, il a été tout d'abord recherché la définition d'un prototype permettant la réalisation des mesures associées au dispositif expérimental des parcelles de type Wischmeier et correspondant aux réalités des conditions économiques néo-calédoniennes. Il s'agissait d'avoir un dispositif facile à mettre en place, produit à un coût raisonnable, dans une optique de réplication en phase opérationnelle ultérieure.

Il a été choisi, dans le schéma conceptuel envisagé pour Poro de clôturer les parcelles (bord amont et bords latéraux) avec du lambris PVC (éléments de 4 m de longueur sur 20 cm de hauteur) enfoncé dans le sol dans une saignée et épinglé par des fers à béton. Le canal de récupération aval du ruissèlement, à enterrer en partie dans le sol, a été prévu en tuyau PVC de 20 cm de diamètre minimum dans une version minimale du dispositif (avec possibilité d'installer un collecteur en béton si les moyens matériels le permettent sur certains sites miniers). En sortie du canal de récupération basal, un « T » en PVC suivi d'une longueur de tuyau adaptée aux caractéristiques géométriques du site permet de canaliser le flux vers la première cuve en plastique d'un volume de 1m³ (produit de récupération d'un fabricant de peinture de la place) graduée. Il était prévu à Poro de faire reposer la cuve sur un cadre de soutien métallique posé sur un sol (scories de nickel par exemple) réglé à l'horizontale. Le robinet basal de la cuve permet de vidanger la cuve et de récupérer le liquide (mesuré à l'aide d'un débitmètre) en sortie de robinet et les MES contenues. Le nettoyage de la cuve, lorsqu'il sera nécessaire se fera par un système karcher à partir d'une réserve d'eau et d'un petit groupe électrogène portatif. La figure 3 montre le type de cuve choisie. Pour les précipitations importantes qui pourraient générer des ruissellements susceptibles de remplir la première cuve avant l'intervention de l'équipe de mesure, il a été décidé de mettre en place une deuxième cuve du même modèle montée en série avec la première et reliée à celle-ci par un piézomètre extérieur suivi d'un système de partition (1/10 ou 1/5) destiné à écrêter le ruissèlement et fabriqué à partir d'éléments de chaudronnerie classique du commerce visualisables sur la photographie à la figure 4. Tous ces éléments se démontent facilement, sont interchangeables et l'ensemble est d'un coût modeste en regard des dispositifs fabriqués par les artisans de la place.



Figure 3 : Cuves à monter « en série ».



Figure 4 : Répartiteur en éléments de chaudronnerie classique.

II.3. L'implantation avortée sur le site de Poro

L'implantation des parcelles était initialement prévue sur le site minier de Poro.

Sur la base de la connaissance du terrain et de photographies personnelles prises lors des premiers déplacements des scientifiques du consortium sur site en compagnie des collègues de l'IRSTEA, en juillet 2010 et mars 2011, quelques zones potentiellement intéressantes ont été envisagées et examinées sur photos aériennes. La mission de reconnaissance initiale spécifique à l'implantation des parcelles, réunissant Pascal Dumas, Isabelle Rouet et Michel Allenbach s'est déplacée à Poro le jeudi 21 juillet 2011 pour affiner le pré-positionnement des stations. Le but était de trouver en un même lieu un terrain nu et sous végétation (avec différents taux de couverture), avec une pente relativement homogène pour pouvoir comparer les parcelles entre elles.

Cette reconnaissance a conclu sur le fait que les petits versants bassins étudiés sur Poro se prêtaient assez mal à l'implantation des parcelles (surfaces types réduites en superficie), mais que néanmoins, quelques zones favorables étaient susceptibles d'être équipées sous réserve qu'elles ne soient pas affectées à court terme par les activités du centre. Le plan de localisation des zones reconnues comme potentiellement équipables (sept) est présenté à la figure 5.



Figure 5 : Localisation des sites potentiels d'implantation des parcelles d'érosion à Poro.

Il a été proposé au CFTMC de commencer par installer une ou deux parcelles sur une zone de terrain nu pour tester le dispositif et identifier les éventuelles modifications à y apporter. L'objectif était de garantir à la fois la faisabilité technique et qu'aucune intervention ne soit programmée dans les années suivantes sur la zone choisie. Après une année passée à essayer d'organiser concrètement cette mise en place nécessitant les indispensables accords et assistances du CFTMC, l'idée de réaliser ce travail sur le site de Poro a été abandonnée. En effet, il s'est avéré impossible, d'une part, d'obtenir l'information sur l'impact, à plus ou moins court terme, par l'exploitation des zones pressenties pour l'implantation de ces parcelles de test et d'autre part, d'obtenir la mise à disposition pour quelques heures d'un petit engin de chantier (petite pelle retro) pour faciliter la pose de clotures des parcelles et des équipements scientifiques

La restructuration opérationnelle du centre et la priorité donnée par le directeur du centre à un recentrage sur le corps de métier du CFTMC ont été les arguments opposés à notre demande. Cette prise de position a également été celle des gestionnaires du centre sur une autre facette du programme, celle des mesures hydrologiques pour lesquelles le centre n'a pas pu dégager du temps personnel pour assurer la maintenance des échantillonneurs ISCO hors période cyclonique. Le fait de ne pas avoir pu faire les mesures sur Poro est indiscutablement un échec pour le programme, car c'est sur ce site qu'un maximum d'informations croisées sur les paramètres majeurs du fonctionnement des petits bassins versants miniers a pu être collecté.

II.4. La recherche d'un site de substitution.

Face aux difficultés rencontrées sur Poro, le sujet a été évoqué en comité de pilotage et il a été recherché d'autres solutions pour l'implantation. Ces solutions ont buté sur le problème des distances à parcourir pour une équipe basée à Nouméa pour aller faire les mesures souhaitables et sur le manque de disponibilités des partenaires miniers pour aider à l'implantation des parcelles sur leurs mines et pour assurer une veille minimale sur les mesures en période de pluie. La SLN, en la personne de son représentant au comité de pilotage, Frédéric Bart, intéressé par la démarche a proposé que les parcelles puissent être implantées sur son domaine du sud calédonien, à proximité du test-minier de Prony. Après visite, il s'est avéré que ce site ne correspondait pas aux attentes du fait que les sols n'étaient pas assez typiques des sols miniers calédoniens. Finalement, le choix s'est porté, pour un premier essai de mise en situation du dispositif envisagé, sur les anciennes parcelles du CTFT, restées à l'abandon et visitées à plusieurs reprises au cours de l'étude. La figure 6 permet de localiser ce site au nord de Prony (ellipse rouge) qui se trouve aujourd'hui sur le domaine minier de la SLN qui a donné son accord à son utilisation et proposé son soutien pour l'installation du dispositif.



Figure 6 : Vue aérienne zoomée (rectangle jaune) de la zone au située au nord de Prony (ellipse rouge).

Près de 40 ans après leur mise en place, les installations ont été sensiblement dégradées au fil du temps. L'infrastructure de mesure sous les collecteurs en béton a été démolie. La photographie présentée à la figure 7 permet de visualiser les parcelles du CTFT/NC en l'état (vue 2012).



Figure 7 : Vue 2012 du site des parcelles du CTFT/NC depuis l'amont du site. A droite, les parcelles sur sols nus et à gauche celles sous couvert végétal.

Les deux parcelles sous couvert végétal (à gauche sur la photographie) montrent une parfaite tenue des terrains et la présence d'une couverture arbustive et arborée dense. A l'inverse, les deux parcelles nues (à droite sur la photographie) ont été très dégradées par le ruissellement et de nombreux ravinements sont présents. A la fin de l'année 2013, une demi-journée de travail à la pelle pour aménager le site a été permise grâce à la SLN qui effectuait des travaux sur des chantiers situés à proximité. Le travail à la pelle a consisté, d'une part, à resurfacier une partie de la parcelle pour s'affranchir du ravinement qui avait dégradé le haut du site depuis l'implantation initiale, et d'autre part, à refaire ses bordures avec des bandes de roulement d'usine (Figure 8). Il a été supervisé par Jérôme Budna, technicien géologue du Projet Grand Sud de la SLN. Le but recherché était l'installation du matériel décrit au paragraphe II.2., selon le schéma présenté à la figure 9.



Figure 8 : Parcelle d'essai resurfacée et clôturée grâce à l'assistance de la SLN.

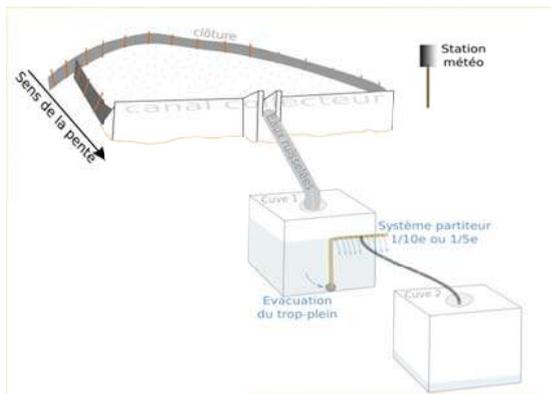


Figure 9 : Schéma du dispositif envisagé.

A la fin du premier trimestre 2014, la stabilisation des travaux de clôture a été constatée, de même que celle de la surface de la parcelle. Les petits travaux de réhabilitation du dispositif de collecte ont été programmés, puis déprogrammés suite aux événements récents connus dans le sud avec des menaces fortes proférées lors d'une visite de site par des passants à notre rencontre et contre toute installation de matériel scientifique « *pour les mineurs destructeurs de l'environnement* ». Après avoir pris conseil auprès des techniciens de la SLN travaillant dans le secteur, eux-mêmes confrontés à des problèmes identiques ayant entraîné la déprogrammation de campagnes de terrain sur la zone, il a été décidé de reporter l'installation du matériel scientifique sur ce site pour des raisons de sécurité.

II.5. Conclusion partielle.

Il a été initialement proposé dans le programme de mettre en place des parcelles d'érosion sur le site de Poro, dans le but d'acquérir de la connaissance sur zones contributrices en termes d'exportation de matière par les eaux de ruissellement. Dans le cadre de ce projet, un dispositif expérimental basé sur le principe des parcelles de type Wischmeier a été adapté et développé pour correspondre aux réalités des conditions de terrain calédonniennes. Cette phase du travail a été menée à bien et ce rapport décrit un dispositif opérationnel de mesure opérationnel pouvant être déployé à moindre coût, mais la mise en place de ce dispositif en conditions réelles sur le site de Poro s'est révélée impossible, de même que sur le second site envisagé à Prony.

Il s'agit là d'un échec certain pour le programme dans la mesure où les mesures n'ont pas pu être réalisées comme cela avait été proposé. Les raisons de cet échec sont diverses ainsi que cela a été explicité dans les alinéas précédents.

Pour autant, le travail réalisé sur le sujet et décrit ci-avant permet d'espérer pouvoir faire ces mesures dès lors que des conditions favorables (petite assistance par engins de chantier et sécurité des instruments seront assurées). Le matériel de mesure est disponible. Au terme des quatre années du programme, le potentiel des parcelles demeure entier sur Poro, mais il demande un partenariat plus affirmé avec le CFTMC. Outre l'important BBD possédée sur les bassins emboîtés de Poro, le site offre, en effet, l'avantage d'être parfaitement sécurisé pour les équipements scientifiques à mettre en place et d'être régulièrement visité par les agents de la DAVAR qui s'occupent de la maintenance des capteurs implantés sur la zone dans le cadre de leurs tournées habituelles.

III. Cartographie du régolithe par télédétection hyperspectrale sur la zone de Poro

Les difficultés rencontrées au niveau des parcelles d'érosion ont amené les géologues du PPME à travailler dans une direction différente pour produire sur le secteur de Poro des résultats pouvant apporter des éléments de compréhension utiles à la caractérisation générale du fonctionnement des petits bassins versants miniers. La démarche s'est voulue compensatrice du déficit de données des parcelles d'érosion sur Poro et elle a été financée sur fonds propres du PPME à niveau quasiment égal à celui du financement fléché sur les parcelles d'érosion.

La réponse du consortium avait indiqué qu'il serait recherché autant que possible des croisements thématiques avec les autres programmes du CNRT. A cette fin, une image hyperspectrale a été prise lors de la campagne « CARTHA » du CNRT, sur le site de Poro, sur financement du programme « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* ». Cette imagerie n'a pas pu être exploitée dans le cadre du programme « CARTHA » pour estimer le potentiel des images hyperspectrales, du fait d'une forte couverture nuageuse sur la zone de Poro lors du passage de l'avion, rendant impossible le traitement. Il ne l'a pas été davantage dans le programme « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* » pour tester le potentiel de la méthode sur la problématique de la morphologie dynamique fluviale, comme espéré par les collègues de l'IRD dans leur projet.

Si l'image ne pouvait pas être exploitée sur la zone cible du fait de la forte couverture nuageuse couvrant les bassins emboîtés de Poro, elle offrait tout de même des surfaces pouvant l'être pour tester le potentiel de la télédétection hyperspectrale sur des problématiques susceptibles d'intéresser les mineurs. Les géologues du PPME et leurs collègues du SGNC engagés dans le programme « CARTHA », associés aux spécialistes de télédétection de l'IRD porteurs de ce même projet ont donc lancé une étude complémentaire aux programmes cités pour essayer de valoriser malgré tout l'acquisition de l'image et d'obtenir des informations pédologiques supplémentaires susceptibles de faciliter l'interprétation du fonctionnement hydrosédimentaire des bassins de Poro.

Cette étude complémentaire a été confiée au GIE Océanide et c'est Florian de Boissieu qui l'a réalisée dans la continuité des travaux qu'il a mené au sein de l'IRD pour la production d'un indice sédimentaire. Elle est restituée ci-après dans ce rapport sous le format original produit par Océanide.

1.2 Cartographie du régolithe par télédétection hyperspectrale

Florian De Boissieu (GIE Océanide)



Cartographie du régolithe par télédétection hyperspectrale

Rapport final

Auteur : Florian de Boissieu

Table des matières

Introduction	1
Produit 1 : cartes de serpentinsation et des oxydes de fer	2
Produit 2: carte de classification du régolithe	9
Conclusion.....	11
Bibliographie.....	14
Annexe	16

Introduction

Le travail effectué dans cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés dans les programmes du CNRT « *CARTHA* » et « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* ». En effet, une image hyperspectrale a été prise lors de la campagne « *CARTHA* », sur le site de Poro, sur financement du programme « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* ». Les résultats sont décevants dans la mesure où la zone strictement suivie dans le cadre des projets « *Hydromine* » et « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* » est inexploitable du fait d'une forte couverture nuageuse, rendant impossible l'évaluation du potentiel des images hypersectrales dans cette région pour la problématique de la morphologie dynamique fluviale. Cependant, immédiatement à proximité de la zone du bassin étudié, les données sont exploitables et peuvent permettre d'opérer les traitements.

L'objectif de cette étude complémentaire aux deux programmes cités précédemment consiste à utiliser les images hyperspectrales métriques (HyMap) et de les croiser avec les données disponibles pour compléter le travail des géologues du PPME en fournissant des informations pédologiques supplémentaires telles qu' :

- une cartographie renseignant sur la minéralogie des sols, dans une zone proche du bassin de référence « *Hydromine* »
- une cartographie du régolithe par classification fine des sols nus de Poro.

Contexte

La connaissance de la répartition spatiale et de l'évolution des composants naturels (géosphère, hydrosphère, biosphère) des massifs de péridotites est à la base de la compréhension et du suivi de ces milieux très spécifiques, riches en ressources naturelles et en biodiversité, mais fragiles et sensibles. Cependant, compte tenu du caractère insulaire tropical de la Nouvelle-Calédonie (île haute aux reliefs importants, hétérogénéité de la biodiversité végétale, inaccessibilité...), la prospection de terrain et la cartographie peuvent s'avérer difficiles à réaliser, particulièrement sur de grandes étendues.

Dans ce domaine, la télédétection hyperspectrale aéroportée possède deux atouts :

- une capacité à couvrir de grandes surfaces avec une résolution métrique
- une forte résolution spectrale permettant une discrimination fine des éléments naturels (minéraux et végétaux).

La télédétection hyperspectrale aéroportée est donc particulièrement adaptée au terrain calédonien et trouve naturellement, dans ce contexte, des applications pluri-thématiques depuis le domaine montagneux jusqu'au lagon, de la mine à son environnement.

Des données hyperspectrales aéroportées (Hymap) et de terrain, uniques sur le territoire de Nouvelle-Calédonie, ont été acquises (juin et novembre 2010) dans le cadre du projet CNRT « *CARTHA* ». Dans le cadre de ce projet une image hyperspectrale sur le bassin minier de Poro a été financée par le projet « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* ».

Le développement méthodologique réalisé dans le cadre du projet « *CARTHA* » a permis de montrer le potentiel de l'imagerie hyperspectrale aéroportée pour la cartographie du régolithe des sols nus.

Il s'agissait pour cette commande d'adapter cette méthodologie à la région de Poro et aux données terrains récoltées pour produire une cartographie de la serpentinisation des roches, une cartographie de la teneur en oxyde de fer et une cartographie par classification du régolithe sur la partie exploitable de l'image hyperspectrale aéroportée de Poro, proche du bassin de référence « *Hydromine* ». Ces produits et les méthodes employés pour les obtenir sont décrits dans les parties suivantes. Un draft d'article, présenté en Annexe [], associant l'UNC à ces travaux, détaille le développement et les choix méthodologiques réalisés notamment dans le cadre de cette prestation.

Produit 1 : cartes de serpentinisation et des oxydes de fer

Cette cartographie est basée sur un traitement de l'image hyperspectrale Poro_01 acquise le 04 novembre 2010 par l'entreprise HyVista lors de la campagne d'acquisition organisée dans le cadre du projet CARTHA. L'image hyperspectrale de Poro_01 est une image HyMap qui a les caractéristiques suivantes :

- 125 canaux répartis sur l'intervalle de longueurs d'ondes [450, 2500] nm.
- Surface d'environ 5x2 km= 10 km²
- Résolution spatiale de 3.6 m

L'image hyperspectrale brute ne peut pas être utilisée telle quelle. Elle a donc subi une série de pré-traitements visant à enlever les perturbations atmosphériques et à géolocaliser l'image dans le système de coordonnées géographique RGNC91-93. Le pré-traitement visant à transformer l'image de radiance (données brute) à l'image de réflectance a été réalisé avec le Second Order Derivative Algorithm (Rodger, 2011), un algorithme développé par le CSIRO et basé sur MODTRAN5. La géocorrection a été réalisée par la société HyVista puis complété avec ArcGIS pour le changement de système de coordonnées géographiques et le géoréférencement.

Des traitements ont ensuite été appliqués afin d'extraire les caractéristiques spectrales relatives à la serpentinisation et à l'oxyde de fer. Ces traitements comportent les étapes suivantes :

- Isolation des zones de sol nu (Figure 2):



- Masque de la végétation, dont les pixels ont une valeur de NDVI supérieur à 0.25
- Masque des zones recouvertes par l'eau et zones d'ombre, dont les pixels ont une valeur d'albedo (B_{1650nm} inférieur à 2300
- Masque des nuages dont les pixels ont une valeur supérieure à 1000 pour la bande 1.
- Normalisation des spectres par retrait du spectre de continuum (continuum removal). Lors de cette opération, les bandes {30, 48, 49, 61 → 67, 91 → 93} comportant un résidu du bruit atmosphérique trop important sont retirées.
- Estimation par interpolation polynomial de la profondeur de spectre et de la longueur d'onde de maximum d'absorption autour des longueurs d'onde de 900 nm et 2310 nm respectivement attribuées à l'oxyde de fer et à la serpentinitisation.

Trois cartes représentatives du taux d'oxyde de fer (Figure 3), du rapport Goethite/Hématite (Figure 4) et de la serpentinitisation (Figure 5) ont ainsi été obtenues. Voici quelques éléments nécessaires pour analyser ces cartes.

Eléments d'analyse

Le taux d'oxyde de fer est lié à la profondeur de l'absorption autour de 900 nm. Ainsi plus la valeur du maximum d'absorption spectral autour de 900 nm est importante, plus le taux d'oxyde de fer est important à la surface du sol.

Le rapport Goethite/Hématite (G/H) est lié à la variation en longueur d'onde du maximum d'absorption autour de 900 nm. En effet, l'hématite présente une absorption généralement comprise dans l'intervalle [850 ; 900] nm, tandis que la goethite présente une absorption généralement comprise dans l'intervalle [900 ; 950] nm. Donc, plus le rapport G/H est faible, plus la longueur d'onde de maximum d'absorption autour de 900 nm est faible. Or, l'hématite a un fort pouvoir colorant rouge, comme l'indique son nom. En termes régolithiques, on peut donc également dire que plus le rapport G/H est faible, plus la latérite tire vers le rouge. Cependant il faut également savoir que, malgré la normalisation par le continuum removal, plus la roche est patinée (latérite indurée → cuirasse) plus le signal, et donc la profondeur de l'absorption, sera faible.

Enfin, l'évaluation de la serpentinitisation est relative à la profondeur d'absorption autour de 2310 nm. Plus la valeur du maximum d'absorption autour de 900 nm est importante, plus le sol est serpentinitisé.

La Figure 6 présente un zoom de la carte de serpentinitisation. On distingue clairement le passage du plateau latéritique (en bleu foncé sur la carte) à la semelle serpentinitisée (jaune-rouge) qui plonge dans la mer. On distingue également une concentration de serpentine plus élevée au centre des pistes minières que sur les bords latéritiques. Cet ensemble d'éléments confirme que cette carte est réaliste.



Figure 1: Image vraies couleurs des données hyperspectrales de la zone du bassin de référence "Hydromine", après correction atmosphérique et géoréférencement. La plage de longueurs d'onde [450 ; 2500] nm ne permet malheureusement pas d'analyser le sol au travers des nuages, ce qui rend inutilisable la zone centrale de cette image.

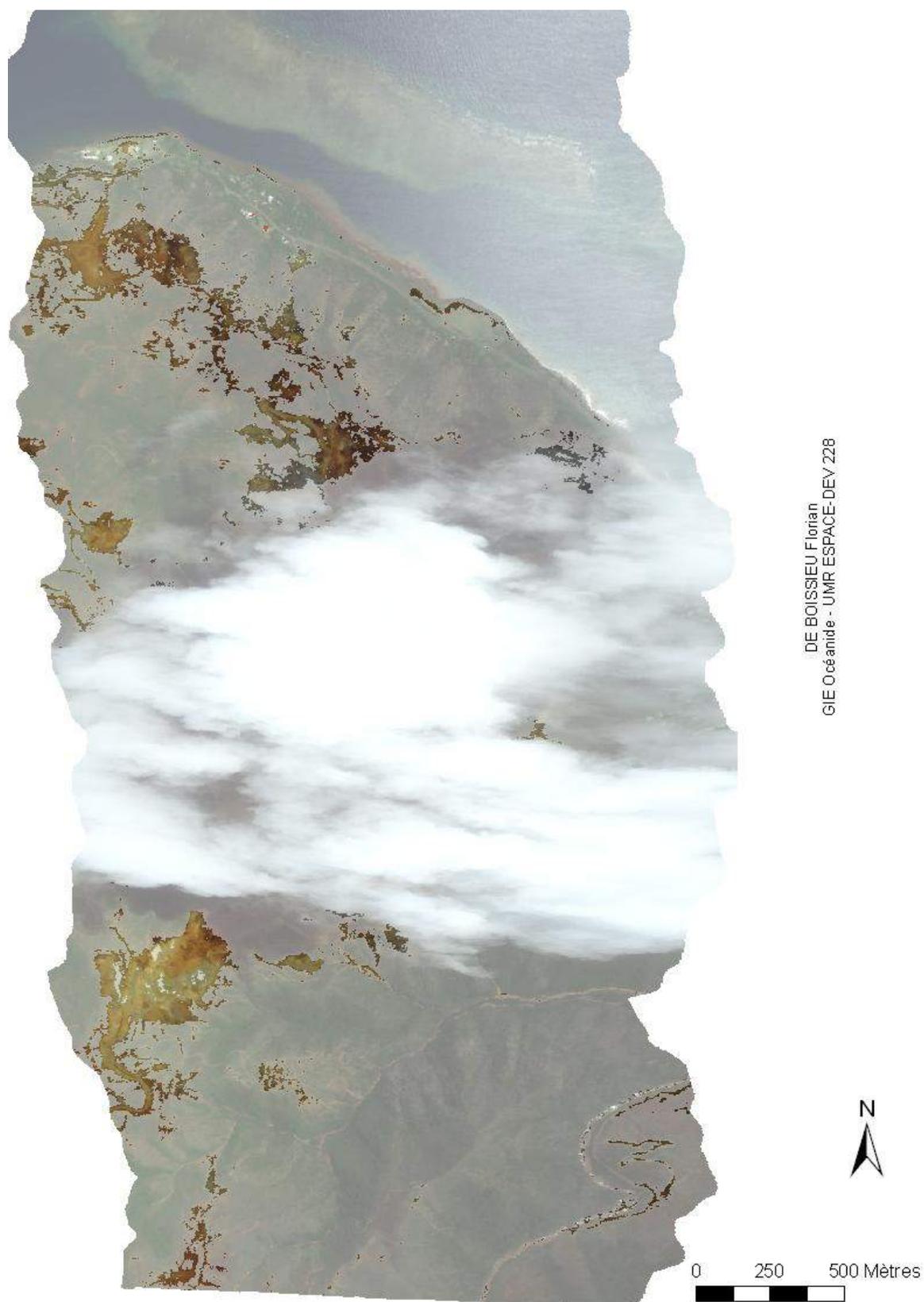


Figure 2: Masque de la végétation, de l'eau et des nuages. Les zones en couleur pâles sont les zones masquées. Les zones en couleurs vives sont les zones de sols nus analysés par la suite.

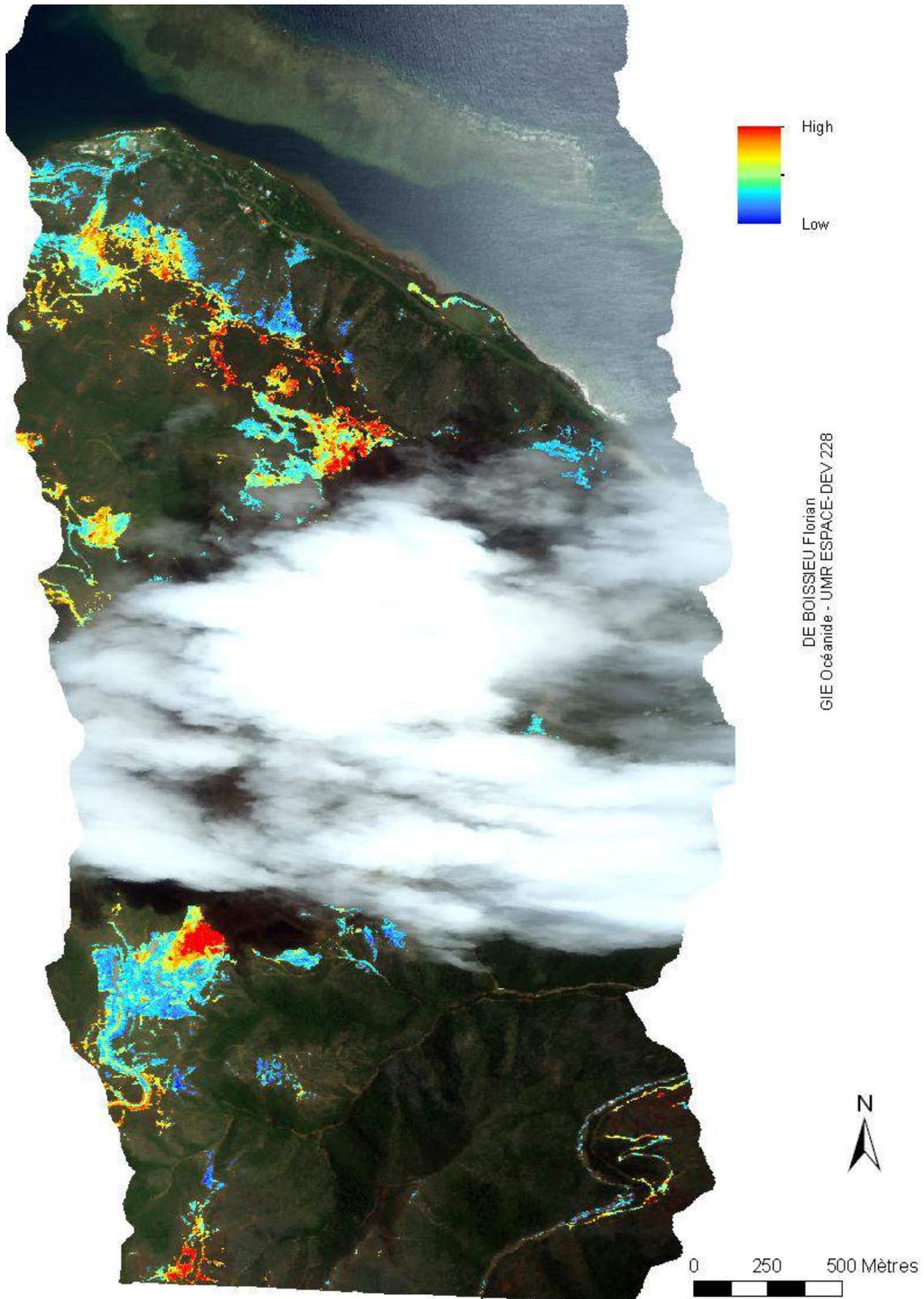


Figure 3 : Taux d'oxyde de fer évalué sur la base de la valeur du maximum d'absorption autour de 900 nm.

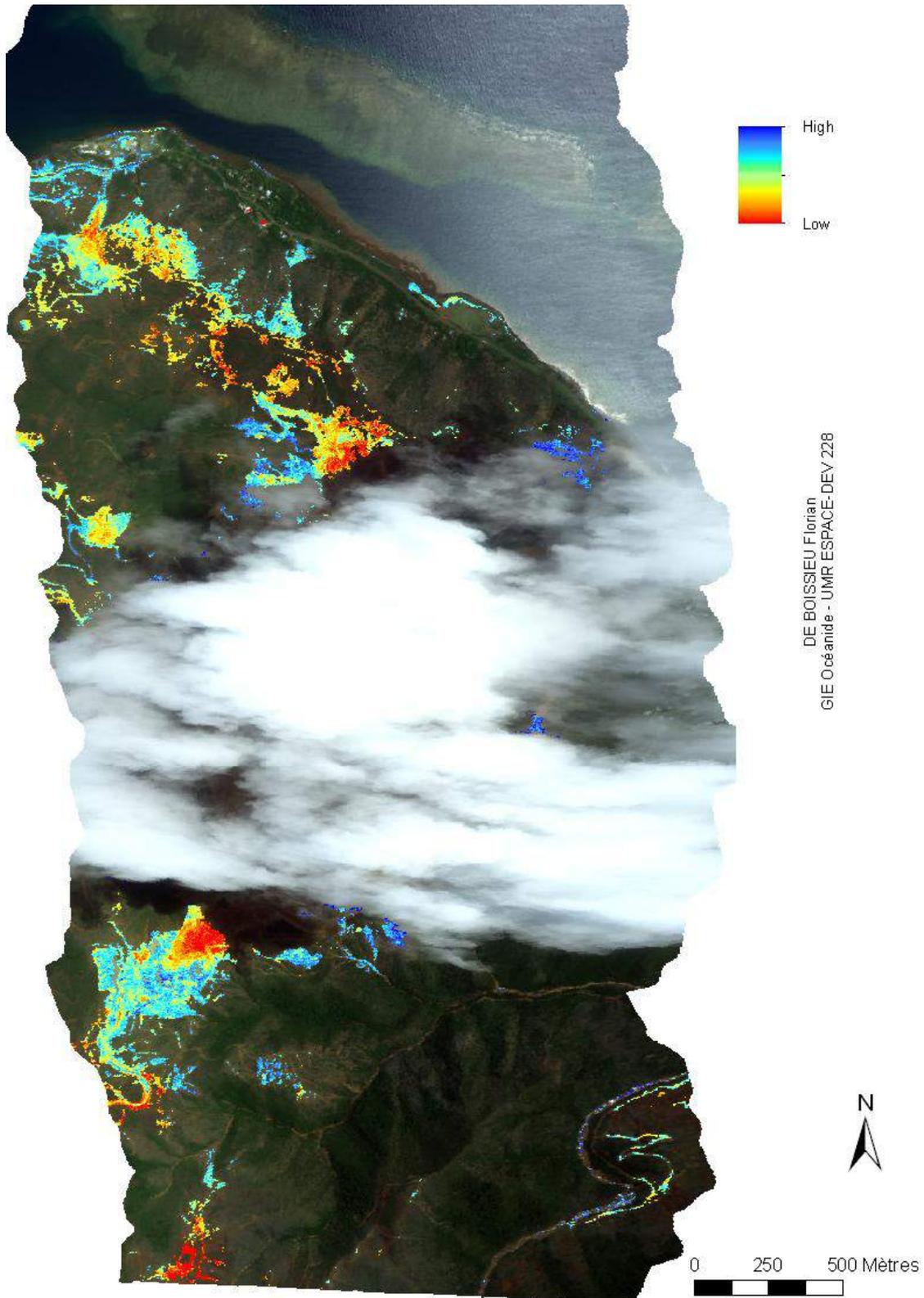


Figure 4: Rapport Goethite/Hématite évalué grâce à la longueur d'onde du maximum d'absorption autour de 900 nm.

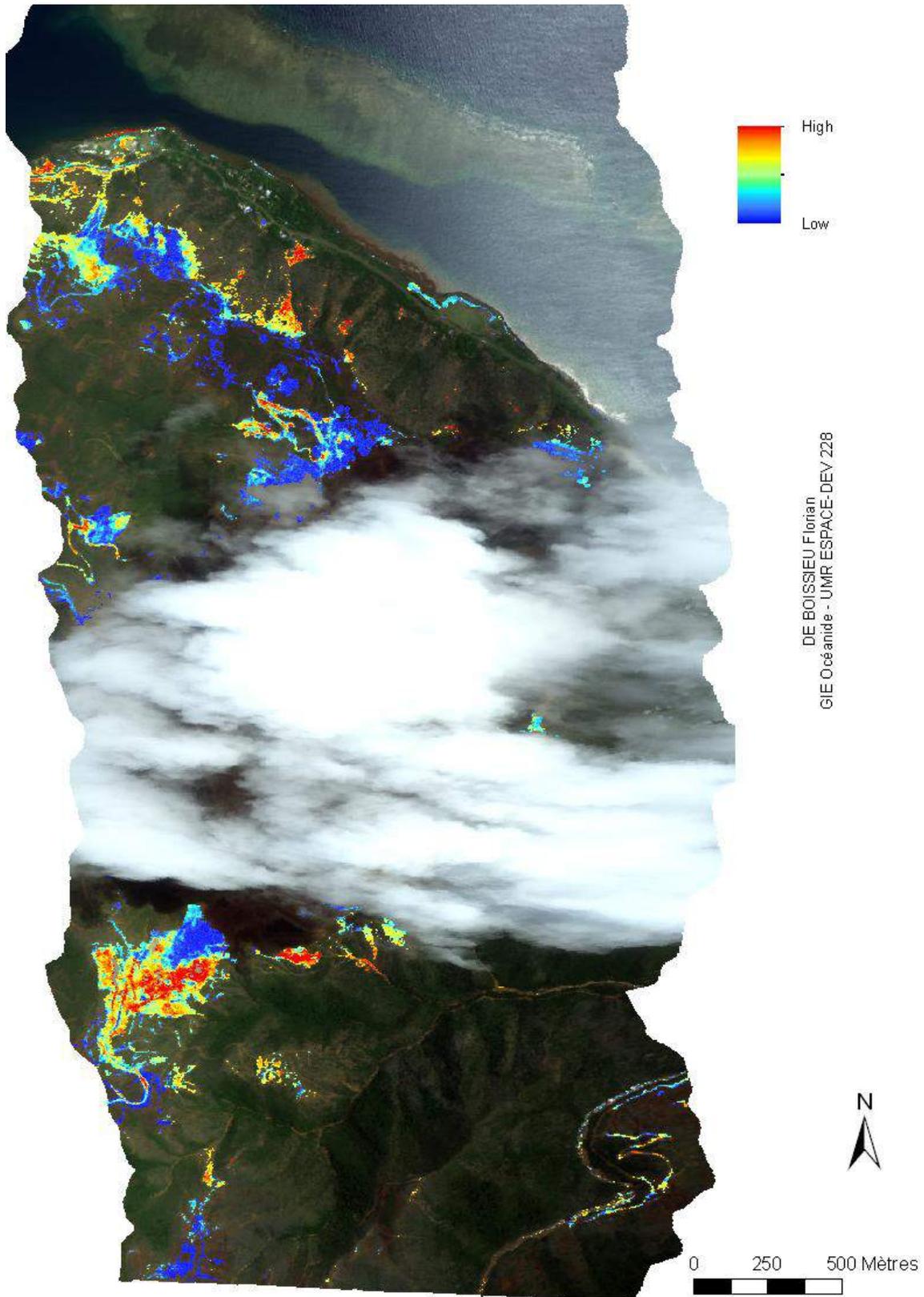


Figure 5: Taux de serpentinisation évalué à partir de la valeur du maximum d'absorption autour de 2310 nm.

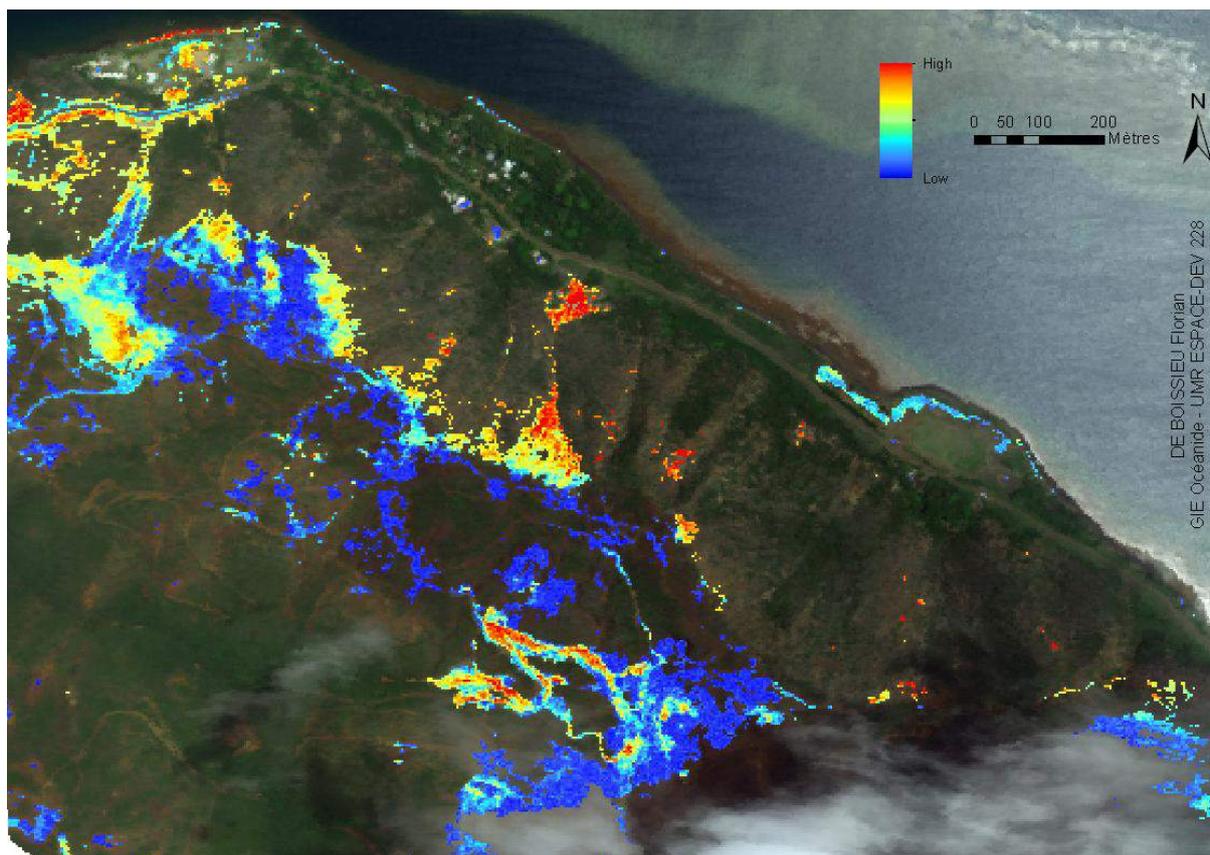


Figure 6: Zoom sur la carte de serpentinisation. On remarquera le changement de serpentinisation avec la rupture de pente entre le plateau latéritique (au Sud) et la semelle serpentinisée (versant Nord plongeant dans la mer).

Produit 2: carte de classification du régolithe

A partir des caractéristiques spectrales extraites (profondeur et longueur d'onde des maxima d'absorption) ainsi que de zones de référence géolocalisées identifiant les différentes classes de régolithe, on peut effectuer une classification supervisée permettant de cartographier ces classes sur les parties de sol nu (sans végétation) visibles sur l'image hyperspectrale utilisée. Cette partie présente les données relatives à ces zones de références, la méthode de classification supervisée développée ainsi que les résultats obtenus.

Données et méthodes

Lors de cette étude, nous avons identifié, avec l'aide de Brice Sevin, géologue du Service Géologique de Nouvelle-Calédonie, des zones de références des 4 classes de régolithe issu de l'altération de la péridotite : cuirasse, latérite, saprolite, roche mère. Ces zones ont été déterminées à partir de la représentation vraies couleurs de l'image HyMap ainsi que les orthophotos de la zone (36-31-IV.tif et 36-32-II.tif, fournies par la DITTT). La Figure 7 présente la carte des zones identifiées. Selon les propos de B. Sevin, la zone étudiée de Poro présente peu de surfaces de cuirasse. Pour cette classe nous nous sommes donc basés sur les mesures terrain effectuées par Stéphane Chevrel (BRGM) dans le cadre des campagnes d'acquisition de CARTHA. La zone de cuirasse identifiée étant masquée par le premier masque présenté dans la partie précédente, le masque a été élargi. En effet, la cuirasse ne présentant pas d'absorption particulière, la moindre présence de végétation peut conduire à

son exclusion dans le cadre d'un filtrage des zones couvertes par la végétation. Par ailleurs, la patine de la cuirasse a pour conséquence une faible réflectance pouvant exclure certains pixels de cuirasse nue selon le seuil d'albedo appliqué. Ainsi, les seuils de NDVI et d'albedo ont donc été changés pour élargir le masque et intégrer en particulier la zone référence de cuirasse. Le nouveau masque a pour caractéristique : $NDVI < 0,31$, $B_1 < 1000$, $B_{1650nm} > 1500$. Dans l'ensemble, on notera que les zones identifiées sont petites, en raison de la faible homogénéité du terrain qui est en partie exploité. Le Tableau 1 résume le nombre de pixels par classe de régolithe que cela représente sur l'image HyMap après application du masque.

Lors de la production des cartes de minéralogie de la surface des sols nus, nous avons extraits les caractéristiques spectrales des absorptions autour des longueurs d'onde de 900 nm et 2310 nm. Pour cette partie de l'étude nous avons ajouté la profondeur du maximum d'absorption autour de 660 nm et 2120 nm, renseignant respectivement sur la teneur en goethite et la teneur en serpentine. Ces caractéristiques ont été extraites avec la même méthode que celle mentionnées dans la partie précédente et employée pour extraire les caractéristiques autour de 900 nm et 2310 nm. Le Tableau 1 résume les caractéristiques spectrales, utilisées dans le cadre de cette étude, associées aux différentes classes de régolithes. Les caractéristiques D_{660} , D_{900} , W_{900} , D_{2120} et D_{2310} sont donc utilisées comme variables d'entrées de la classification entre les 4 classes de régolithes.

Type de sol	Nb de pixels de référence	Caractéristiques spectrales
Cuirasse	20	Faible réflectance, pas d'absorption significative
Latérite	25	D_{900} : oxydes de fer (goethite et hématite) W_{900} : rapport goethite/hématite
Saprolite	23	D_{660} : goethite et potentiellement garnierite D_{2120} , D_{2310} : serpentine
Roche mère (péridotite)	20	D_{2120} , D_{2310} : serpentine

Tableau 1: caractéristiques spectrales de chaque classe de sol identifiées sur les spectres HyMap des zones de références. D_i et W_i représentent respectivement la profondeur et la longueur d'onde du maximum d'absorption autour de la longueur d'onde i exprimée en nanomètres.

La classification effectuée est de type multi-classe et supervisée, c'est-à-dire avec apprentissage sur les échantillons de référence. L'algorithme de classification que nous avons mis en place est basé sur les machines à support vectoriel (SVM). Nous avons choisi cette méthode notamment pour son efficacité pour la classification non-linéaire et sa capacité de bonne généralisation malgré un petit nombre d'échantillons d'apprentissage. Le type de SVM utilisé fait l'usage d'une fonction noyau à base radiale de type gaussienne (Gaussian RBF en anglais). L'algorithme de classification par SVM comporte deux paramètres : le coefficient de régularisation C et le coefficient γ de la fonction noyau. Ces paramètres sont fixés à $C=1$ et $\gamma=1/(\text{nb de variables d'entrée})=1/5$.

Afin d'effectuer l'apprentissage et évaluer les performances du classifieur, nous avons réalisé une validation croisée en 5 parts (5-fold cross-validation en anglais). Cette méthode utilise respectivement chaque part pour le test du classifieur après l'avoir entraîné avec les 4 parts restantes. Cela permet d'utiliser artificiellement l'ensemble du jeu de données pour le test tout en évaluant l'algorithme sur des échantillons n'ayant pas été utilisés pour l'apprentissage.



Enfin, étant donné que nous n'avons pas d'a priori quantifié sur la probabilité d'apparition de telle ou telle classe, le jeu d'entraînement est formé de manière équirépartie entre les classes avec un choix aléatoire de 20 échantillons (pixels) par classe parmi les pixels de référence disponibles. La carte de classification du régolithe sur l'ensemble des zones de sol nu isolées par le masque est produite grâce au même classifieur entraîné sur l'ensemble du jeu d'entraînement (20 ech./classe).

Résultats & éléments d'analyse

Les résultats de la classification sont excellents, le classifieur reconnaît à 100% les pixels des zones de référence. La Figure 8 présente la carte de classification de la zone de Poro, sur laquelle on a appliqué le masque plus restrictif ($NDVI < 0.25$, $B_{1650nm} > 2300$) en voile blanc. Ainsi les couleurs vives représentent la classification des pixels passant à travers le masque restrictif, les mêmes couleurs claires représentent les pixels ayant $0.25 < NDVI < 0.31$ et/ou $1500 < B_{1650nm} < 2300$. Sur cette image, les pixels de couleurs claires sont situés le plus souvent dans l'ombre ou à la limite des nuages. Le signal de réflectance y est donc plus perturbé et la classification de ces pixels est à considérer avec plus d'attention car potentiellement plus sujette à erreur.

L'analyse globale de cette carte montre une surface de plateau très peu cuirassée, mais plutôt latéritique, avec des occurrences de saprolite et roche-mère. De plus, sur le versant côtier de du massif on peut constater une classification tout à fait réaliste avec sur le plateau la latérite, puis un cordon de saprolite au début du versant et enfin la roche mère qui apparaît en dessous et dans le lit des ruisseaux. Ces observations sont totalement en accord avec ce qui est attendu géologiquement. Une validation de terrain avec un géologue pourrait permettre de confirmer la validité de cette carte.

Conclusion

Cette étude a permis de cartographier, avec une résolution de l'ordre de 4 m, la minéralogie de manière qualitative et ainsi que le régolithe selon les classes définies par des zones de références (cuirasse, latérite, saprolite, roche mère). Pour obtenir ces cartes, nous avons suivi le cheminement suivant :

- prétraitement des images afin de corriger les perturbations, de les géoréférencer dans l'espace et d'isoler les parties de celles-ci qui nous intéressent, i.e. les sols nus.
- extraction de caractéristiques spectrales (absorption) représentatives de l'abondance et de la composition minéralogique de la surface des sols
- classification des pixels dans l'une des 4 classes de régolithe identifiées

Les résultats obtenus sont tout à fait en accord avec ce qui était attendu par les géologues du projet « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* ». En effet, les cartes de minéralogie résultant de l'extraction de des caractéristiques spectrales montrent un taux d'oxyde de fer ainsi qu'un rapport hématite/goéthite plus important sur les parties hautes du plateau. A mesure que l'on descend dans les incisions, sur les versants ou dans les zones exploitées, ces valeurs diminuent, en opposition avec l'augmentation de la serpentinitisation. Ceci se retrouve sur la carte de régolithe réalisée par classification. Ainsi, on observe une frontière précise entre les couches de latérite, saprolite et roche mère. La cuirasse, peu présente sur les surfaces nues de cette zone, se retrouve en bordure de latérite souvent à la frontière avec la végétation. Une recommandation que l'on peut faire avant utilisation de cette carte comme vérité terrain serait d'aller la valider sur le terrain avec les géologues du projet.



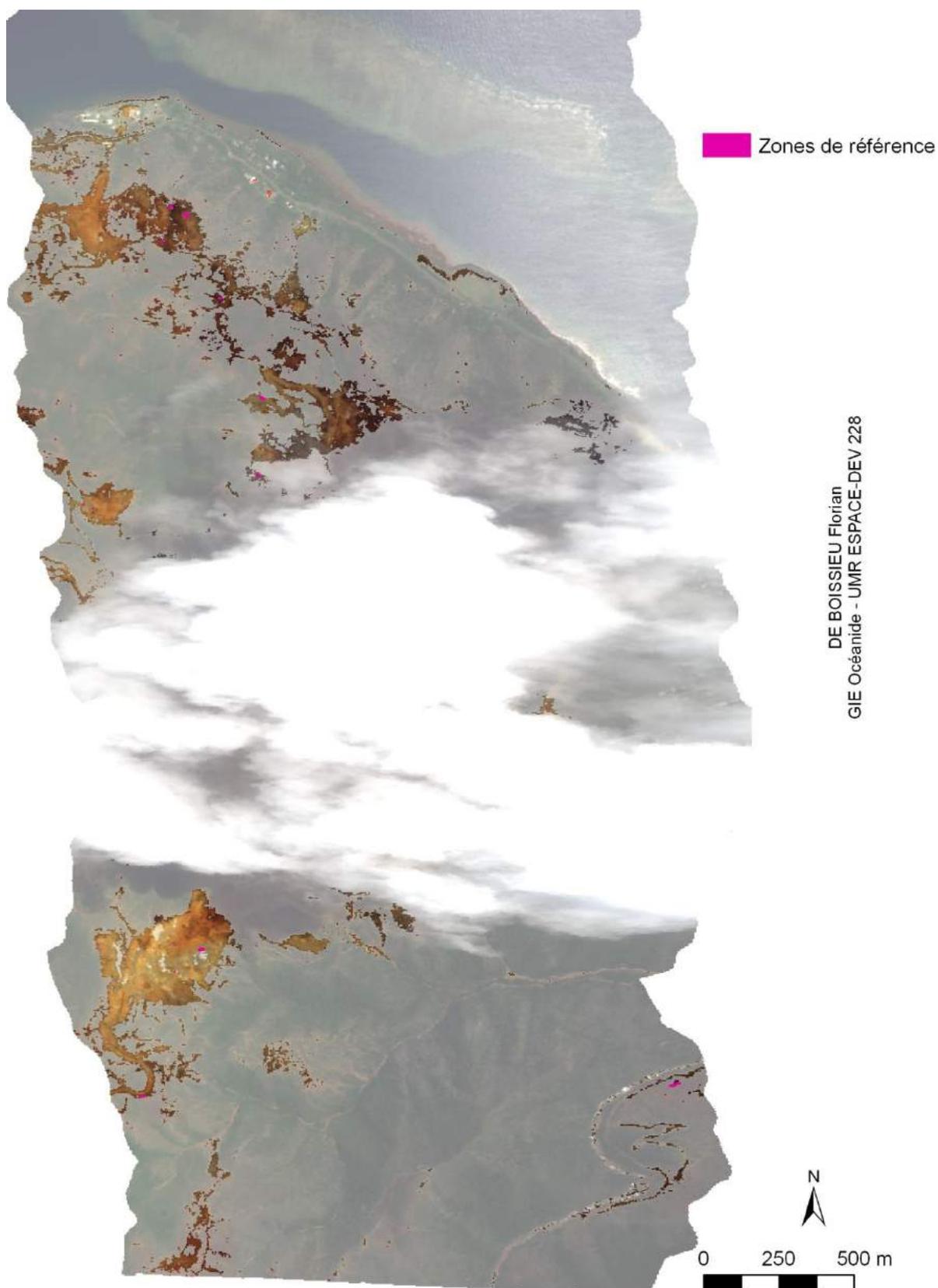


Figure 7: carte des zones homogènes de référence (en rose) identifiées comme l'une des 4 classes de régolithe considérées (cuirasse, latérite, saprolite, roche-mère).

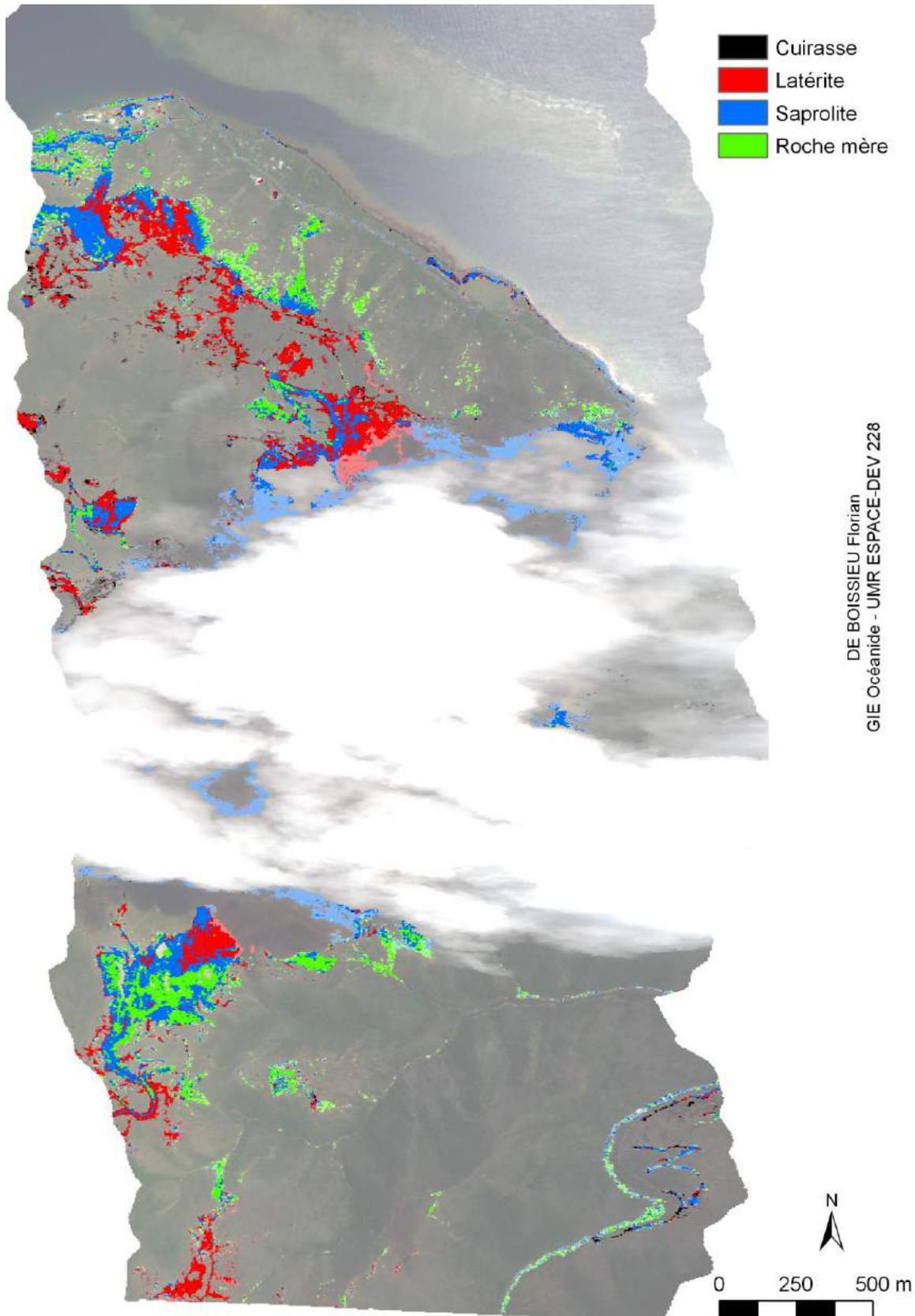


Figure 8: carte du régolithe pour 4 classes, réalisée par classification SVM des caractéristiques spectrales extraites. Les couleurs claires correspondent aux parties masquées par le masque de végétation, ombre et eau ($NDVI < 0.25$, $B_1 < 1000$, $B_{1650nm} > 2300$).

Liste des éléments des produits 1 et 2

- Data/ : contient les données hyperspectrales brutes et pré-traitées
 - o Raster/ : ensemble des couches raster
 - Poro_01_V60_georef_imgTC.tif [EPSG:3163]: image vraies couleurs des données hyperspectrales
 - Poro_01_V60_georef.tif [EPSG :3163]: données géocorrigées
 - Radiance/ [UTM58S WGS84] : données brutes fournies par HyVista, cf hvc_data_products.pdf
 - Reflectance/ [UTM58S WGS84]: données corrigées atmosphériquement calculé par le CSIRO à partir de l’algorithme issu de (Rodger, 2011), cf rapport
 - Geocorrection/ [EPSG :3163]: données géocorrigées calculé par l’IRD avec ENVI.
 - o Shapefile/ [EPSG :3163]: données des zones de référence
 - Poro_01_ZonesDeReference.shp
- Results/ [EPSG :3163]:
 - o 20120606102128_mask_sol.tif : masque de la végétation, des nuages et de l’eau
 - o Poro_01_V60_georef_NDVIlt0.25_B1lt1000_R1650gt2300.tif : données de sol nu (vegetation, eau, nuages et ombres maquées)
 - o Features : données correspondant aux caractéristiques de spectrales extraites, i.e. la profondeur (suffixe D) et la longueur d’onde (suffixe W) du maximum d’absorption autour de la longueur d’onde λ exprimée en nanomètres.
 - 900D/900D.tif : la valeur du maximum d’absorption autour de 900nm, donnant l’évaluation qualitative du taux d’oxide de fer
 - 900W/900W.tif : la longueur d’onde du maximum d’absorption autour de 900nm, donnant l’évaluation qualitative du rapport goethite/hématite
 - 2310D/2310D.tif : la valeur du maximum d’absorption autour de 2310nm, donnant l’évaluation qualitative du taux de serpentine
 - 20121013181442Poro_01_660D_900DW_2120D_2310D_poly4_1mC R.tif: raster brick à 5 couches, utilisées comme entrées de la classification. Canal 1 : 660D
 - o Classes/ : résultats de la classification
 - 20121013185639/ :
 - 20121013185639.kfoldind.RData : fichier binaire R contenant les indices des pixels utilisés pour la cross-validation
 - 20121013185639.SVMClassif.tif : carte de classification des sols nus
 - 20121013185639.SVMClassif_legende.txt : légende de la carte SVMClassif
 - 20121013185639_RegClassif.rlog : fichier de log pour application de l’algorithme de classification. Ce fichier informe notamment sur les matrices de confusion.
 - o Figures/ : figures présentées dans ce rapport

Bibliographie



Pôle d'expertise et de recherche

Gestion intégrée des territoires et de l'Environnement en Océanie

n° ridet 807032.001 • contact : gioceanide@gmail.com

tel : (687) 26 08 27 / 26 08 26 / 26 09 30 • mob : (687) 95 75 42 / 81 81 66 / 97 73 88 14/30

G.I.E. Océanide • Centre IRD, BPA5, 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

Rodger, A., 2011. SODA: A new method of in-scene atmospheric water vapor estimation and post-flight spectral recalibration for hyperspectral sensors, Application to the HyMap sensor at two locations. *Remote Sensing of Environment*, 115, pp.536-547.



Pôle d'expertise et de recherche

Gestion intégrée des territoires et de l'Environnement en Océanie

n° ridet 807032.001 • **contact : gioceanide@gmail.com**

tel : (687) 26 08 27 / 26 08 26 / 26 09 30 • mob : (687) 95 75 42 / 81 81 66 / 97 73 88 15/30

G.I.E. Océanide • Centre IRD, BPA5, 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

Annexe

Article en préparation pour une soumission à la revue Remote Sensing of Environment :

Airborne hyperspectral remote sensing for mineral and regolith mapping of New Caledonia

Florian DE BOISSIEU, Brice SEVIN, Morgan MANGEAS, Stéphane CHEVREL, Andrew RODGER, Carsten LAUKAMP, Ian LAU, Thomas CUDAHY, Dominique CLUZEL, TOURAIVANE, Marc DESPINOY

Abstract

The development of mining and thus resource management in New Caledonia has led recently to a project aiming at prospecting innovative technologies to help geological survey and mining exploration for geological mapping. In that context, the first airborne hyperspectral images were acquired over New Caledonia with a HyMap sensor, as well as a spectral library collected on the field with a Fieldspec 3 sensor. These data give a measurement of VNIR and SWIR reflectance spectra of soil surface, allowing the identification of minerals such as iron oxides and serpentines. Based on previous work that has been done on lateritic ore mineral mapping, in Australia by the CSIRO, we developed a methodology for mineral and regolith mapping. This methodology consists in the following steps: i) preprocessing the HyMap data, ii) identifying common spectral features corresponding to mineral abundance and composition, iii) extracting the features to obtain mineral maps, iv) training a Support Vector Machine classifier on labeled HyMap features and finally v) mapping the regolith at different levels of detail. This article explains the specificities of the geological context of New Caledonia and details the hyperspectral processing methodology as well as the mapping obtained results.

1. Introduction

New Caledonia is a tropical island located on Norfolk ridge, at 1400 km North-East from Brisbane. It is constrained by geology, primarily in terms of mineral resources, in particular with nickel. Therefore, the territory's economy depends mainly on the basement. But the existing sets of regolith maps on massive peridotites, host of nickel deposits, is not at a sufficient level of detail in relation to economic issues of the country (mining activity and resource management). At the moment, regolith maps are mainly made from expert observation on the field, drawn by hand and then digitalized. Usually, mapping the regolith is an exercise in which visually observed geomorphological forms are plotted in a three-dimensional environment (mainly from the field) on a topographic map in two dimensions. This method shows two essential drawbacks. First, it is very subjective to the expert and the observation conditions. Second, the surfaces of the Grande Terre (the main island of New Caledonia) to be mapped are large and a great part of them wild and very difficult to access. Therefore the development of airborne remote sensing methods is crucial for the development of mining exploration as well as environment preservation and resource management.

Hyperspectral remote sensing is a technology used in mining exploration since decades for applications at all scales ranging from the drillcore mineral analysis (Clark et al., 1990; Kruse, 1996) to the spaceborne surface mapping (Kruse et al., 2003; Hewson et al., 2005), including field measurements and airborne mapping (Martin et al., 1998; Mulder et al., 2011). The high



Pôle d'expertise et de recherche

Gestion intégrée des territoires et de l'Environnement en Océanie

n° ridet 807032.001 • **contact : gieoceanide@gmail.com**

tel : (687) 26 08 27 / 26 08 26 / 26 09 30 • mob : (687) 95 75 42 / 81 81 66 / 97 73 88 16/30

G.I.E. Océanide • Centre IRD, BPA5, 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

spectral resolution in visible and infrared wavelengths allows the identification and measurement of mineral abundance, such as iron oxides and serpentines (Papp and Cudahy, 2002; Cudahy et al., 2008). However the application of hyperspectral to the specificity of weathered peridotite massifs in the tropics remains limited. In New Caledonian mining profession, remote sensing is infrequently used and hyperspectral technology is almost unknown, although hyperspectral imaging is particularly well suited to explore large areas. The first airborne hyperspectral data of New Caledonia were acquired in 2010 with a HyMap sensor (Cocks et al., 1998), during a project aiming at bringing some tools for mining prospection and environmental mapping. Part of the project focused on the mapping of the regolith, in particular its degree of weathering, for use as support for the exploration of mining areas.

2. Geological context and mapping necessity

The geological history of New Caledonia is long and complex. The last important event is the obduction of mantle material over continental crust during Late Eocene (Cluzel et al., 1998, 2001). This Peridotite Nappe (Avias, 1967) covers one-third of the Grande-Terre, with a great massif in the South and several klippen lining up along the West coast. The basic unit of peridotites is of uneven thickness and highly serpentinized and distorted. This serpentinization is particularly present in Tiebaghi massif on which this study is focused. Following the obduction, the peridotites underwent a strong supergene weathering of tropical climate (Avias, 1969; Trescases, 1975; Latham, 1986; Chevillotte et al., 2006). This phenomenon dissolves slowly the primary minerals until there is only, after a while, a relative accumulation of iron oxyhydroxides (goethite and hematite). The other constituents of ultrabasic rocks, substantially devoided of aluminum, are essentially silica and magnesium, both mobile in the profile due to their high solubility in surface conditions. The presence of abnormally high levels of nickel (0.3%) and cobalt (0.01%) in the bedrock is greatly enhanced by the supergene weathering (up to 4% Ni and Co in 0.05%).

These weathering evolutions led to a typical vertical profile, that one can observe in mountain incisions for example, showing from the bottom to the top, i.e. increasing weathering: bedrock, saprolite, yellow laterite, red laterite, pisolith and ferricrete. Figure 9 shows the typical weathering profile, as well as the corresponding mineralogy, found in New Caledonian ultrabasic massifs. The changes in mineralogy are visually noticeable through colour and structure changes. Indeed, the colour is changing from white to dark brown, which is mainly due to the increase of iron oxides concentration and the hematite/goethite ratio. The weathering gradually fractures and softens the soil from bedrock to laterite, and then condenses the structure leading to duricrust and pisolith layers on the top.

Mapping the regolith and especially the limits between saprolite (coarse and fine) and laterite is of triple interest. The particular concentration of Ni and Co in saprolites is interesting mining companies. The hydrological resources of the ultrabasic massifs are mainly located in the saprolite layers of the weathering profile. Finally, the low cohesion and heterogeneity of saprolite makes it very prone to landslide events. Therefore in order to better know the massif deposits, minors as well as authorities need different map: i) fine map of the regolith, ii) map of iron oxides, iii) map of the degree of serpentinization of the rock, and finally iv) map of the degree of weathering.

Until now, these maps were mainly based on field observations and visual interpretation, in particular with the color and structure changes of soils. But hyperspectral imaging



technology brings spectral information that allows qualitative measurements of the mineral grades (Cudahy et al., 2008) and permits to detect the specificity of each layer of the weathering profile. In particular, the maps mentioned above can be obtained with the processing methodology of airborne hyperspectral images described in next section. Therefore, the airborne hyperspectral imaging system becomes an extraordinary tool to help geologist in prospecting tasks.

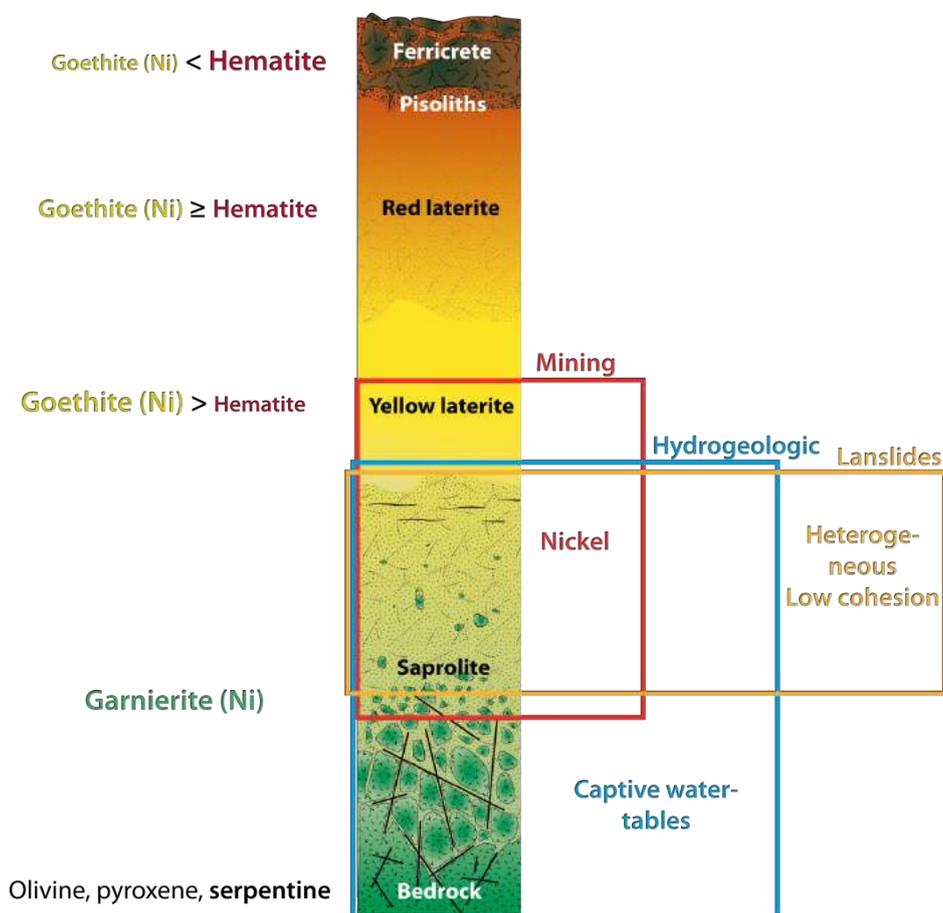


Figure 9: scheme of the weathering profile, with the mineralogy on the left, and the reasons of interest of mapping it on the right.

3. Data

During the study three types of data were acquired: airborne hyperspectral data, field hyperspectral data and georeferenced areas of known regolith class (either estimated by digitization, either by a geologist on the field). Field hyperspectral data is used to identify the spectral characteristics of each soil type. The georeferenced areas of known regolith class allow to validate the existence of these spectral characteristics on airborne hyperspectral data. The dataset of HyMap airborne hyperspectral images was acquired over New Caledonia in 2010. It is the first airborne hyperspectral dataset acquired over New Caledonia. The dataset is composed of 25 flightlines covering a total area of about 500 km² over 7 mining sites (mainly coastal). From the 25 flightlines acquired, a particular one has been chosen for this study due to its important surface of bare soils and small amount of clouds. This flightline was acquired over the massif of Tiebaghi, and more precisely on Fantoche

plateau. The true color image of the area is presented in Figure 10. The surface of the plateau is mainly made of ferricrete (dark brown color). Going downhill, some incision in the let appear the different state of weathering. The bottom part of the hill is made of peridotites rich in serpentine. The image has a spatial resolution of 3.6 m. Each pixel is a spectrum composed of 111 bands over the range of wavelengths [450, 2500] nm, the noisy band due to water absorption being removed. The HyMap data were delivered as radiance images and were transformed to reflectance and georeferenced before use, a preprocessing step described in section 4.

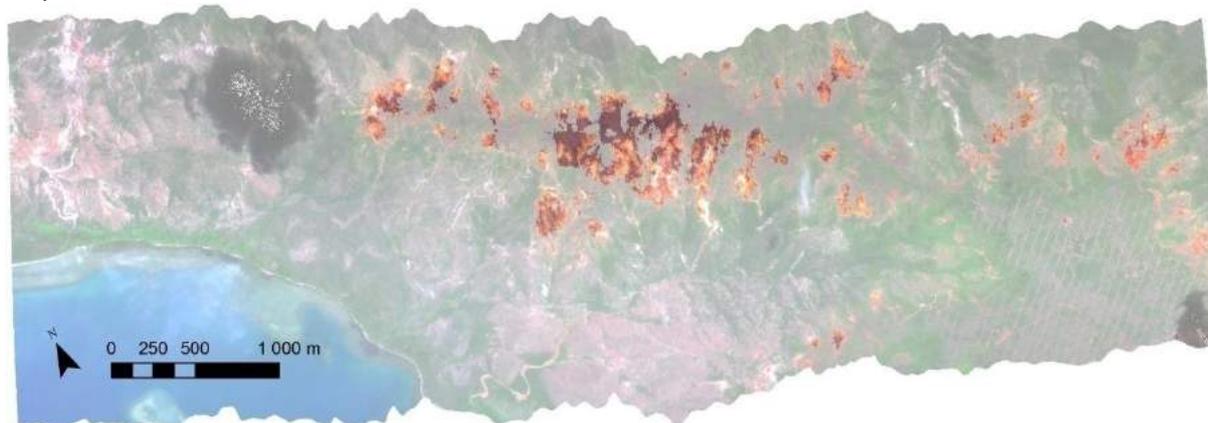


Figure 10: true color image of the HyMap flightline of Tiebaghi with at the center Fantoche plateau. Threshold on NDVI and albedo were used to mask all pixels with vegetation, water or shades (whiten part).

During the same year, spectral library was developed acquiring field spectra with a FieldSpec 3 ASD remote sensor, either at a distance $d \approx 1$ m measuring the reflectance relative to a natural lighting, or either in contact with samples collected on the field using an artificial lightning (halogen at night). The spectral library is composed of spectra on five kinds of soils: ferricrete, red laterite, yellow laterite, saprolite, bedrock. Each spectrum is composed of 1859 bands over the range of wavelengths [350, 2450] nm, the noisy band due to water absorption being removed.

Finally, areas of reference of homogeneous kind of soil were identified by a geologist and located on the field with a GPS. These areas were defined as one of the 6 following kinds of soil: ferricrete, pisolith, yellow laterite, red laterite, saprolite, bedrock. The surface of each class is given in Table 1 as the number of corresponding HyMap pixels of bare soil.

Ferricrete	Pisolith	Red Laterite	Yellow Laterite	Saprolite	Bedrock
187	1847	51	229	547	86

Table 1: Number of labeled pixels of bare soil for each class of the weathering profile.

4. Methods

Based on these datasets, a methodology was developed for mineral and regolith mapping of bare soils. The diagram of Figure 11 gives the different processing steps of this methodology. First, the HyMap images are pre-processed to isolate the bare soil areas of the images and make the spectra comparable to the ASD spectra. Second, the spectral features corresponding to each kind of soil are identified, at first on the ASD spectra, and then on HyMap spectra of the known areas. Third, the features are extracted from the spectra. Finally, a classification model is trained and validated on reference areas, before being

applied to the rest of the HyMap image. Next section details the methods used for each of these steps.

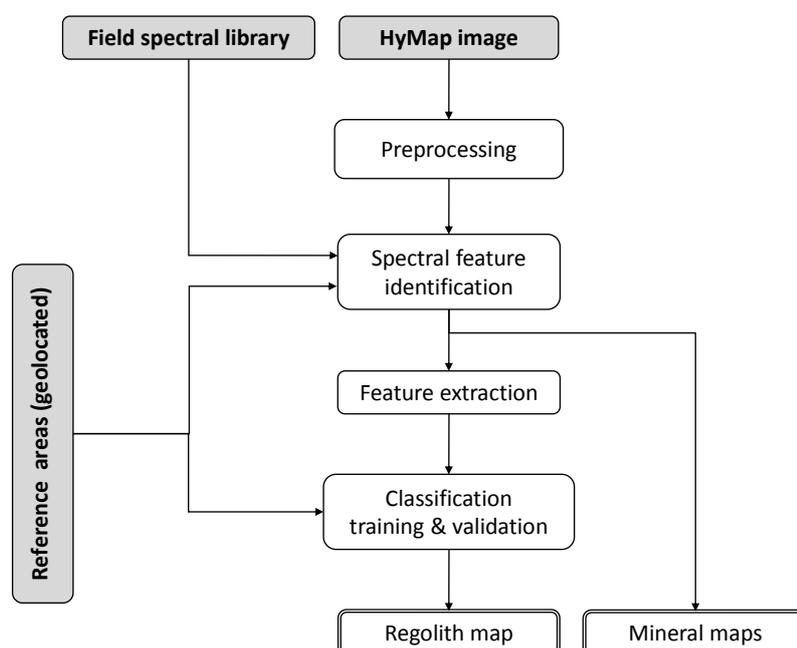


Figure 11: diagram of the processing steps to produce the mineral and regolith maps.

4.1. HyMap pre-processing

The HyMap airborne hyperspectral raw data is delivered as a radiance image of 125 bands over the range of wavelengths [450, 2500] nm. Several pre-processing steps are necessary to make these data usable (Papp and Cudahy, 2002). The first preprocessing step inverts the radiance spectra to reflectance spectra, to make the data comparable to the field spectra. During this step, the atmospheric compensation gets rid of the effects of atmosphere on the spectra, in particular water vapor, and gives as an output the reflectance spectra of the ground. The second step is the ortho-rectification and georeferencing of the HyMap images. Finally, the images are masked to keep only the bare soil areas, and the spectra are normalized to be compared to ASD field spectra.

The radiance to reflectance inversion is based on the MODTRAN 5 method (Berk et al., 2005, 2006) where the atmospheric column of water vapor (ACWV) and the wavelength shift are estimated with the Second Order Derivative Algorithm developed by CSIRO and described in (Rodger, 2011). As the water vapor feature centered at 1130 nm appeared to over-influence the ACWV estimation, the SODA algorithm was adapted reducing the range of wavelengths for the spectral 2nd derivative to $\lambda \in [820, 1050]$ nm instead of $\lambda \in [820, 1200]$ nm given in (Rodger, 2011).

The georeferencing and geocorrection is done with proprietary software developed by HyVistaTM, using the sensor position and orientation acquired simultaneously to the hyperspectral data and the SRTM topographic map of the area that has about 90 m spatial resolution. The geocorrection was refined with a 3rd order polynomial fit on 36 ground control points, leading to a mean error of 7.8 m.

The study focused on bare soils, the vegetation, cloud shades and water pixels being masked. The vegetation mask is based on a Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). This index was first proposed by (Kriegler et al., 1969) and is widely used in remote sensing studies as it reveals fine contrasts between vegetation, soil and water and is robust to the effects of slope on radiometry pixel values. The NDVI calculated with equation (1), where ρ_{680} and ρ_{760} are the reflectance at wavelength 680 nm and 760 nm. The mask is keeping the pixels with an NDVI inferior to 0.25, which is a threshold quite restrictive but that ensures that the soils have no vegetation cover. The shades and water are masked thresholding the albedo band ρ_{1650} empirically at 0.08.

$$NDVI = \frac{(\rho_{760} - \rho_{680})}{(\rho_{760} + \rho_{680})} \quad (1)$$

Finally, to have homogeneous spectra for comparison between ASD and HyMap, the HyMap spectra are normalized to their spectral mean (Cudahy et al., 2008).

4.2. Spectral feature identification

The reflectance spectra (of ASD and HyMap) can be decomposed as the continuum (or convex hull), corresponding to background reflectance, and absorptions relative to material of particular abundance, e.g. minerals (Cudahy et al., 2008). Knowing the mineralogy of the different kinds of soil, we can establish a list of absorptions that can be observed on the spectra. For each absorption of bare soil, the depth of absorption is relative to the abundance of the absorbing material. And as the absorption of several mineral may overlap, the variation of the wavelength of maximum of absorption may depend on the mixture proportions of several materials. An example is the iron oxide, which can be either goethite or hematite. Goethite has a maximum of absorption usually superior to hematite although both are around 900 nm. Hence the wavelength of the maximum of absorption around 900 nm is dependant of the ratio goethite/hematite.

The ASD spectra have a spectral resolution more than 10 times the spectral resolution of HyMap images. Moreover, with distant measurement as well as contact measurement, the ASD instrument allows to isolate one kind of soil instead of a mixture of several kinds of soils as it is usually the case in a HyMap pixel of 13 m². Therefore the spectral features are first identified on the ASD spectra collected on the field and attributed to each kind of soil.

Table 2 presents the list of features that were identified on the ASD spectra as well as on mineral spectral libraries (e.g. USGS spectral library) for the different layers of the weathering profile of peridotite.

Soil type	Spectral characteristics
Ferricrete	Low reflectance, no significative absorption
Laterite	D ₉₀₀ : iron oxides (goethite or hematite) W ₉₀₀ : Goethite/Hematite ratio
Saprolite	D ₆₆₀ : goethite and garnierite D ₂₁₂₀ , D ₂₃₁₀ : serpentine
Bedrock (ultra-mafic Mg-rich)	D ₁₂₀₀ : ferrous ion D ₂₁₂₀ , D ₂₃₁₀ : serpentine

Table 2 : Identification of spectral absorptions in function of the weathering profile of peridotite, where D_λ and W_λ are respectively the depth and the wavelength of the maximum of absorption around wavelength λ expressed in nanometers.

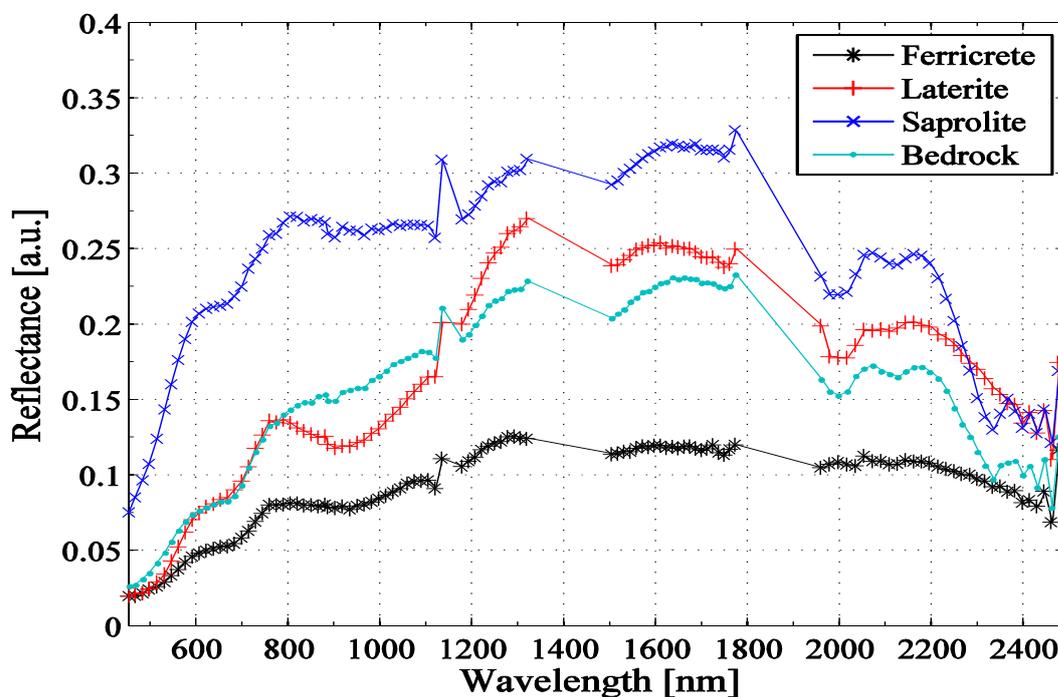


Figure 12: HyMap spectra of labeled pixels of different class of soil surface.

The HyMap features are then identified on the HyMap spectra from the homogeneous areas localized on the field. Figure 12 shows HyMap spectra of each class of soil. The absorptions around 660 nm, 900 nm, 2120 nm and 2310 nm are clearly visible on the spectra. From the 8 absorption features (depth and wavelength for each absorption), 5 were identified as useful for classification with a sequential forward selection algorithm: D_{660} , D_{900} , W_{900} , D_{2120} and D_{2310} .

4.3. Feature extraction

The depth and the wavelength of the maximum of absorption are estimated processing the reflectance with a two step operation. As explained previously, the background is responsible for the convex hull over which a particular abundance of a mineral may show absorptions. Therefore, the first step consists in removing the influence of the continuum. The continuum is considered locally, that is to say in a range of wavelength around the absorption, to be the line between the shoulders of the absorption figure. The continuum is removed dividing the reflectance values by the corresponding reflectance value of the continuum (Kokaly and Clark, 1999; Cudahy et al., 2008). To enhance the localization of the maximum of absorption, the continuum removed reflectance is fitted with a 4th order polynomial. The estimate of the depth of absorption $A(\lambda)$ is calculated with equation (2) (Kokaly and Clark, 1999), $CR(\lambda)$ being the continuum removed reflectance. The local maximum value of $A(\lambda)$ and the corresponding wavelength value are extracted for each of the absorptions identified previously.

$$A(\lambda) = 1 - CR(\lambda) \quad (2)$$

4.5. Classification for regolith mapping

The regolith mapping task we are addressing is a supervised and multi-class classification problem. The number of labeled pixels of bare soil is quite small (51 pixels/class for the smallest class), which excludes some classification algorithms that need an important volume of training data, like Neural Networks for example. To address this problem, we chose to apply a Support Vector Machine (SVM) classifier. Recently, SVM classification has shown very good results in hyperspectral classification tasks (Melgani and Bruzzone, 2004; Camps-Valls and Bruzzone, 2005), as it is dealing well and fast with high dimensional input feature space and non-linear classification problems, training with a small number of data. Support vector machine is a kernel-based method to find the optimal decision hyperplane by mapping data from the input feature space to a higher dimensionality, before solving the problem linearly into that space. It is an elegant way of solving a non-linear problem in the original input space. In the SVM algorithm, the optimal hyperplane is the one minimizing the error of classification and maximizing the distance between the closest vector to the hyperplane. Considering a set of training vectors belonging to two classes, $D = \{(x^1, y_1), \dots, (x^l, y_l)\} \in \mathbb{R}^n \times \{-1; 1\}$, the formulation of the choice of the optimal hyperplane between the two classes is:

$$\operatorname{argmin}_{\alpha} \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \sum_{k=1}^l \alpha_k \right), \quad (3)$$

with constraints $0 \leq \alpha_i \leq C$ and $\sum_{j=1}^l y_j \alpha_j = 0$

where α_i are the Lagrange coefficients to be found, K is the kernel function and C is a regularization parameter. The hard classifier implementing the optimal hyperplane is then defined by equation (4), where b is the bias

$$\operatorname{class}(\mathbf{x}) = \operatorname{sgn} \left(\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b \right) \quad (4)$$

$$\text{with } K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = e^{-\gamma \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2^2} \quad (5)$$

The kernel function used in this experiment is a Gaussian radial basis function defined by equation (5). The labeled datasets being too small for a tuning, C and γ parameters were set to 1 and $1/d_x$ with d_x the input dimension. The SVMs were computed with R language using e1071 library, the R implementation of LIBSVM (Chang and Lin, 2011).

The extension of the SVM classifier to the multi-class problem is made with a one-against-one classification for each pair of class. The decision is made with a voting strategy, each pairwise classification result counting for a vote (Fauvel et al., 2006). For details on the SVM algorithm, one can refer to (Chang and Lin, 2011).

The classes are considered to have an equiprobability of appearance as we have no a priori information at that stage. In a further implementation, we can imagine to have an a priori depending on a spatial surrounding or geomorphological characteristics. Therefore, the equi-



distributed training dataset between classes is built up with 40 pixels/class randomly extracted from the reference areas mentioned in section 3. A 10-fold cross-validation procedure is applied on this training dataset to evaluate the overtraining of the classifier. The rest of the labeled dataset is classified to have a generalization evaluation of the classifier.

The classifier is evaluated thanks to the confusion matrix displaying the confusion counts between classes. In this matrix the columns are representing the label of the pixels considered, and the lines the classes attributed by the classifier. The training, validation and test accuracies are given by the sum of the correct classifications over the number of elements of each dataset. The experiment is repeated 10 times (with five independent training datasets) over which the accuracies are averaged.

5. Results

This methodology gives two kinds of results: qualitative mineral maps that are directly given by the feature extracted, and classification maps of the regolith of bare soils. The following section presents results on both products.

5.1. Mineral maps

Once georeferenced, the extracted features can be considered as qualitative mineral maps, either measuring the abundance or the composition. The two main mineral maps produced with the HyMap data considered here are the iron oxides abundance represented by D_{900} and the serpentine abundance represented by D_{2310} .

Figure 13 shows the D_{900} feature of bare soil areas, mapped on the true color image of Fantoche plateau. It shows a good correspondance to field reality with a graduated abundance of the iron oxihydroxide from the bedrock to the red laterite. However there is an exception for ferricrete (yellow-turquoise areas in Figure 13) that shows a smaller value of D_{900} though the abundance of iron oxides is greater than in red laterite. It could be explained by the patine characteristic of this kind of soil that reduces a lot the light reflection and therefore the absorption depth.

Figure 14 shows the D_{2310} feature of bare soil areas. The correspondance with the abundance of serpentine is very realistic. On the ferricrete and lateritic areas, where the serpentine abundance is low, the map shows a low absorption depth (blue areas of Figure 14). On saprolitic and bedrock areas, where the serpentine is more concentrated, the absorption depth is much more important (in red).

These mineral maps could be of much use for a geologist as it is showing some geological structure at the scale of a massif. Figure 13 shows the limits between the ferricrete plateau and the laterite. Figure 14 shows the boundaries between the serpentine sole lying under the peridotite top.

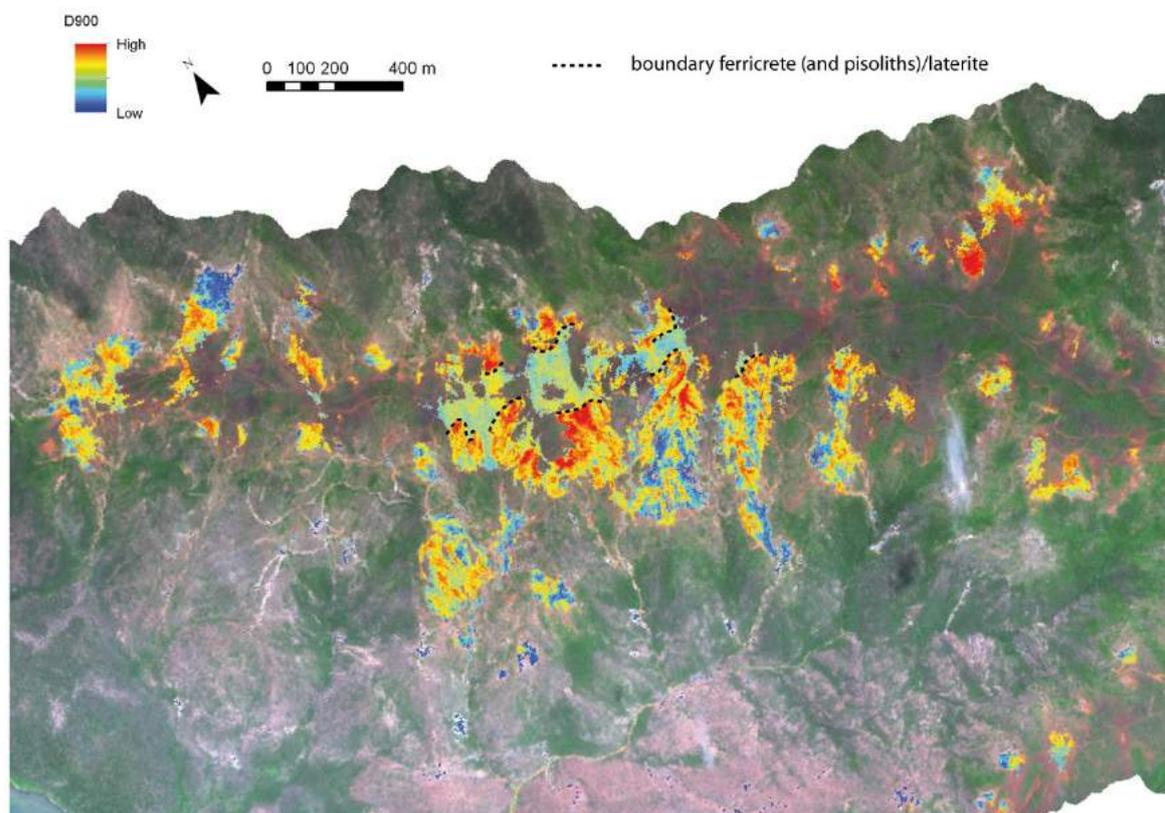


Figure 13: Qualitative map of the abundance in iron oxides based on D_{900} feature. This features shows clearly the boundaries between ferricrete and laterite.

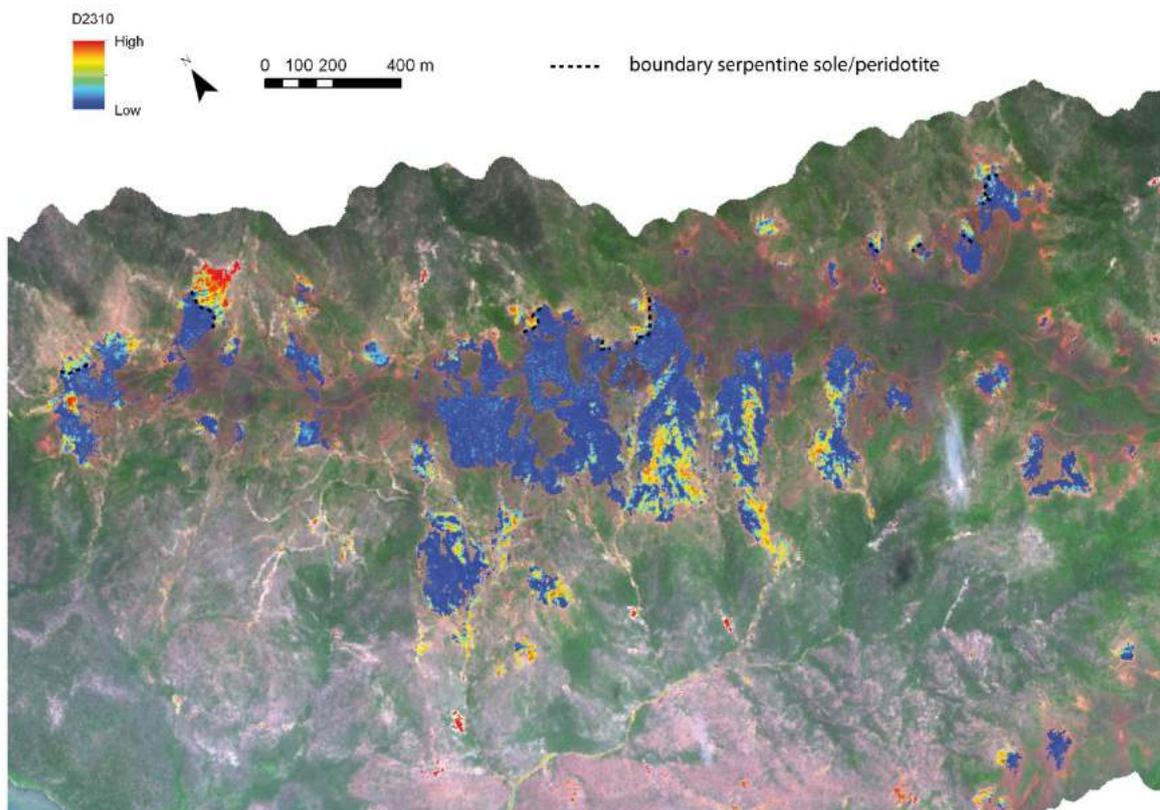


Figure 14: Qualitative map of the abundance of serpentine based on D_{2310} feature. This features shows clearly the boundaries between The serpentine sole and the peridotites.

5.2. Regolith maps

The regolith mapping is done at two different scale of alteration classification. A first mapping of regolith was realized with 4 classes of regolith, which are by order of decreasing weathering: ferricrete, laterite, saprolite, bedrock. These classes are equivalent to the classes used by the SGNC to map the New Caledonian regolith. A second classification map, corresponding more to the mining exploration mapping necessity, was realised with 6 classes: ferricrete, pisolith, red laterite, yellow laterite, saprolite, bedrock.

The results shown in Table 3 give accuracies of 87%, 83% and 83% for the classification of the training and validation datasets, and the class average accuracies of the test dataset, i.e. the rest of the labeled data. The proximity of these rates is significative of a good generalization of the results.

Table 4 presents the accuracies by class for the generalization test classification. It shows a much better recognition for ferricrete, laterite and bedrock than for saprolite. Considering the confusion matrix of a particular experiment one can see that the confusions are coherent (between classes connected on the weathering profile), except for bedrock that is confused several times with ferricrete. The bedrock confusions with ferricrete are explainable by the wrong georeferencing of the Hymap image that shifts part of the bedrock reference area over an area of ferricrete. The other confusions can be explained as well by the georeferencing problem as well as by some possible error of the model and possible errors in the labelization of the data due to the coarse resolution of such an operation. It is still interesting to notice that the errors in saprolite classification is mainly due to a

confusion with bedrock, and the errors in laterite classification is mainly explained confusions with ferricrete. It confirms a good distinction between laterite and saprolite. The overall average accuracy of the rest of the labeled data is 89%, which takes into account the predominance of ferricrete in the area that is very well recognized. In particular one can notice precise limits between laterite and saprolite that we found corresponding exactly to reality on field. This result shows the potential of such a technology as a helping tool for regolith mapping.

A second classification was computed with 6 classes of regolith corresponding more to the mining prospection expectations. In particular, two kinds of laterite, yellow laterite (also called fine saprolite) and red laterite, as well as two kinds of ferricrete (pisolith and ferricrete) are considered. Yellow and red laterites are difficult to distinguish visually even for an experimented geologist, but there mineralogy, especially there goethite/hematite ratio, are different. Table 3 summarizes the average accuracies, showing about 10% decrease comparing to the 4 class recognition. This classifier leads to about 75% accuracy, still with a good generalization. This reduction of the classification rate is mainly due to the difficulty to distinguish the laterites, as well as between the ferricrete classes, as shown by Table 4. However the rates by class are still well equilibrated between classes, with accuracies over 70% which is already very good score for a 6 class classification. The confusion matrix of the experiments reveals confusion explanations similar to the 4-class classification, with confusions mainly between classes connected on the weathering profile.

Figure 15 shows the 6-class regolith map. Knowing the topology of the area, one can easily see that the map corresponds well to ground reality, with pisolith and elements of ferricrete on top of the plateau, and respectively red laterite, yellow laterite, saprolite and bedrock going down the incisions. In these incisions, the map is exactly following the weathering profile that is expected to be seen.

	Training	Validation	Class average test	Global average test
4 classes	87 %	83 %	83 %	88 %
6 classes	78 %	74 %	76 %	71 %

Table 3: Classification accuracies for a 4-class and a 6-class SVM classifier of the regolith. Training and validation are the results of the cross-validation operation on the training dataset. Test average accuracies are the results of the of classification of the rest of the labeled data.

4 classes	Ferricrete		Laterite		Saprolite	Bedrock
	93 %		87 %		71 %	84 %
6 classes	Ferricrete	Pisolith	Red	Yellow	Saprolite	Bedrock
	77 %	70 %	75 %	77 %	70 %	83 %

Table 4: Average accuracies relative to each class of the test dataset.

	Ferricrete	Laterite	Saprolite	Bedrock
Ferricrete	1881	24	16	4
Laterite	107	206	28	0
Saprolite	5	7	348	3
Bedrock	1	3	115	39



Table 5: Confusion matrix (in number of pixels) of the test dataset classification for a 4-class experiment. The columns represent the labeled data, the lines represent the result of the classification.

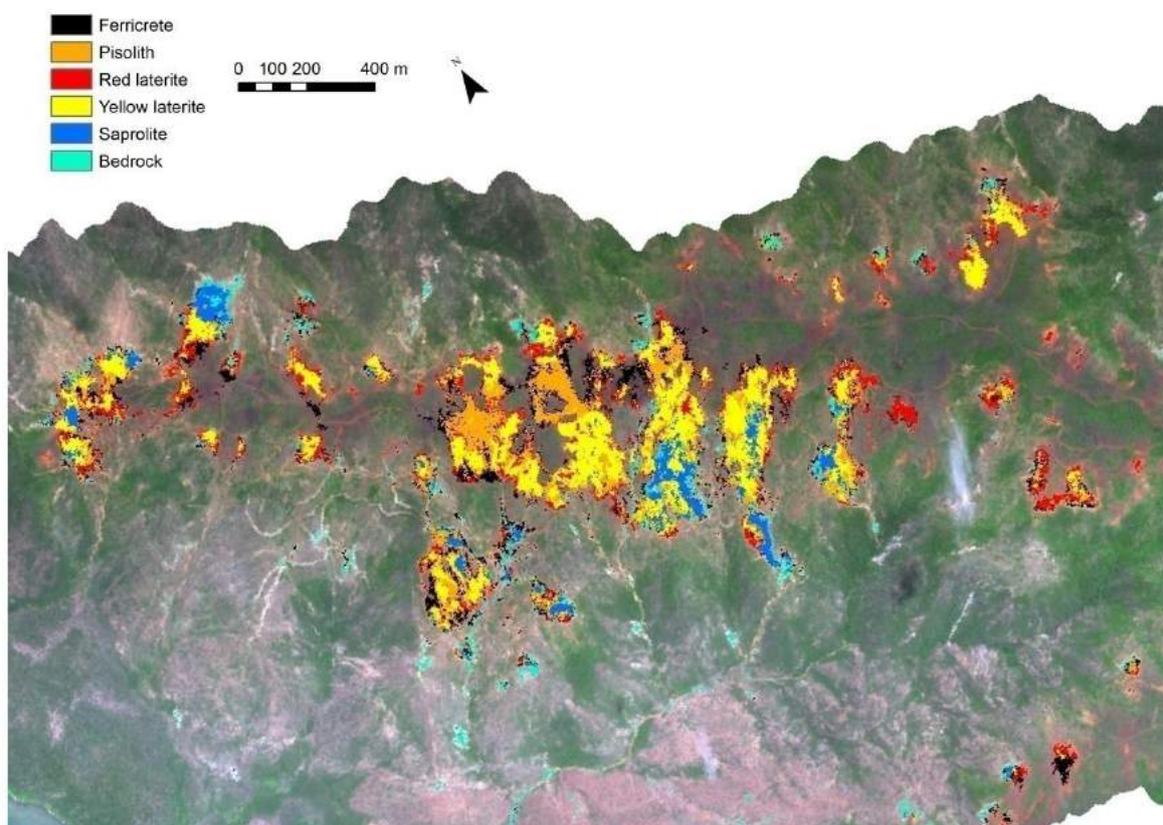


Figure 15: Regolith map of bare soils of Fantoche plateau made with a 6-class SVM classifier

6. Conclusion

In the economic context of New Caledonia, in which the mining exploration and the resource management is of particular importance, the mineral and regolith maps are of great interest. The results of treatments of the first airborne hyperspectral images over New Caledonia acquired in 2010 produce that kind of map at the scale of a massif with a resolution of 3.5m. A spectral library was built up from field measurement during the same period. Based on these data, a methodology to map the abundance and composition of minerals in a qualitative way, as well as the different classes of bare soil surface was developed.

The spectral analysis of field and HyMap spectra showed 4 absorptions around 660 nm, 900 nm, 2120 nm and 2310 nm, identifiable respectively to iron oxides for the two first absorptions and serpentines for the others. Extracting the depth D_{900} and the wavelength W_{900} of the maximum of absorption around 900 nm we were able to produce the maps of iron oxide abundance and goethite/hematite ratio. The serpentinization map was produced thanks to the depth D_{2310} of maximum of absorption around 2310 nm.

Five spectral features, D_{660} , D_{900} , D_{2120} and D_{2310} , were selected as input variables in an SVM classifier. The classifier was trained and tested on several homogeneous areas labeled on the field with the regolith classes usually used by geologist. The classification with four

classes of regolith – ferricrete, laterite, saprolite and bedrock – showed an 83% of accuracy. The classification with seven classes of regolith – ferricrete, pisolith, yellow laterite, red laterite, saprolite and bedrock – gave a 75% of accuracy. In both approaches, the confusion matrices show that the misclassifications arise mostly between classes connected on the weathering profile. Most of these errors can be attributed to some localized object with a class different from the rest of the area. Finally, regolith classification maps of the whole flightline, with either four or seven classes, show some results in total coherence with what has been observed on the field by geologists.

Future work will be focused on mapping the regolith of soils with a vegetation cover, as well as the plant communities, integrating into the model the relations between vegetation, soil and geomorphology.

Acknowledgement

References

- Avias, J., 1967. Overthrust structure of the main ultrabasic new caledonian massives. *Tectonophysics* 4, 531–541.
- Avias, J., 1969. Note sur les facteurs contrôlant la genèse et la destruction des gîtes de nickel de la Nouvelle-Calédonie. Importance des facteurs hydrologiques et hydrogéologiques. *CR Acad. Sci.* 268, 244–246.
- Berk, A., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Bernstein, L.S., Muratov, L., Lee, J., Fox, M.J., Adler-Golden, S.M., Chetwynd, J.H., Hoke, M.L., Lockwood, R.B., Cooley, T.W., Gardner, J.A., 2005. MODTRAN5: a reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering options 88–95.
- Berk, A., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Bernstein, L.S., Muratov, L., Lee, J., Fox, M.J., Adler-Golden, S.M., Chetwynd, J.H., Hoke, M.L., Lockwood, R.B., Gardner, J.A., Cooley, T.W., Borel, C.C., Lewis, P.E., Shettle, E.P., 2006. MODTRAN5: 2006 update, in: *Proceedings of SPIE*. SPIE, pp. 508–515.
- Camps-Valls, G., Bruzzone, L., 2005. Kernel-based methods for hyperspectral image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43, 1351 – 1362.
- Chang, C.-C., Lin, C.-J., 2011. LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.* 2, 27:1–27:27.
- Chevillotte, V., Chardon, D., Beauvais, A., Maurizot, P., Colin, F., 2006. Long-term tropical morphogenesis of New Caledonia (Southwest Pacific): Importance of positive epeirogeny and climate change. *Geomorphology* 81, 361–375.
- Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., Vergo, N., 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research* 95, 12653.
- Cluzel, D., Aitchison, J.C., Picard, C., 2001. Tectonic accretion and underplating of mafic terranes in the Late Eocene intraoceanic fore-arc of New Caledonia (Southwest Pacific): geodynamic implications. *Tectonophysics* 340, 23–59.
- Cluzel, D., Chiron, D., Courme, M.-D., 1998. Discordance de l'Éocène supérieur et événements pré-obduction en Nouvelle-Calédonie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 327, 485–491.



- Cocks, T., Jenssen, R., Stewart, A., Wilson, I., Shields, T., 1998. The Hymaptm airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance. Presented at the 1st EARS Workshop on Imaging Spectroscopy.
- Cudahy, T., Jones, M., Thomas, M., Laukamp, C., Hewson, R., Rodger, A., Verrall, M., 2008. Next Generation Mineral Mapping: Queensland Airborne HyMap and Satellite ASTER Surveys 2006-2008 (CSIRO Exploration & Mining Report P2007 / 364).
- Fauvel, M., Chanussot, J., Benediktsson, J.A., 2006. Evaluation of Kernels for Multiclass Classification of Hyperspectral Remote Sensing Data, in: 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. Presented at the 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings, p. II.
- Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Mizuhiko, S., Ueda, K., Mauger, A.J., 2005. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment* 99, 159–172.
- Kokaly, R.F., Clark, R.N., 1999. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. *Remote Sensing of Environment* 67, 267–287.
- Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., Richardson, W., 1969. Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition, in: *Remote Sensing of Environment*, VI. Presented at the Remote Sensing of Environment, VI, p. 97.
- Kruse, F.A., 1996. Identification and mapping of minerals in drill core using hyperspectral image analysis of infrared reflectance spectra. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1623–1632.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., Huntington, J.F., 2003. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 1388 – 1400.
- Latham, M., 1986. Altération et pédogenèse sur roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie: genèse et évolution des accumulations de fer et de silice en relation avec la formation du modelé. IRD Editions.
- Martin, M., Newman, S., Aber, J., Congalton, R., 1998. Determining Forest Species Composition Using High Spectral Resolution Remote Sensing Data. *Remote Sensing of Environment* 65, 249–254.
- Melgani, F., Bruzzone, L., 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42, 1778 – 1790.
- Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E., Mayr, T.R., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma* 162, 1–19.
- Papp, É., Cudahy, T., 2002. Hyperspectral Remote Sensing, in: *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*. CRC Leme.
- Rodger, A., 2011. SODA: A new method of in-scene atmospheric water vapor estimation and post-flight spectral recalibration for hyperspectral sensors Application to the HyMap sensor at two locations. *Remote Sensing of Environment* 115, 536–547.
- Trescases, J.-J., 1975. L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale : formation des gisements nickélicifères de Nouvelle-Calédonie, Mémoires ORSTOM. ORSTOM, Paris.

IV. L'expertise géologique orientée modélisation de l'érosion.

Parallèlement aux actions de terrain, la contribution du volet Géosciences du PPME portait, d'une part, sur l'interprétation des données acquises par les partenaires et leur mise en forme pour intégration dans la base de données interopérable (*cf.* Volet Informatique partie B : « Système d'information inter opérable »), et d'autre part, sur l'expertise thématique intégrée dans le volet modélisation de l'érosion. Pour cette dernière phase (modélisation et intégration des données), les équipes de géologie et d'informatique du PPME devaient se rapprocher de Bluecham SAS, afin de développer les algorithmes souhaitables dans le cadre d'une convention signée par l'UNC et la société innovante, lauréate du concours OSEO 2007. Ce travail devait être également conduit avec l'UMR Espace-DEV de l'IRD.

IV.1. La collaboration avec l'UMR Espace-DEV de l'IRD en matière de modélisation de l'érosion.

Cette collaboration s'est exprimée sous la forme de l'application d'un modèle de spatialisation et de quantification de l'érosion hydrique des sols (USLE/RUSLE - *Revisited Universal Soil Loss Equation*) à partir des données compilées sur la zone. Ce modèle a fait l'objet de développements au cas de la Nouvelle-Calédonie publiés par Pascal Dumas et al. (*cf.* paragraphe suivant). Le travail partenarial a été mené dans le cadre d'un stage réalisé en 2013 au sein de l'UMR Espace-Dev 228 par Julia Leverman et il sera présenté par le détail dans le chapitre 4 correspondant à la contribution de ce partenaire du consortium. Le stage a été co-encadré par Marc Despinoy, Morgan Mangeas, Florian De Boissieu (*cf.* paragraphe I.8.1. réallocation des moyens attribués à l'IRD) et Pascal Dumas. Son objet était orienté vers l'élaboration d'un indice d'apport sédimentaire et c'est dans le cadre de ce travail que le modèle USLE/RUSLE a été utilisé.

Bibliographie citée :

Dumas P., 2011 « Méthodologie de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa, Païta à Bouloupari (Nouvelle-Calédonie) », in Les Cahiers d'Outre-Mer, Vol 63, n°252, pp 567-584.

Dumas P., Printemps J., 2010. "Assessment of Soil Erosion Using USLE Model and GIS for Integrated Watershed and Coastal Zone Management in the South Pacific Islands". In Proceedings Interpraevent 2010, International Symposium in Pacific Rim. Taipei, Taiwan, pp 856-866.

Printemps J., Ausseil, A-G., Dumas P., Mangeas M., Dymond J.R. and Lille D, 2007. « An erosion model for monitoring the impact of mining in New Caledonia », in Proceedings International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07), New-Zealand, pp 2562-2568.

IV.2. La collaboration avec Buecham SAS en matière de modélisation de l'érosion.

Le jeu de données récoltées sur Poro a fait l'objet de traitements orientés modélisation de l'érosion à partir des algorithmes développés par cette société dans le cadre de ses activités de recherche développement menées en partenariat avec différents chercheurs de l'IRD et enseignants-chercheurs du PPME-EA 3325 de l'UNC. Les résultats produits par Bluecham SAS sont présentés ci-après sous la forme d'une contribution spécifique.

1.3 Modélisation de l'érosion

Rémi Andréoli (BLUECHAM)





L'espace au cœur de vos décisions

MODELISATION DE L'EROSION

Petit Bassin versant de Poro

Evenement pluvieux du 25 Décembre 2011

Version V 1

Du 23/11/2014

Fichier : template_proposition_2014.docx

Suivi du dossier : Rémi Andreoli / Bluecham SAS



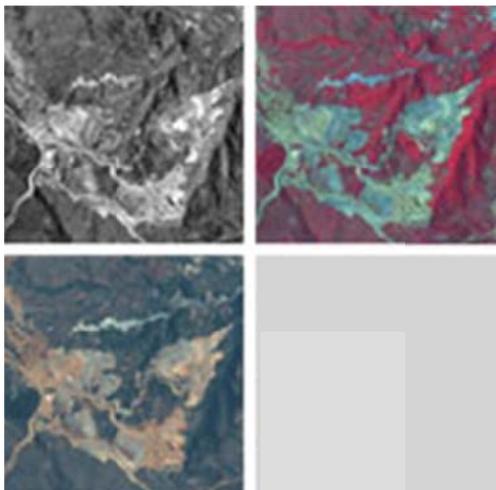
Bluecham SAS

101 Promenade Roger Laroque
BP A5
98848 Nouméa
Nouvelle-Calédonie
RIDET : 886 408.001

☎ (687) 28 97 96

✉ bluecham@bluecham.net

www.bluecham.net



1 PREPARATION DES PARAMETRES D'ENTREES DU MODELE 3

- 1.1 Paramètres topographiques..... 3**
 - 1.1.1 Le facteur L.S..... 3
 - 1.1.2 Estimation de la capacité de transport..... 5
- 1.2 Estimation du potentiel de perte en matière des sols (K) 5**
- 1.3 Estimation de l'intensité des précipitations..... 7**

2 MODELISATION 8

- 2.1 Estimation de la production sédimentaire..... 8**
- 2.2 Estimation du transport sédimentaire et du dépôt..... 10**

La modélisation de l'érosion à fine échelle sur le petit bassin versant de Poro lors de l'événement pluvieux du 25 décembre 2011 (dépression Ex-Fina) a été réalisée à partir du modèle hybride développé par Bluecham SAS en partenariat avec l'Université de la Nouvelle-Calédonie sur la base du modèle RUSLE.

Le modèle RUSLE est défini par :

$$A = R \times K \times C \times L \times S \times P$$

Avec :

A = perte en sol en t.ha⁻¹

R = Intensité des précipitations en MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹

K = Potentiel de perte en matière des sols en t.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹

C = facteur adimensionnel de la couverture végétale et des pratiques culturales.

L = Longueur de pente en m.

S = inclinaison de la pente en %

P = facteur adimensionnel de conservation des sols.

Le modèle intègre en outre la capacité de transport des sédiments permettant de modéliser la charge transportée et déposée. Ces modifications (arrachements et dépôts) sont ainsi pris en compte à chaque itération de la modélisation.

1 Préparation des paramètres d'entrées du modèle

1.1 Paramètres topographiques

1.1.1 Le facteur L.S

Les paramètres L et S sont des facteurs topographiques issus du modèle numérique de terrain. Le modèle numérique de terrain à 1 m a été utilisé ainsi que les bassins de sédimentation, les drains, les buses et les cassis afin de forcer le drainage dans les aménagements prévus (facteur P).

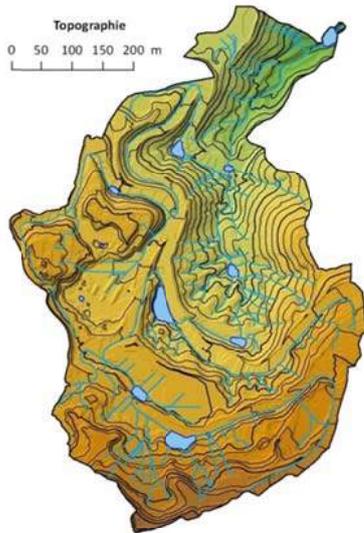
Le facteur LS est calculé selon la formule de Tarboton :

$$LS(r) = (m+1) [A(r)/a_0]^m [\sin b(r)/b_0]^n$$

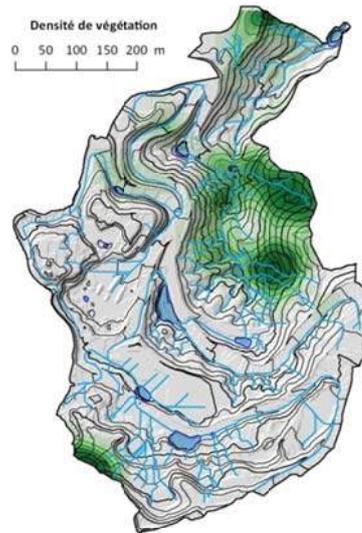
Afin de prendre en compte le couvert végétal (facteur C), la densité de couvert végétal a été estimée à partir d'une image Landsat-7 acquise le 26 décembre 2011 sur le secteur de Poro.

La densité de végétation (Dv) est intégrée au facteur LS afin d'obtenir LSC tel que :

$$LSC = LS(r) \times (1 - Dv)$$

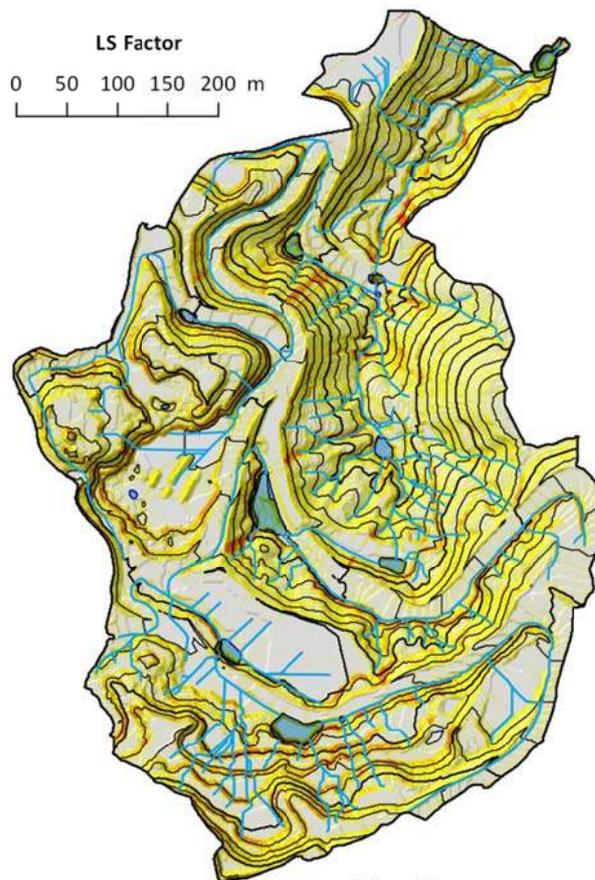


Légende
 — drainage Bassins de sédimentaiton



Légende
 — drainage Bassins de sédimentaiton
 Densité de végétation

0.060736	0.182207
0.091104	0.210239
0.121471	0.213599
0.151839	
0.000000	
0.030368	



Légende
 LS Factor 1 m

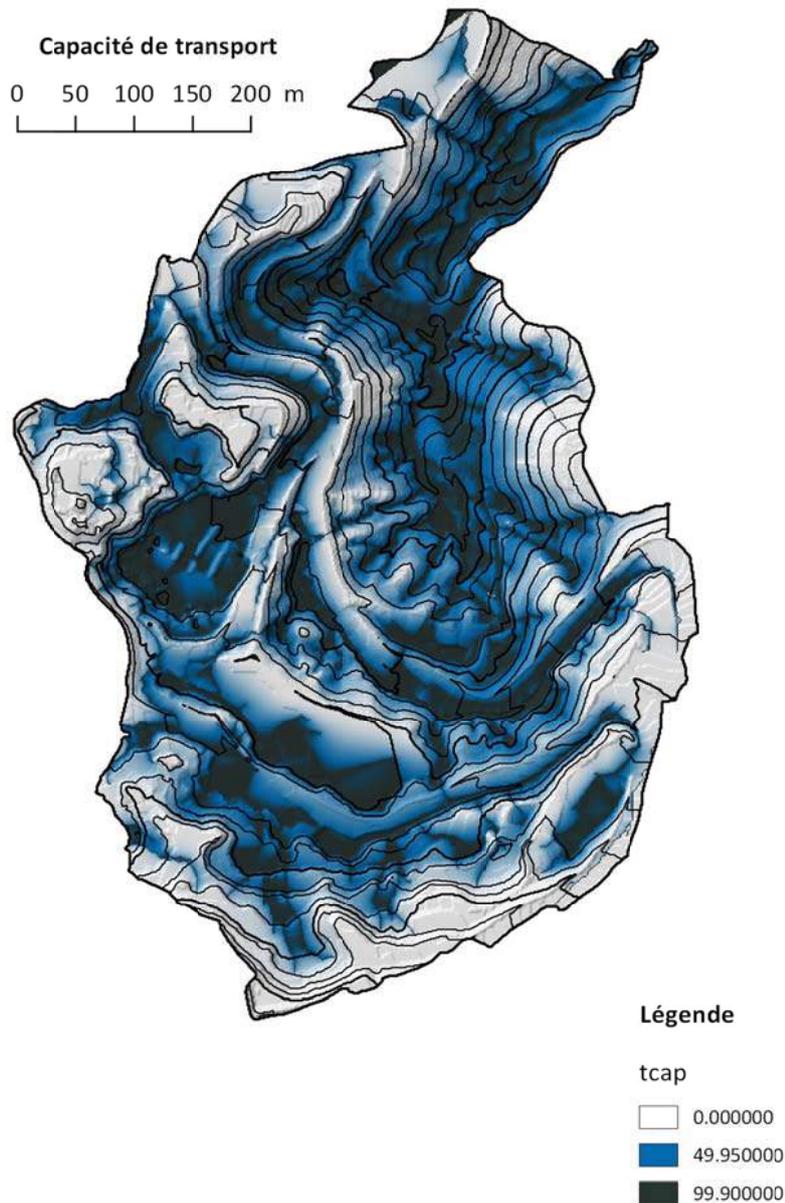
0.000000	40
10	80
20	100

— drainage
 Bassins de sédimentaiton

1.1.2 Estimation de la capacité de transport

L'estimation de la capacité de transport a été modélisée à partir de l'équation définie par Tarboton :

$$T_{cap} = \chi a^2 \tan(b)^2$$

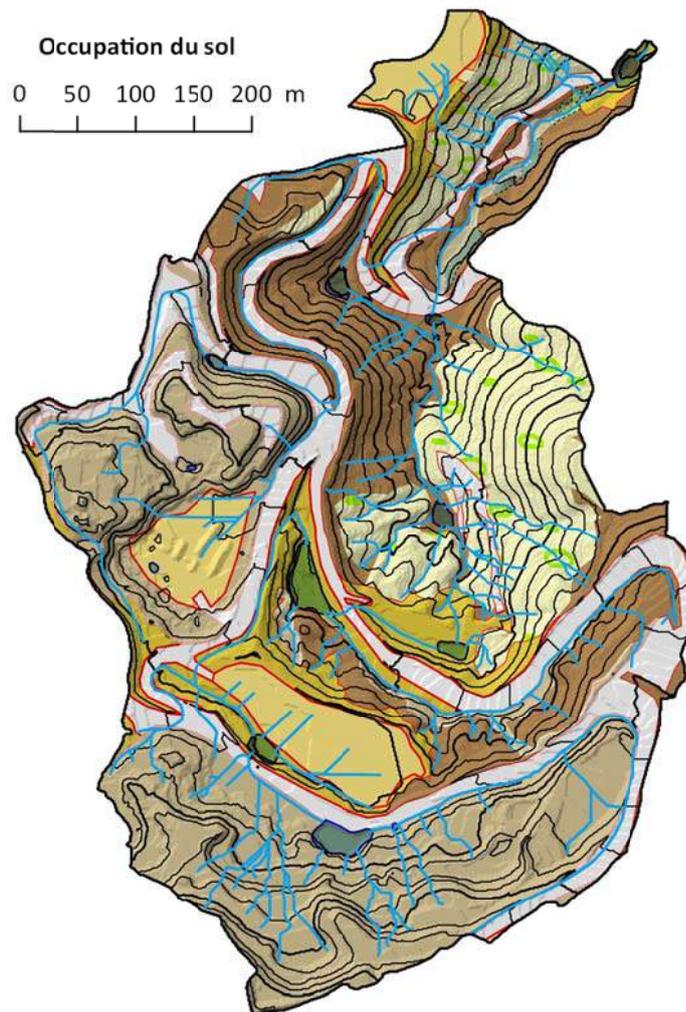


1.2 Estimation du potentiel de perte en matière des sols (K)

Le potentiel de perte en matière des sols dépend du type de substrat, de sa cohésion, de la taille des particules du sols, de la pédogénèse.

Sans expérimentations de terrain de mesure de perte en matière des sols par simulation de pluie ou par estimation selon la méthode de Wismeier & Smith (1978), des valeurs empiriques sont communément employées (Payet *et al.* 2011):

Type de sols présents sur le bassin versant de Fiherenana	Texture	Facteur K (t.ha.h/ha.MJ.mm)
Lithosols	Loam	0,0395
Sols ferrugineux tropicaux	Loamy sand	0,0057
Sols faiblement ferralitiques	Clay loam	0,0395
Vertisols	Clay	0,0289
Sols d'apport à minéraux brut	Sand	0,0026
Alluvions	Clay	0,0289



Légende

 drainage	 Plateforme	 Maquis dégradé sur grenaille
 Bassins de sédimentation	 Décharge	 Maquis dégradé
Occupation des sols	 Latérite, grenaille	 Maquis
 Piste	 Péridotite, saprolite	

A partir des données terrain réalisée lors de cette étude, le facteur K du bassin versant de Poro a été estimé lors de l'événement pluvieux de décembre 2011 : k atteint 0.0030 pour l'ensemble du bassin versant et 0.0018 pour le bassin versant amont uniquement.

Les paramètres empiriques du tableau précédent ont ainsi été ajustés afin d'être représentatifs de la perte en sol totale mesurée sur le bassin versant de Poro.

D'autre part, durant l'événement pluvieux, le facteur K évolue en fonction des arrachements, des dépôts liés à l'agressivité des pluies. Aussi, l'évolution des zones de dépôts et d'arrachement est prise en considération dans le facteur K par l'instruction de changement de "type" de sol.

1.3 Estimation de l'intensité des précipitations

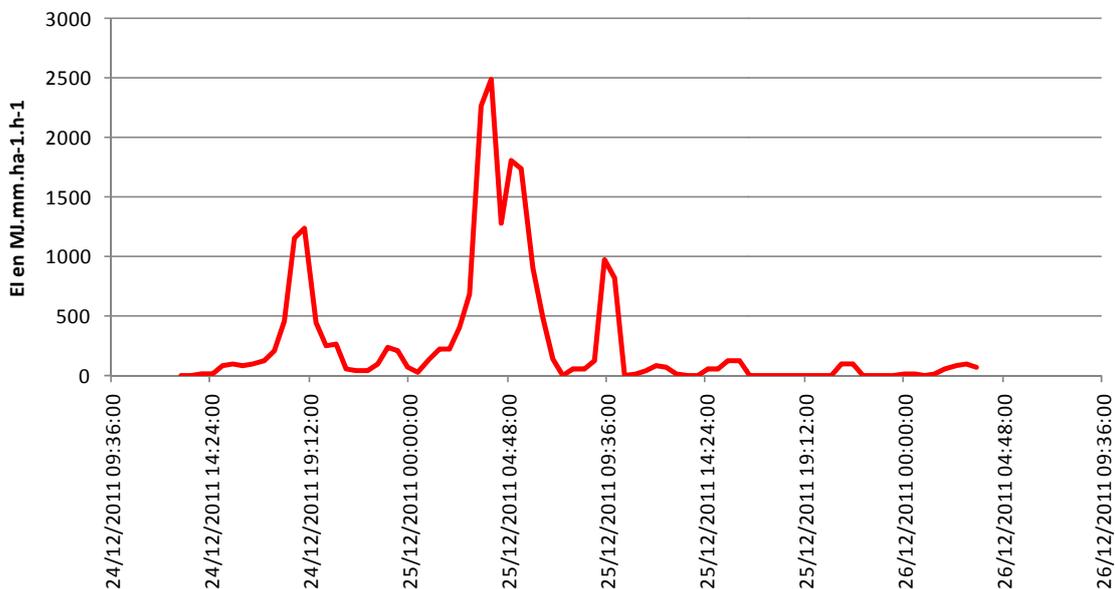
L'intensité des précipitations de l'événement a été calculée pour chaque heure en fonction de l'équation de Wismeier :

$$R = E_g \cdot I_{30mm} = \sum_i^n (E_u \cdot h_i) \cdot I_{30mm}$$

Avec $E_u = 210 + 89 \log I_h$

L'agressivité moyenne de l'événement pluvieux est de 272,4 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, avec un maximum atteint le 25/12/2011 à 04:00 à 2486,90 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.

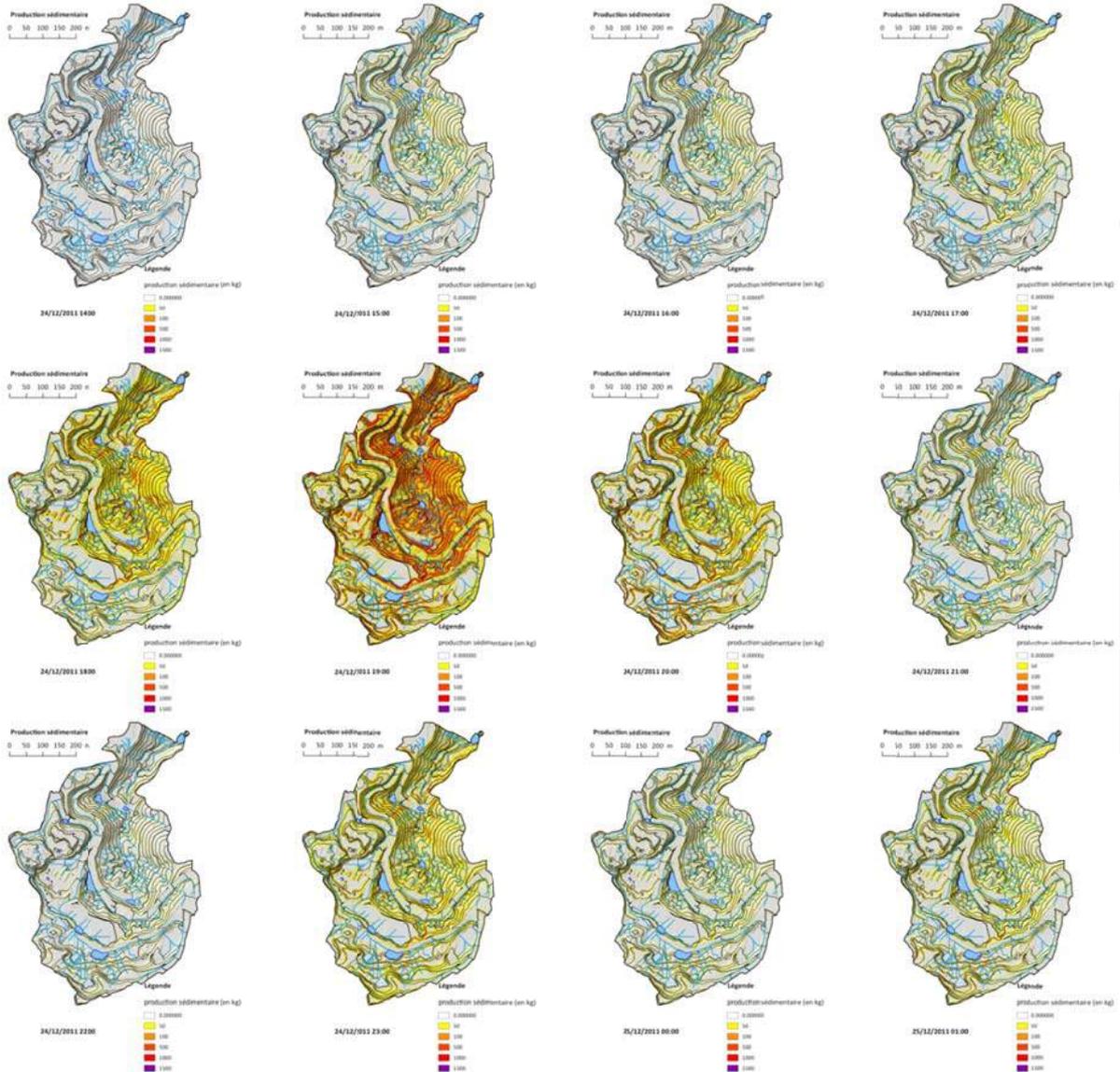
EI - Agressivité des pluies

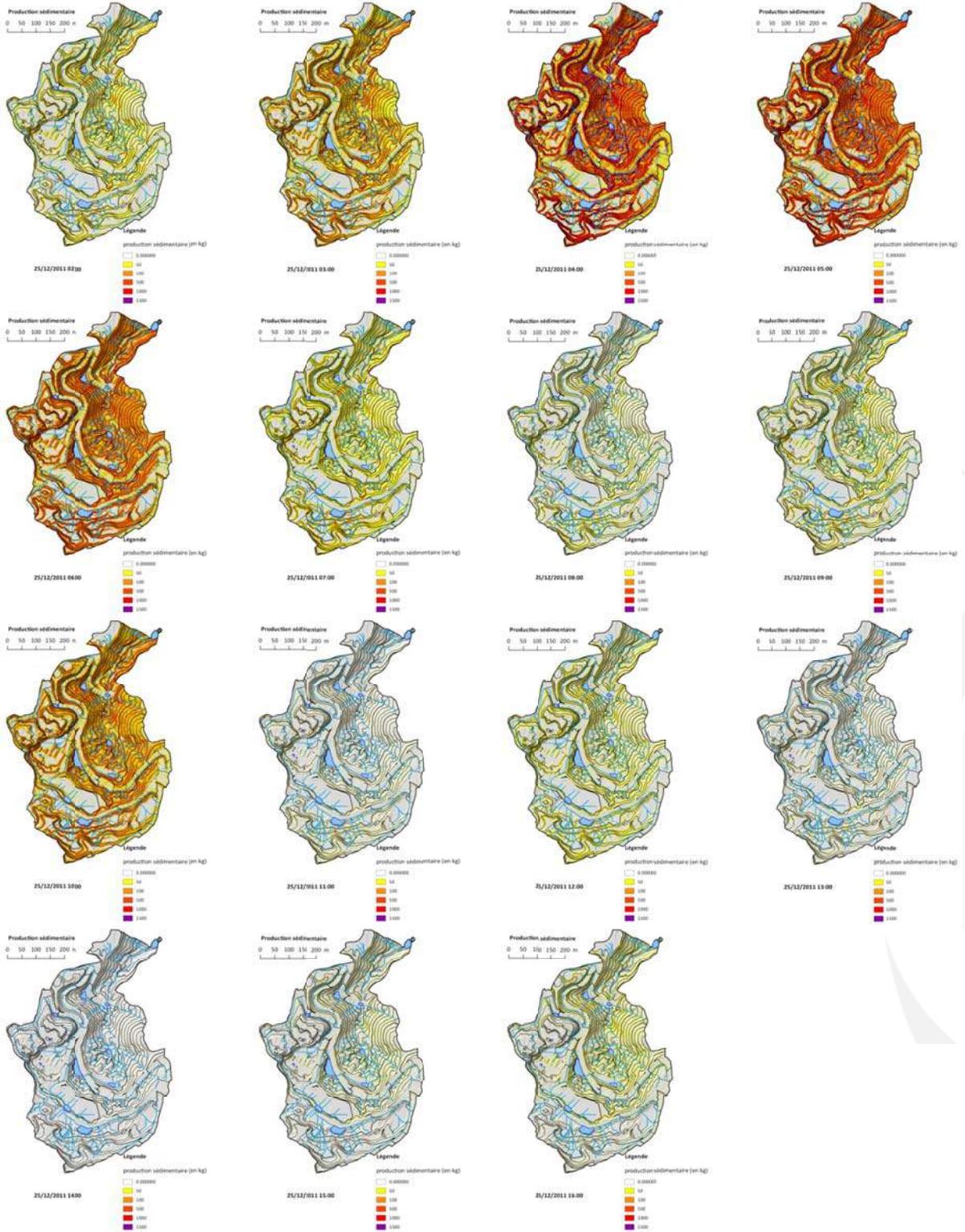


2 Modélisation

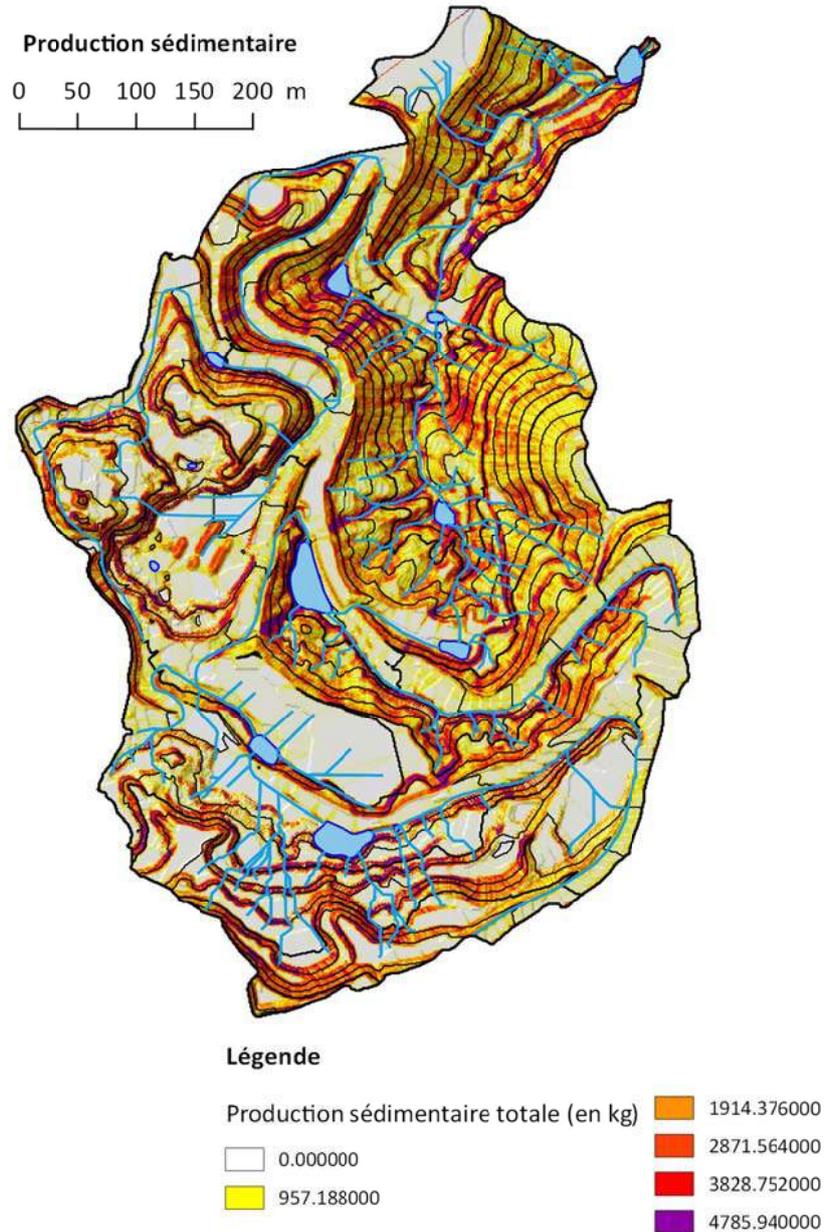
2.1 Estimation de la production sédimentaire

La production sédimentaire a été estimée pour l'ensemble du bassin versant pour chaque heure à partir du 24 décembre 2011 à 14:00 jusqu'au 25 décembre 2011 à 16 :





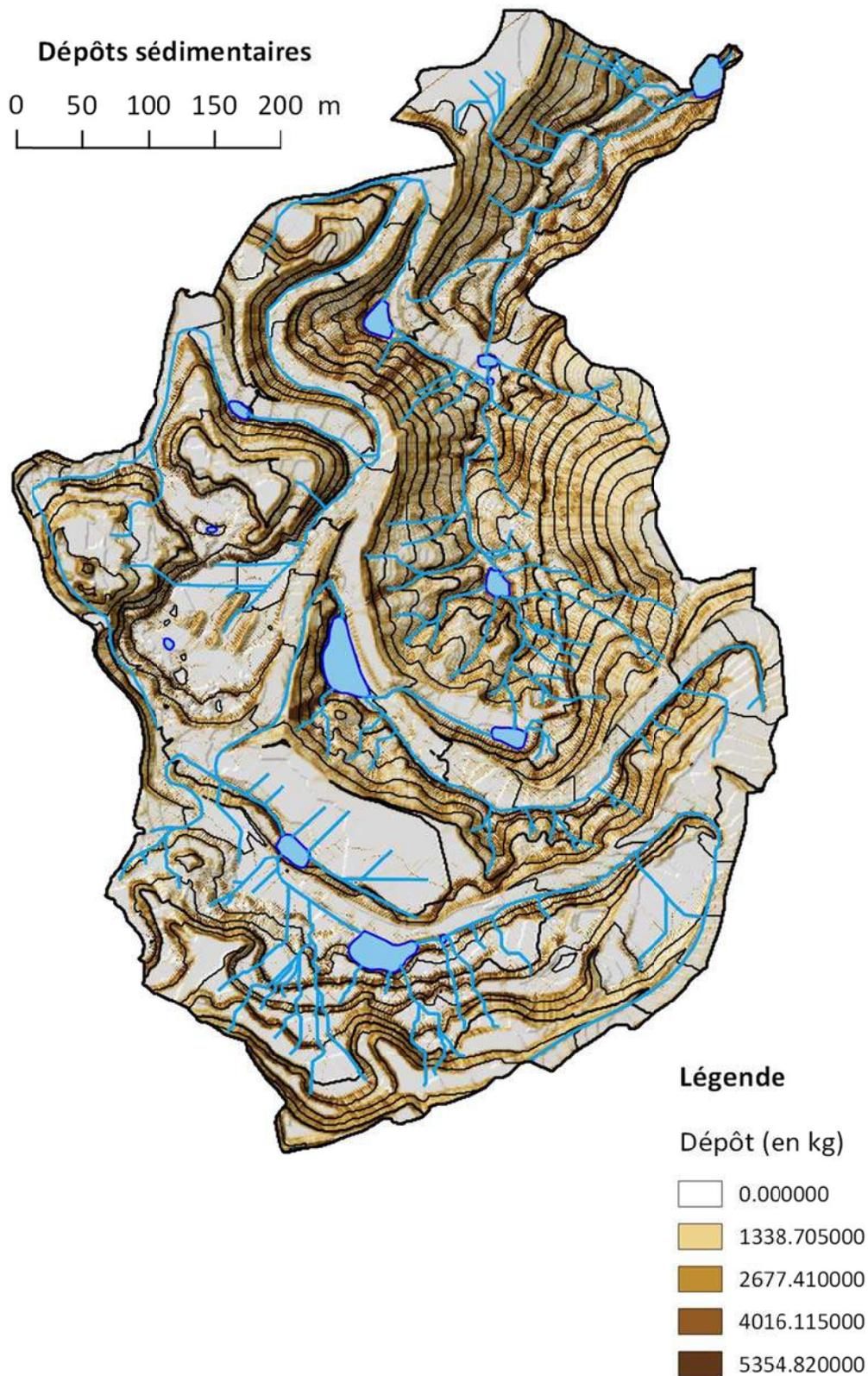
La production sédimentaire totale suite à cet événement est majoritairement localisée sur les secteurs en talus. l'ensemble du talweg aval apparaît plus sensible à l'érosion et ce, dès le début de l'événement.



2.2 Estimation du transport sédimentaire et du dépôt

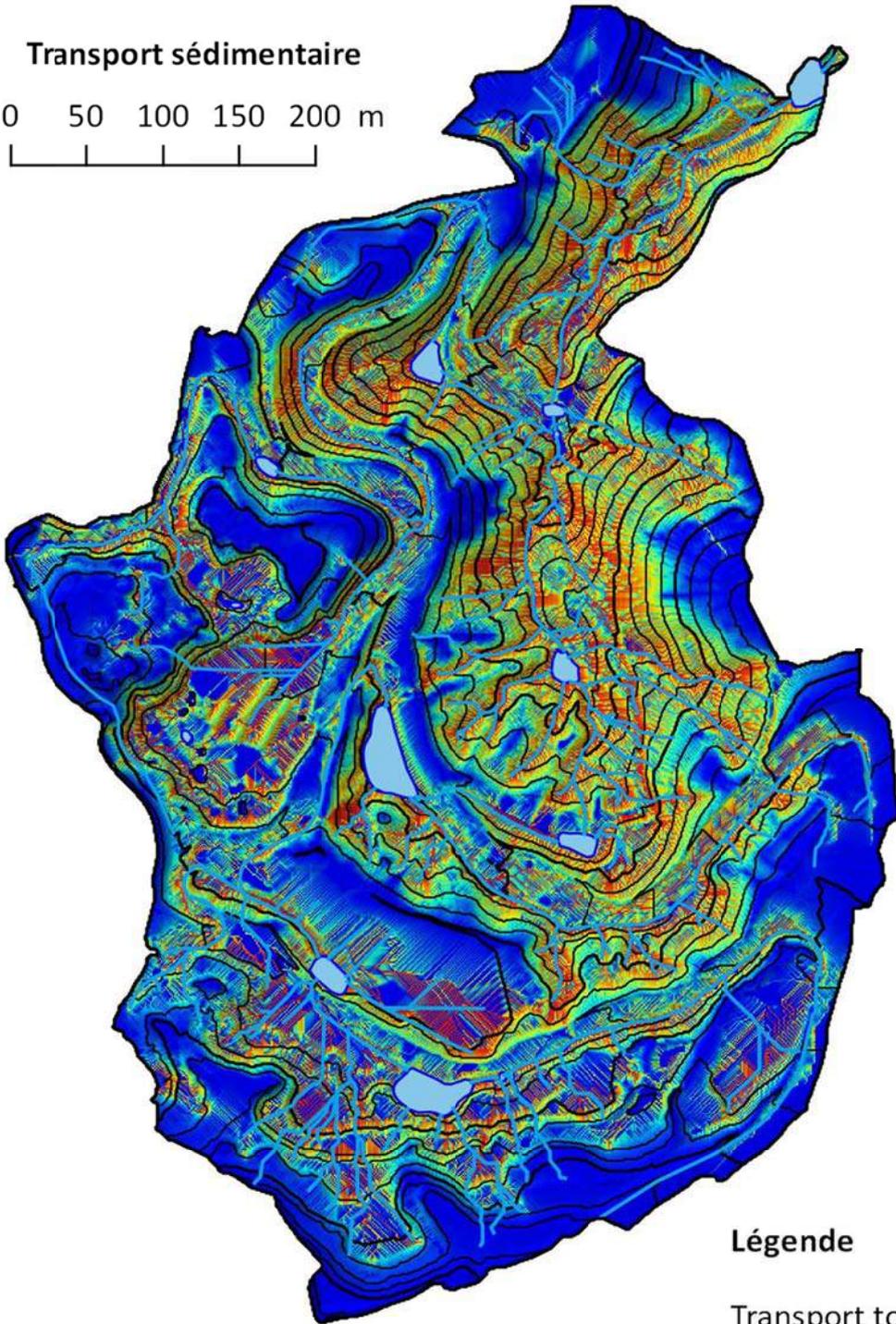
Le transport (T_{out}) et le dépôt de sédiments (D) sont estimés selon la formule de Tarboton :

$$T_{out} = \min\{S + \sum T_{in}, T_{cap}\} \quad D = S + \sum T_{in} - T_{out}$$



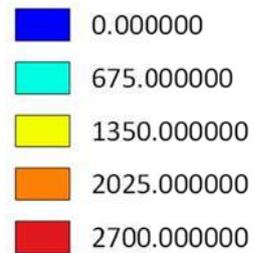
Transport sédimentaire

0 50 100 150 200 m



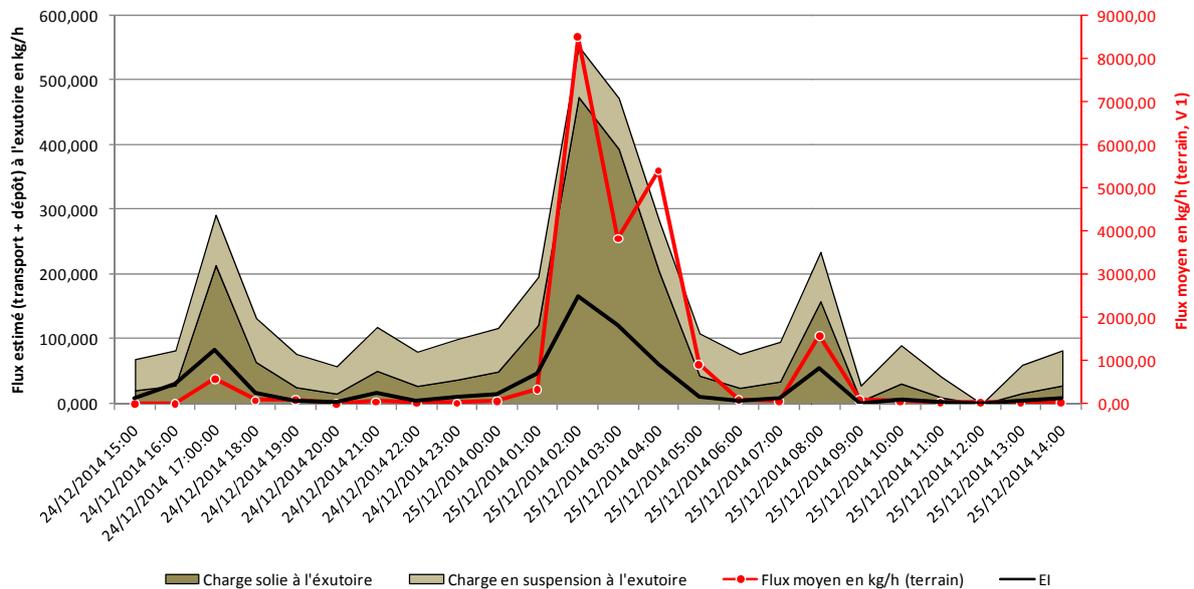
Légende

Transport total (en kg)

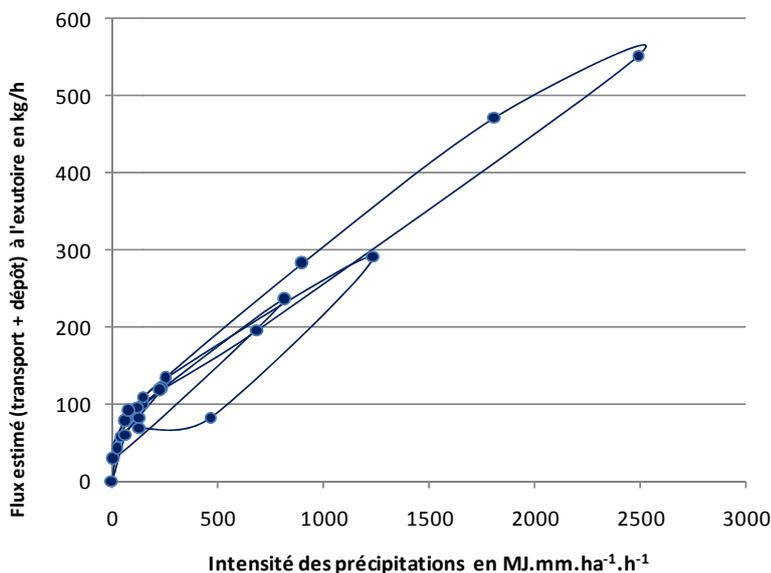
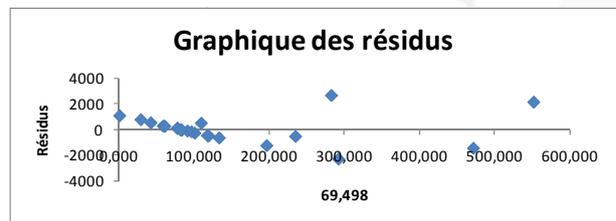
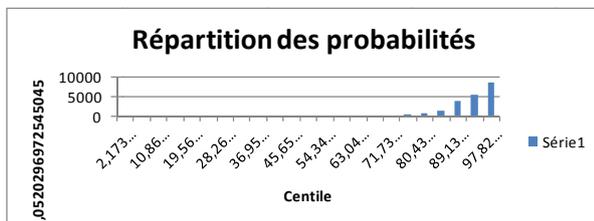


La confrontation des données de terrain et des estimations issues de la modélisation montrent que la modélisation sous-estime les quantités de sédiments mesurés à l'exutoire lors du maximum d'intensité.

Cependant, les flux de sédiments estimés par la modélisation (transportés et déposés à l'exutoire) apparaissent fortement corrélés avec les mesurés réalisées sur le terrain.

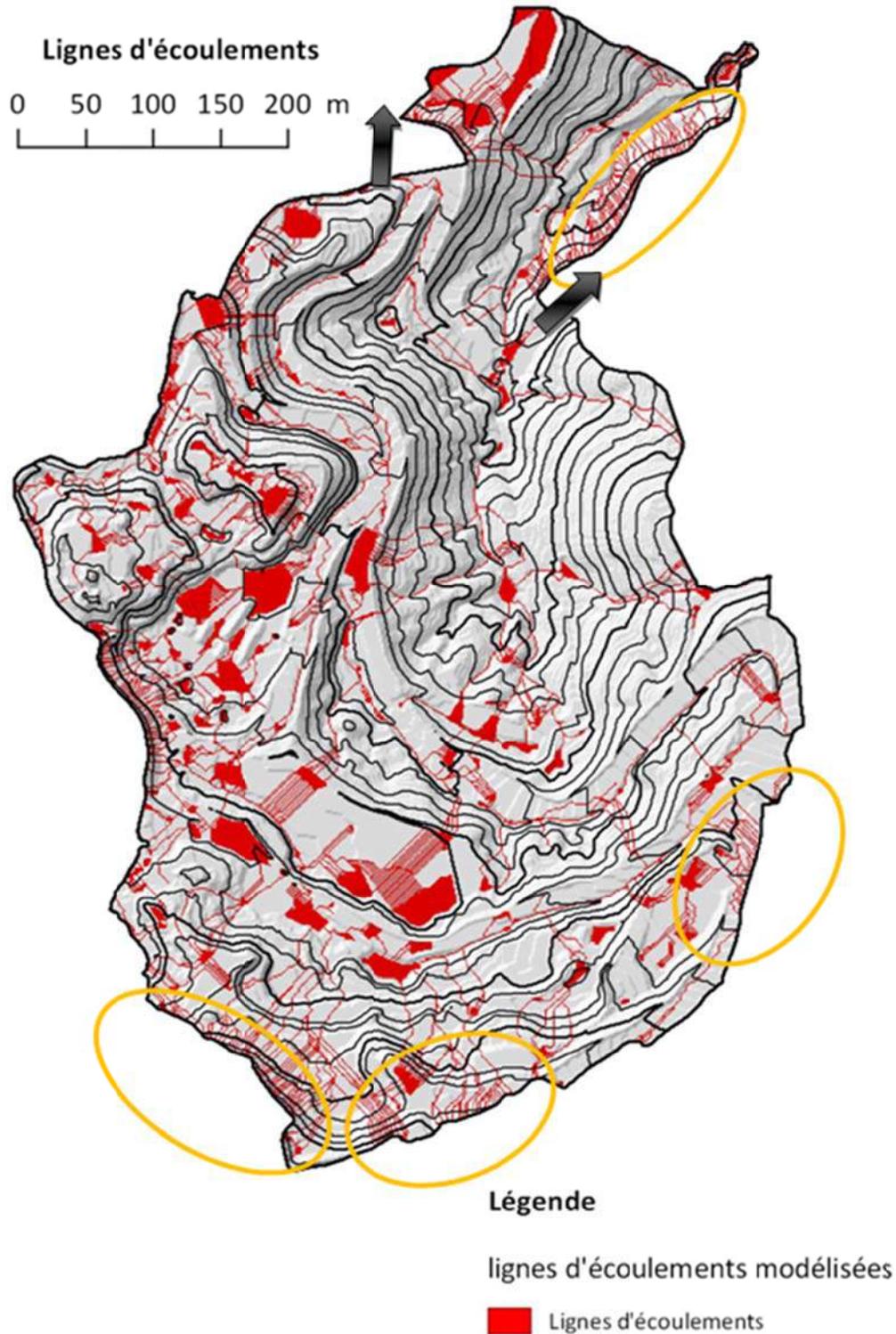


L'analyse de corrélation entre estimation et mesure terrain indique un fort coefficient de corrélation ($r = 0.87$) :



Nous observons sur les estimations issues de la modélisation un phénomène de boucle similaire à ceux observés sur le terrain entre les débits et la concentration en sédiment : après un pic d'intensité de précipitation, le flux de sédiment estimé reste plus élevé pour des intensités similaires lors de la diminution de l'intensité des précipitations que lorsque l'intensité des précipitations augmentent.

Enfin, nous observons des zones de pertes de flux vers l'extérieur de la zone (flèches noires) ainsi que des zones de pollution des flux provenant de zones en amont, hors secteur d'étude.



La prise en compte des pertes et des apports de ces secteurs permettrait d'améliorer les estimations réalisées dans le cadre de cette modélisation.

1.4 Caractérisation physico-chimique des matières en suspension

Cyrille Metayer & Michael Meyer (UNC)





Rapport de synthèse

Projet « **Fonctionnement des petits bassins versants miniers** »

Partie « **Caractérisation physicochimique des MES** »

Cyrille METAYER

Michaël MEYER

Novembre 2014

TABLE DES MATIERES

1	Introduction :	5
1.1	Etat de l'art	5
1.2	Objectif général de ce travail	6
2	Interactions entre particules	6
2.1	Les conditions de stabilité des particules en solution	6
2.1.1	Les forces de Van der Waals	6
2.1.2	Les forces électrostatiques	7
2.1.3	La théorie DLVO	8
2.2	Charge de surface des oxydes	9
3	Mécanismes d'agrégation et cinétique	9
3.1	Mécanismes d'agrégation	9
3.2	Cinétique d'agrégation	10
4	Vitesse de sédimentation	11
5	Matériel et méthodes :	12
5.1	Caractérisation des phases cristallines	13
5.2	Mesure de la charge de surface des particules	14
5.3	Caractérisation des agrégats par diffusion statique de la lumière	15
5.4	Détermination de la vitesse de sédimentation	15
5.5	Microscopie électronique	16
6	Résultats :	17
6.1	Résultats obtenus pour les échantillons prélevés le long du bassin versant	17
6.1.1	Phases minérales présentes dans les MES (DRX)	17
6.1.2	Taille des agrégats	19
6.2	Résultats obtenus pour les échantillons AM20, AM21 et sédiment	21
6.2.1	Caractérisation des phases minérales par diffraction de rayons X	21
6.2.2	Cliché de microscopie électronique	22
6.2.3	Caractérisation de la surface des particules par mesures de charge de surface.	23
6.3	Phénomènes d'agrégation et de sédimentation	29
6.3.1	Agrégation des particules	29
6.3.2	Vitesses de sédimentation	30
6.3.3	Evolution des vitesses en fonction de la conductivité	37
6.3.4	Conclusion de la partie caractérisation des phénomènes de sédimentation	39
7	Conclusion générale	39
8	Bibliographie	42

1 INTRODUCTION

1.1 Etat de l'art

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des matières en suspension dans les estuaires marins, les lacs ou les rivières dans le but de mesurer leurs impacts sur l'environnement. Ces MES sont susceptibles d'être vecteurs de polluants (métaux lourds, matière organique issus d'effluents industriels) ou d'influencer les écosystèmes (modification de la turbidité des milieux).

Ces études sont réalisées en effectuant, généralement, une caractérisation de ces matières en suspension en termes de composition chimique, de concentration et de distribution en taille de particules. On pourra citer en exemple, les études dans les estuaires marins [1,2,3] ou plus précisément dans le lagon calédonien où Jouan et col [4,5,6] se sont intéressés à leurs répartitions en fonction de la profondeur et de l'impact de leur agrégation à proximité de la barrière de corail. Toujours dans le but de mieux connaître ces MES, le long des rivières et bassins versants, d'autres études ont fait l'objet de plusieurs articles pour lesquels les mesures de tailles étaient corrélées avec leurs compositions chimiques. En exemple, on pourra citer les travaux de Ran et col [7], qui ont mesuré les classes de tailles de particules à l'échelle colloïdale ($<1 \mu\text{m}$) et la corrélation de ces paramètres avec les teneurs en Cu et Zn. Ou encore, l'étude de Montarges-Pelletier et col [8], qui ont pu montrer, au-delà des mesures de taille de MES effectuées, que les particules les plus fines étaient les plus enrichies en métaux lourds.

Le transport de matières en suspension (MES) le long des rivières et bassins versants est décrit par différents processus faisant intervenir les dynamiques d'agrégation et de sédimentation des particules fines. Les données obtenues au cours de ces travaux expérimentaux, sont utilisées pour modéliser la sédimentation des MES. Les modèles utilisés qui sont, soit de nature empirique [9,10], soit numérique [11], intègrent plusieurs paramètres expérimentaux dont la taille des particules. Ce dernier paramètre est étroitement lié aux mécanismes d'agglomération des particules fines, lorsque celles-ci ne restent pas à l'état colloïdal. Ils sont principalement induits par les conditions hydrodynamiques d'écoulement [12], la présence de matière organique [13], l'action de micro-organisme [14,15], ou encore l'augmentation de la force ionique du milieu [16].

Dans le cas où les conditions d'écoulement influencent la taille des agrégats, il a été possible de montrer que la contrainte de cisaillement appliquée à ces agrégats est un paramètre déterminant [17]. Des modèles empiriques, associant taille des MES et cisaillement au cours des écoulements permettent de calculer leurs vitesses de sédimentation [9].

A l'état naturel, le transport des particules minérales s'effectue dans un environnement qui contient des matières organiques tels que des acides humiques, polysaccharides en encore poly électrolytes naturels. Ces matières organiques influencent, d'une part la cohésion des agrégats et d'autre part la stabilité de ces agrégats (ou particules) vis-à-vis de leur floculation. Les matières organiques chargées dans l'eau vont pouvoir s'absorber à la surface des particules fines et limiter leur agrégation. Au contraire les polymères organiques ont tendance à former des ponts entre particules et favoriser la formation de structures mixtes organiques/minérales cohésives [13]. Ils ne provoquent pas, généralement, la décohéation d'agrégats et, dans le cas de matières organiques apolaires, leur nature (acide humique ou polysaccharides) influence leur taille et la stabilité des agglomérats formés [18]. Toujours dans les milieux naturels, des assemblages de matières en suspensions peuvent être induits par l'action des microorganismes présents dans le milieu. Il a été montré que des bactéries pouvaient s'associer à des MES en suspension, favoriser la formation d'agrégats et augmenter leur sédimentation [19]. Ces micro-organismes se lient au réseau des exopolymères du milieu et forment, comme dans le cas précédents, des structures

organiques/minérales qui ne subissent pas de décohésion au cours des phénomènes de transport et d'agrégation [14].

L'influence de la force ionique du milieu dans lequel évoluent les matières en suspension est étroitement liée à sa salinité. Dans les estuaires, ce paramètre augmente de façon importante de l'embouchure des rivières vers les zones hauturières ce qui accélère généralement la sédimentation des MES seules ou agrégées. Les particules fines qui les constituent, sont de nature minérale (oxyde métalliques, argiles etc) et généralement chargées en surface dans l'eau. Ces charges induisent des interactions répulsives entre particules qui sont susceptibles d'être écartées par la présence de sel dans le milieu. Ce paramètre d'interaction inter-particulaire est aussi pris en compte pour l'étude de phénomènes de séparation au cours des procédés d'extraction métallurgique ou encore pour favoriser la floculation de MES dans les dispositifs de décantation. Dans ce dernier cas, sont utilisés des flocculant de type sels minéraux, qui augmente la salinité du milieu en atténuent les répulsions électrostatiques entre particules, ou de type organique, qui s'adsorbe sur leurs surfaces et les rendent hydrophobes. Cela a été étudié, par exemple, par Dihang et col [20] qui ont montré que des polymères de types polyacrylamides cationiques étaient susceptibles de flocculer une suspension de latérite.

1.2 Objectif général de ce travail

Ainsi mieux appréhender les phénomènes de sédimentation, dans notre cas, implique de mieux connaître les phénomènes et mécanismes de formation des structures agrégées. Au cours de ce travail, nous nous intéresserons particulièrement aux effets d'interactions de nature électrostatique et tendrons de montrer leur impact sur la dynamique de formation d'agrégats constitué des particules les plus fines.

2 INTERACTIONS ENTRE PARTICULES

2.1 Les conditions de stabilité des particules en solution

Les particules présentes en solution dans l'eau de ruissellement des bassins versants, peuvent être assimilées à des suspensions colloïdales. La sédimentation des particules est ordinairement régie par la force de gravité, hors dans notre cas, est contrebalancée par l'agitation thermique. Pour que les particules sédimentent, il faut qu'elles s'agrègent ce qui dépend des forces de Van der Waals et les forces électrostatiques qui seront présentées dans les parties i et ii respectivement. La troisième partie traitera de la théorie DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey et Overbeek) qui vise à estimer les énergies d'interaction entre les particules.

2.1.1 Les forces de Van der Waals

Découverte pour la première fois en 1873 par J.D. Van der Waals en voulant expliquer pourquoi les gaz ne suivaient pas la loi générale des gaz parfaits, les forces de van der Waals sont des forces d'attractions intermoléculaires qui résultent des interactions entre dipôles. On distingue trois forces différentes qui agissent simultanément sur un système :

- les forces de Debye-van der Waals,
- les forces de Keesom-van der Waals,
- les forces de London-van der Waals.

On peut écrire pour deux particules le potentiel attractif :

$$V(r) = \frac{-A}{6} \left[\frac{2R^2}{r^2 - 4R^2} + \frac{2R^2}{r^2} + \ln \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} \right) \right]$$

Avec :

- A est la constante d'Hamaker,
- R le rayon des particules,
- r la distance qui sépare les deux particules.

2.1.2 Les forces électrostatiques

Les minéraux quand ils sont en suspension dans un milieu possèdent des charges de surface. Ces charges peuvent provenir de différents phénomènes :

- de l'ionisation des groupements en surface (groupement hydroxyle dans les cas traités),
- de l'adsorption d'ions à la surface du minéral.

La charge de surface présente sur un minéral va ensuite être compensée en solution. Elle résulte d'une accumulation de charges positives ou négatives sur un minéral et dépend donc du pH de la solution. Une accumulation des contre-ions et une diminution des co-ions à l'interface solide-liquide va permettre à la solution de conserver son électronégativité globale. Cette zone de perturbation des ions en solution est appelé couche diffuse. Il existe plusieurs modèles qui permettent d'expliquer la variation de charge de surface en fonction du pH¹.

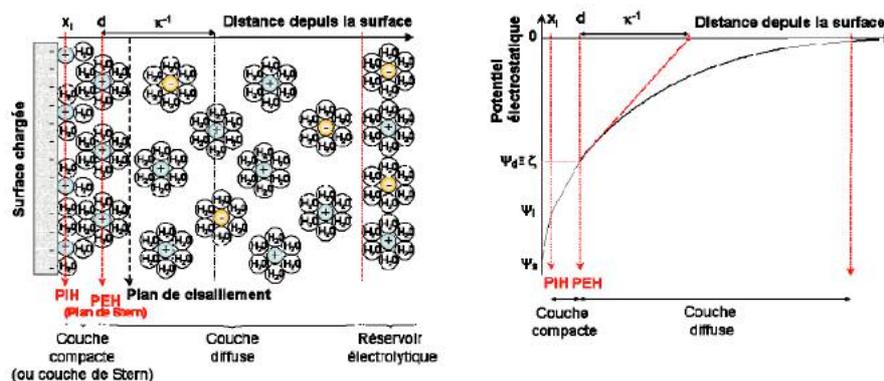


Figure 2: Illustration de la double couche électronique et du potentiel électrostatique.

Le cas le plus simple est le modèle de la double couche. La première couche dite de stern dont l'épaisseur est de quelques Angströms est constituée des contre-ions les plus proches, la deuxième qui contient les contre-ions les plus éloignés est appelée la couche Helmholtz. Dans ce cas-là, le potentiel ψ_0 est constant est la charge décroît dans la couche de Helmholtz selon :

$$\sigma_0 = 0,1174\sqrt{I} \cdot \sinh \left(\frac{ZF\psi_d}{2RT} \right)$$

où I est la force ionique de la solution, z la charge des contre-ions, ψ_d le potentiel au plan OHP (outer Helmholtz plane), F la constante de Faraday et R la constante des gaz parfaits. Le plan OHP représente la frontière entre la couche d'Helmoltz et la couche de Stern.

Ce modèle n'est pas le seul et ne rend pas précisément compte des expérimentations, d'autres modèles sont développés comme le modèle à trois couches² qui tient compte de l'écrantage de la charge de surface par les contre-ions dans la couche de Stern.

2.1.3 La théorie DLVO

La théorie DLVO consiste en l'estimation de l'énergie totale d'interaction entre les particules. Deux simplifications sont à la base de cette théorie :

- seules les forces d'attraction de Van der Waals et les forces répulsives électrostatiques sont considérées,
- les forces électrostatiques et de Van der Waals sont supposées additives.

Ainsi : $V_t = V_a + V_r$

Avec,

V_t l'énergie totale, V_a l'énergie attractive, V_r l'énergie répulsive.

Lorsque deux particules se rapprochent, il s'exerce d'abord une interaction attractive qui est responsable de l'apparition d'un premier minimum dans la courbe d'énergie potentielle. Il correspond à une faible coagulation réversible. La hauteur de la barrière de potentiel dépend de :

- La concentration et la charge des ions de l'électrolyte, la charge de surface des particules ainsi que la nature du solvant.

Ainsi, on peut diminuer la contribution répulsive par une augmentation de la force ionique ou par une diminution de la charge de surface ce qui a pour effet de déstabiliser la suspension et de faciliter la sédimentation.

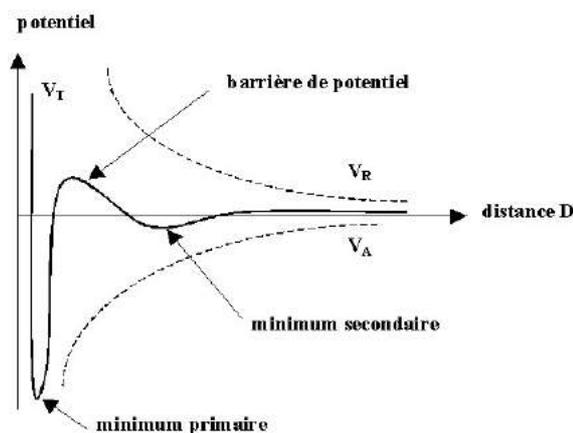
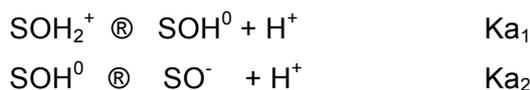


Figure 3 : représentation de l'énergie potentielle d'interaction entre deux particules en fonction de la distance D

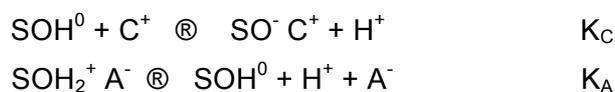
2.2 Charge de surface des oxydes

La charge de surface des particules provient des équilibres acido-basiques des groupements hydroxylés présents à l'interface (hydr)oxyde-solution. Plusieurs modèles permettent de décrire les équilibres de protonations ou de déprotonations de ces surfaces.

Le modèle le plus simplifié, développé par Yates et coll.², utilise un modèle triple couche. Les auteurs caractérisent l'acidité des groupes de surface par les équilibres de déprotonations successives d'un site de surface S (modèle à 2 pKa) :



Ce modèle prend également en compte l'adsorption des contre-ions :



K_{a1} , K_{a2} et K_C , K_A sont respectivement les constantes d'acidité et d'adsorption des contre ions.

3 MECANISMES D'AGRÉGATION ET CINÉTIQUE

3.1 Mécanismes d'agrégation

Le processus d'agrégation nécessite à la fois, qu'il y ait contact entre les particules et qu'elles restent collées. La première condition nécessite un mouvement relatif des particules les unes par rapport aux autres. Ce mouvement peut avoir pour origine l'agitation thermique, la sédimentation différentielle ou encore l'existence d'un cisaillement à l'intérieur de la suspension (agitation, écoulement turbulent). La probabilité avec laquelle la seconde condition est remplie dépend du potentiel d'interaction entre particules. En l'absence de répulsion entre particules, chaque contact se traduit par de l'agrégation. La croissance de l'agrégat est alors uniquement limitée par la fréquence de collision. Lorsqu'il existe une barrière d'énergie répulsive entre particules, la probabilité qu'un choc soit efficace dépend de l'importance relative de l'énergie cinétique moyenne des particules et de la hauteur de la barrière de répulsion.

Quelle que soit la fréquence de collision et l'efficacité de chaque choc, la taille de l'agrégat est communément caractérisée par son rayon de giration R_g et sa structure, par sa dimension fractale d_f .

Le rayon de giration représente la distance moyenne entre le centre de masse de l'agrégat et chacune des particules primaires. Le rayon hydrodynamique et le rayon externe servent aussi parfois à quantifier la dimension de l'agrégat. La dimension fractale est reliée à la fraction volumique des particules primaires à l'intérieur de l'agrégat. Elle varie entre 1 pour un agrégat linéaire et 3 pour une sphère compacte. La dimension fractale permet d'obtenir des informations sur le mécanisme de croissance de l'agrégat et est en ce sens une donnée importante. Les modèles d'agrégation les plus usités sont les modèles d'agrégation entre « cluster » dans lesquels on considère qu'ils diffusent en suivant une trajectoire habituellement linéaire ou Brownienne et que cette agrégation est à la fois irréversible et sans restructuration possible. Lorsque chaque collision se traduit par une liaison, modèle DLCA, la dimension fractale est $d_f = 1,8$. Les agrégats sont alors peu denses.

Une dimension fractale $d_f = 2,1$, est obtenue lorsqu'une collision ne se traduit presque jamais par une liaison (modèle RLCA), les agrégats formés sont alors plus compacts.

3.2 Cinétique d'agrégation

La cinétique d'agrégation comporte une invariance d'échelle avec le temps que l'on peut également associer à une dimension fractale. Cette cinétique est décrite par l'équation de Smoluchowski, dans laquelle, elle est envisagée en terme de probabilité de réaction entre agrégats en fonction de leur masses. L'évolution temporelle de la concentration d'agrégats de j particules primaires, N_j est donnée par :

$$\frac{dN_j}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{j-1} \alpha K_{i,j-i} N_i N_{j-i} - N_j \sum_{i=1}^{\infty} \alpha K_{i,j} N_i - \frac{v_{s,j} N_j}{z}$$

Elle dépend de la fréquence de collisions $K_{i,j}$, de l'efficacité d'attachement α et de $v_{s,j}$ la vitesse de sédimentation d'une particule de taille j . Le paramètre α exprime la probabilité qu'on les agrégats de rester attachés à la suite de leur collision. Le premier terme de droite définit l'augmentation par agrégation de deux particules pour former une particule de taille j et le second terme traduit la disparition des agrégats de taille j par agrégation avec des particules d'autre taille. Enfin, lorsque la taille des agrégats augmente, leur vitesse de sédimentation n'est plus négligeable devant la vitesse d'agglomération. L'ajout du dernier terme permet de suivre l'évolution de concentration dans une couche de hauteur z . Dans cette couche, les concentrations sont considérées homogènes.

Il y a trois processus majeurs de mouvement qui affectent le taux de collision : le mouvement brownien, l'écoulement du fluide et la différence de vitesse de sédimentation entre des particules de taille ou de masse volumique différente. La fréquence de collision peut donc être exprimée comme une superposition linéaire de trois termes :

$$K_{i,j} = \frac{2k_B T}{3\mu} \frac{(r_i + r_j)^2}{r_i r_j} + \frac{4}{3} G (r_i + r_j)^3 + \pi (r_i + r_j)^2 |v_{s,i} - v_{s,j}| \text{ où } k_B \text{ est la constante de Boltzman, } r$$

est le rayon de l'agrégat constitué de j ou i particules primaires, μ est la viscosité du milieu suspendant, G le taux de cisaillement et v_s la vitesse de sédimentation qui est donnée par l'équation de Stokes. Pour des concentrations négligeable en matière organique, l'efficacité

de collision peut être écrite sous la forme $\alpha_{i,j} = A \left(\frac{9}{d_{f,i} d_{f,j}} \right) \frac{(r_i / r_j)^2}{2(1 + r_i / r_j)^2}$ avec r la taille de

l'agrégat ($r_i / r_j \leq 1$) et A un paramètre de calibration [21]. Dans cette expression, la dimension fractale est dépendante de la taille de l'agrégat ce qui est sans doute plus réaliste. Généralement, les expressions sont établies en considérant une dimension fractale unique quelle que soit la taille de l'agrégat. Alors que les particules rentrent en contact préférentiellement sous l'effet du mouvement Brownien, les gros agrégats entrent en collision sous l'effet conjugué de l'écoulement et du différentiel de vitesse de sédimentation. Il est alors logique de penser que la transition d'une agrégation brownienne vers une floculation d'agrégats se traduit par l'évolution de la dimension fractale. Quelques travaux expérimentaux ont confirmé cette hypothèse et montré une évolution en loi puissance de la dimension fractal avec la taille de l'agrégat [22,23].

4 VITESSE DE SEDIMENTATION

Comme illustré sur la figure 1, la forme des agrégats formés dépend du mécanisme d'agrégation et de la dimension fractale associée. Au moins pour les dimensions fractales les plus faibles, il semble évident que la détermination de la vitesse de sédimentation ne peut se faire par des modèles usités pour des sphères comme celui de Stokes. D'une part, les agrégats sont non sphériques ce qui augmente la force de frottement visqueux. D'autre part, ils sont perméables et leur masse volumique est inférieure à celle d'une sphère pleine constituée du même matériau ce qui au contraire diminue leur vitesse de sédimentation.

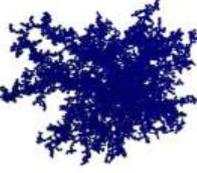
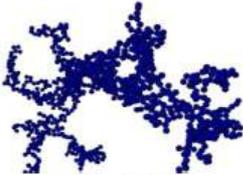
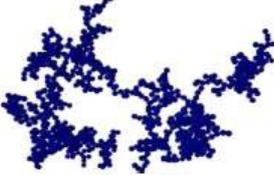
	Reaction-limited	Ballistic	Diffusion-limited
Particle-cluster	 $D_f=3.00$	 $D_f=3.00$	 $D_f=2.50$
Cluster-cluster	 $D_f=2.09$	 $D_f=1.95$	 $D_f=1.80$

Figure 1 : Modèles de cinétique d'agrégation en 3D et dimensions fractales associées (tiré de [1])

La modélisation de la vitesse de sédimentation pour des agrégats s'avère complexe. En effet, il est nécessaire de tenir compte à la fois de sa perméabilité et de sa forme irrégulière [24]. Les modèles existants sont établies, comme pour le modèle de Stokes, en égalisant la force gravitationnelle réduite de la poussée d'Archimède à la force de frottement visqueux. La force gravitationnelle réduite de la poussée d'Archimède a pour expression :

$$F_G - F_A = V_a(\rho_a - \rho_l) = V_p N_p (\rho_p - \rho_l)$$

où V est le volume, N le nombre de particules, ρ la masse volumique et où les indices a, p, l font respectivement références à l'agrégat, aux particules primaires et au liquide suspendant. Un agrégat de dimension fractale d_f , contient $N_p = k_g (R_g / r_0)^{d_f}$ particules primaires de rayon r_0 .

Le préfacteur fractal k_g est pris, en première approximation, comme étant égal à 1.

La force de frottement visqueux prend la forme générale [25] $F_V = C_d \frac{1}{2} A_a \rho_l v_s^2$ où A_a est la surface projeté de l'agrégat, v_s la vitesse de sédimentation et C_d est le coefficient de

frottement visqueux. En égalisant la force gravitationnelle réduite et la force de frottement visqueux, il vient :

$$v_s^2 = \frac{V_p}{A_a C_d} \frac{2(\rho_p - \rho_l)g}{\rho_l} \left(\frac{R_g}{r_0} \right)^{df}.$$

En supposant que $A_a \approx \pi R_g^2$ et $V_p \approx \frac{4\pi}{3} r_0^3$ et en corrigeant la non sphéricité en utilisant un facteur θ , l'expression précédente devient :

$$v_s^2 = \frac{8\theta}{3C_d} \frac{(\rho_p - \rho_l)g}{\rho_l} R_g^{df-2} r_0^{3-df}.$$

Dans la littérature, plusieurs expressions du coefficient de traîné coexiste suivant notamment le nombre de Reynolds [24, 26, 27], cependant la relation empirique $C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687})$ où Re est le nombre de Reynolds de l'agrégat, est très largement utilisée.

Cette expression ne décrit qu'imparfaitement les vitesses de sédimentation expérimentales notamment car les propriétés des agrégats ne sont pas indépendantes de leur taille. De plus, dans ces modèles les particules primaires sont monodisperses.

La polydispersité des particules primaire rend possible l'existence d'agrégat de même taille mais ayant des structures différentes. Vahedi et al. [25] ont considéré pour chaque taille une distribution normale de la dimension fractale avec une valeur moyenne et un écart type dépendant de la taille de l'agrégat. La prise en considération de ces variations amène à une meilleure estimation de la vitesse moyenne ainsi que des écarts mesurés expérimentalement.

5 MATERIEL ET METHODES

Les MES utilisées proviennent des échantillonneurs automatiques ainsi que de prélèvements manuels effectués lors d'un épisode pluvieux.

L'échantillonnage manuel a pour objectif de quantifier l'influence des différents bassins de décantation situés le long du trajet de l'eau. La géolocalisation des six lieux choisis est indiquée sur la Figure 2. Chaque point est désigné par un nombre croissant de l'amont vers l'aval.



Figure 2 : Géolocalisation des points de prélèvement

Pour chacun des échantillons, les phases cristallines et leurs proportions respectives ont été déterminées par diffraction des rayons X (DRX), la charge de surface par titrage potentiométrique et enfin la structure des agrégats par diffusion statique de la lumière (SLS).

5.1 Caractérisation des phases cristallines.

L'appareillage utilisé pour ces mesures est un diffractomètre INEL à détecteur courbe CPS120 avec une anticathode au Cobalt ($\lambda=1,7889\text{\AA}$). La calibration du détecteur est réalisée avec une poudre d'Yttrium (standard normalisé) en privilégiant la précision aux bas angles.

Après homogénéisation de la suspension, les MES sont prélevées, séchées puis broyées afin d'obtenir une poudre la plus fine possible. Le diffractogramme comporte une série de maxima dont la position est corrélée à une distance interatomique. Il est ainsi possible de déterminer la structure cristalline et donc la nature du minéral sur lequel est effectuée la mesure.

L'analyse comporte deux étapes. Dans un premier temps, les phases cristallines constituant l'échantillon sont identifiées en comparant la position des maxima du diffractogramme expérimental avec celle répertoriée dans une base de données (fiches JCPDS). Dans un second temps, une procédure d'affinement des structures (Rietveld) [28,29] est appliquée à l'aide du logiciel Maud. Cette méthode consiste à simuler un diffractogramme à partir de modèles cristallographiques connus, puis d'ajuster le modèle afin de minimiser l'écart entre le résultat de la simulation et la mesure. La Figure 3 illustre un résultat classique de cette procédure. Cette méthode permet notamment de quantifier la proportion relative de chacun des constituants contenus dans la poudre.

Le diffractogramme figure 6 est celui de l'échantillon AM20, montré en exemple. Sur ce diffractogramme on peut observer la courbe en noir qui est la courbe calculée par affinement, celle-ci se superpose parfaitement à la courbe du mélange et permet d'obtenir les paramètres de maille, ainsi que les proportions précises de l'échantillon.

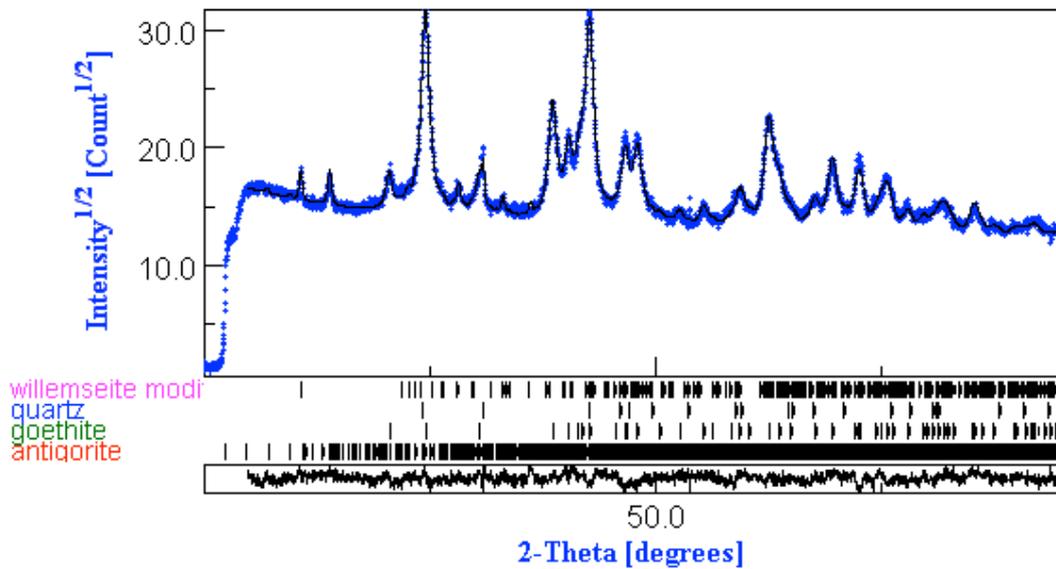


Figure 3 : Diffractogramme mesuré (en bleu) et résultant de la procédure d'affinement Rietveld (noir)

5.2 Mesure de la charge de surface des particules

La Zétamétrie et le dosage potentiométrique sont les deux méthodes classiques de détermination de la charge de surface de particules en suspension. La Zétamétrie consiste à appliquer un champ électrique à l'échantillon et à mesurer la vitesse de déplacement des particules sous l'effet de ce champ. La quantification de la charge est indirecte et le modèle reliant la vitesse et la charge n'est valable que pour des particules sphériques. Dans le cas des MES, les particules sont fortement anisotropes et irrégulières, la méthode par dosage acide/base est donc plus appropriée.

Les échantillons sont lavés une fois par une solution d'acide à 0.15M et 3 fois dans de l'eau distillée afin de retirer les sels en solution. Les particules sont ensuite incorporées dans une solution contenant de l'acide nitrique et du sel de sodium. L'ajout du sel fixe la force ionique de la solution. La solution est ensuite agitée pendant 40 mn afin de stabiliser les charges puis dosée par une solution de soude. On procède également au dosage de la solution constituée uniquement d'acide nitrique et de sel. La charge de surface des particules σ est déduite de la différence entre les deux dosages :

$$\sigma = \frac{F}{A\rho} \left((C_A - C_B)_{Suspension} - (C_A - C_B)_{Blanc} \right)$$

avec F la constante de Faraday en C/mol, A la surface spécifique des particules en m²/g, ρ la concentration de solide en solution en g/L, C_A et C_B les concentrations en acide et base en mol/L.

Il est également possible d'obtenir à partir de ces mesures le pH pour lequel la charge de surface globale est nulle (PZC). Dans le cas d'une suspension constituée d'un seul élément, l'agrégation et donc la décantation seront le plus efficace pour ce pH. Au contraire, loin de cette valeur de pH, la suspension colloïdale devient stable et ne sédimente pas.

Il est possible de mesurer la charge de surface d'un ensemble de particules. Le paramètre mesurer correspond des charges de chaque espèce pondérée par leurs proportions massiques. De cette façon la charge globale d'un échantillon peut être définie par la relation [30]:

$$\sigma_m = \sum_i \%_i * \sigma_i$$

Avec : σ_m la charge de surface du mélange, $\%_i$ le pourcentage massique de la particule i , σ_i la charge surfacique de la particule i . A l'aide de cette relation, il est possible de déterminer la charge de surface d'un constituant à partir de cette charge global et des valeurs connues associées aux autres phases du mélange.

5.3 Caractérisation des agrégats par diffusion statique de la lumière :

Les figures de diffusions statique de la lumière sont mesurées à l'aide d'un granulomètre MasterSizer 2000 composé d'une source laser He-Ne de 4mW de longueur d'onde 0.6334 nm et de 42 détecteurs.).

Les particules constituant un agrégat sont proches et la répartition angulaire de la lumière diffusée dépend non seulement de la forme et de la taille des particules primaires (facteur de forme F) mais également de l'organisation des particules à l'intérieur de l'agrégat (facteur de structure S). L'analyse de la figure de diffusion donne donc accès à la dimension fractale des agrégats et à leur rayon de giration.

Le modèle théorique utilisée pour cette analyse est $I(q)\alpha.F(qa).S(q)$ où q le vecteur

d'onde est donné par $q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\theta/2)$ avec θ l'angle de diffusion et λ la longueur d'onde

dans le milieu. Pour une sphère de rayon a , dans la théorie de Rayleigh Gans Debye (RGD)

: $F(qa)\alpha\left(3\frac{\sin(q.a) - q.a.\cos(q.a)}{(q.a)^3}\right)^2$. Le facteur de structure utilisé est

$$S(q) = 1 + \frac{Df.\Gamma(Df - 1)}{(q.a)^{Df} [1 + (1/q^2 \xi^2)]^{Df-1/2}} . \sin[(Df - 1).\tan^{-1}(q\xi)] \text{ avec } \xi = \sqrt{\frac{2}{Df(Df + 1)}}.Rg \text{ où}$$

Rg est le rayon de giration. Le rayon des diffuseurs primaires, le rayon de giration et la dimension fractale sont ajustés afin de minimiser la somme des écarts au carré entre l'intensité mesurée et l'intensité théorique.

5.4 Détermination de la vitesse de sédimentation

Pour ces expériences, le pH est ajusté sous agitation en utilisant des solutions de soude à 0.2M et d'acide à 0.15M afin de balayer une large gamme de pH (2 à 12). Toujours sous agitation, 20 mL de la suspension sont prélevés, introduits dans un tube de 7 cm de haut et 3 cm de large puis plongés dans un bain à ultrason pour casser les agrégats. On enregistre ensuite à l'aide d'une caméra la sédimentation de l'échantillon.

Les images sont converties en niveaux de gris puis on les intensités sont moyennées pour une altitude donnée. On repère ensuite la position des pixels d'intensité :

$$I_1 = \frac{3}{4} I_{min\text{tot}} + \frac{1}{4} I_{max\text{tot}}, \quad I_4 = \frac{3}{4} I_{min} + \frac{1}{4} I_{max}$$

$$I_2 = \frac{1}{2}I_{mintot} + \frac{1}{2}I_{maxtot}, \quad I_5 = \frac{1}{2}I_{min} + \frac{1}{2}I_{max}$$

$$I_3 = \frac{1}{4}I_{mintot} + \frac{3}{4}I_{maxtot}, \quad I_6 = \frac{1}{4}I_{min} + \frac{3}{4}I_{max}$$

où I_{maxtot} et I_{mintot} sont respectivement les niveaux de gris maximums et minimums déterminés pour l'ensemble de la série d'images constituant la série temporelle alors que I_{max} et I_{min} sont les niveaux de gris maximums et minimums mesurés sur l'image enregistrée au temps t considéré.

Ces intensités sont respectivement corrélées au début du front de sédimentation, au milieu et à la fin du front de sédimentation. L'écart de position entre ces différents niveaux d'intensité est donc un indicateur de la présence de plusieurs populations de particules qui sédimentent à des vitesses différentes (phénomène de crémage). La vitesse de sédimentation est déterminée pour chaque niveau d'intensité par détermination du coefficient directeur dans la zone où l'évolution de la position est linéaire en fonction du temps.

5.5 Microscopie électronique.

Les observations de microscopie électronique ont été réalisées par P Baunier à l'institut de matériaux de Paris centre (université Pierre et Marie Curie) sur deux microscopes JEOL 2010 et 100 CX. Le microscope 2010 est doté d'un analyseur EDX. La grille de microscopie est préparée en dispersant, à l'aide d'ultrason, une petite quantité d'échantillon dans une solution aqueuse de façon à obtenir une suspension translucide. Une goutte de cette préparation est déposée sur une grille de microscopie en cuivre recouverte d'une membrane en carbone.

6 RÉSULTATS

6.1 Résultats obtenus pour les échantillons prélevés le long du bassin versant

6.1.1 Phases minérales présentes dans les MES (DRX)

Les échantillons analysés par cette technique sont les échantillons 1, 2, 3, 4, 5 prélevés le long du bassin versant. L'identification des différentes phases minérales s'effectue à l'aide de la banque de données JCPDS. Sur tous les diffractogrammes analysés on retrouve, Figure 4 : Diffractogramme classique des échantillons prélevés. En rouge, vert clair, noire et vert foncé les données de la banque JCPDS concernant respectivement la goethite, le talc, l'antigorite et le quartz les maximums d'intensité de la goethite (référéncés par la fiche JCPDS 901-0407), les maximums de la willemseite/tac (fiche 900-8298), de l'antigorite (fiche 901-3104) et du quartz (fiche 901-3322). Aucune espèce ne semble apparaitre en plus des quatre citées précédemment. Il est à noter que le talc remplace la willemseite, car leurs structures sont voisines.

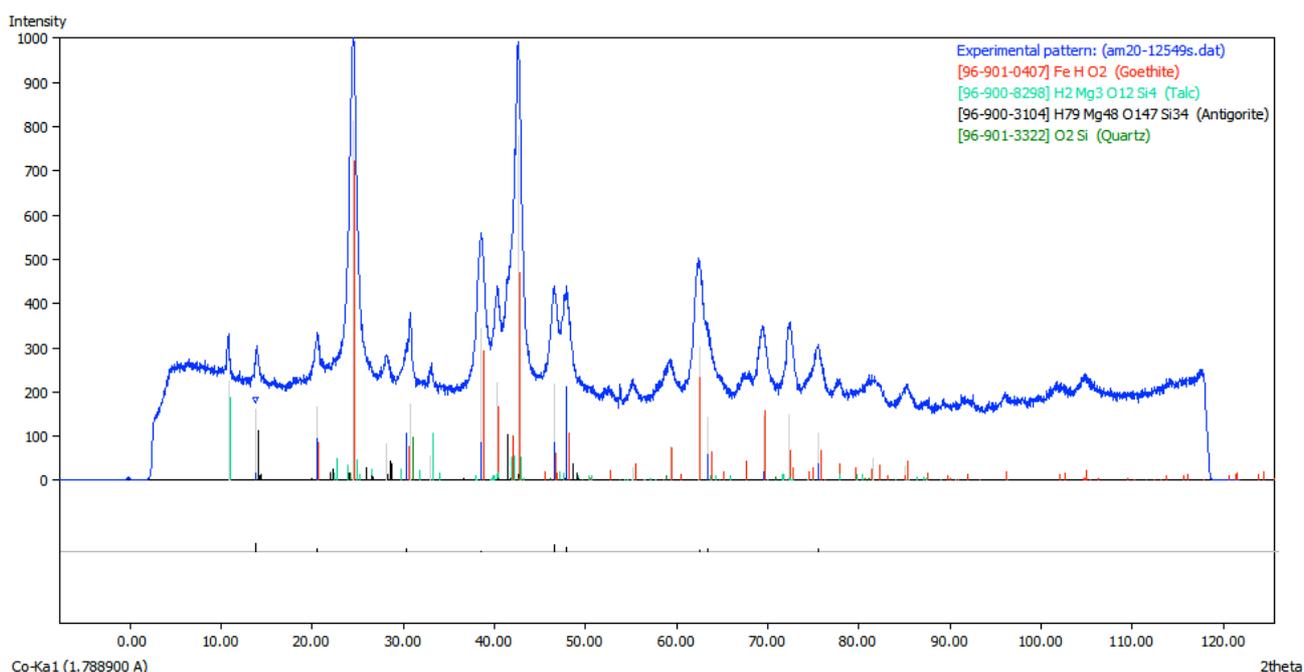


Figure 4 : Diffractogramme classique des échantillons prélevés. En rouge, vert clair, noire et vert foncé les données de la banque JCPDS concernant respectivement la goethite, le talc, l'antigorite et le quartz

Les premiers échantillons 1 à 5 donnent des résultats assez similaires pour chaque point de prélèvement. On constate que, quel que soit le prélèvement, la goethite prédomine. La différence de proportion en fonction de la hauteur de prise de l'échantillon le long du bassin versant révèle un affaiblissement en goethite et une augmentation des autres constituants de l'amont vers l'aval. Mais, on peut remarquer aussi que pour l'avant dernier point, les

compositions redeviennent presque identiques à celle de l'amont. Une arrivée de matière de même nature que l'amont doit provenir d'un ruissèlement extérieur au parcours de l'eau prévu par les mines. En effet, les mines tentent de réduire leurs dégagements de matières en suspension, pour cela elles mettent en place des bassins de sédimentation qui permettent d'appauvrir l'eau de ruissèlement en particules. Cependant, lors de fortes pluies, l'eau passe par d'autre chemin. Il se trouve qu'après le seuil aval, une grosse arrivée d'eau chargée en particules, dont les proportions sont sensiblement identiques aux proportions en amont, rejoint le ruissèlement principal et rétablissant ainsi les proportions de l'amont du bassin versant. Dans le *Tableau 1 : Proportion des différentes phases minérales obtenues par diffraction des rayons X et affinements Rietveld échantillons 1 à 5*, sont indiquées les différentes proportions en particules aux différents points de prélèvements. De plus, on remarque que dans l'échantillon 5 (pris à l'embouchure), la proportion en goethite diminue fortement ce qui indique que seule les goethites sédimentent dans un premier temps.

Echantillon	% de Goethite	% de Willemseite	% de Quartz	% d'Antigorite	% de Sel
1	73.2	11.6	5.3	9.9	0
2	62.7	17.8	8.9	10.7	0
3	66	14.7	7.09	11.05	0
4	72.7	12.2	5.05	10	0
5	38.4	25.9	11.5	15	9.2
5 sans tenir compte du pourcentage de sel	42.3	28.5	12.7	16.5	

Tableau 1 : Proportion des différentes phases minérales obtenues par diffraction des rayons X et affinements Rietveld échantillons 1 à 5

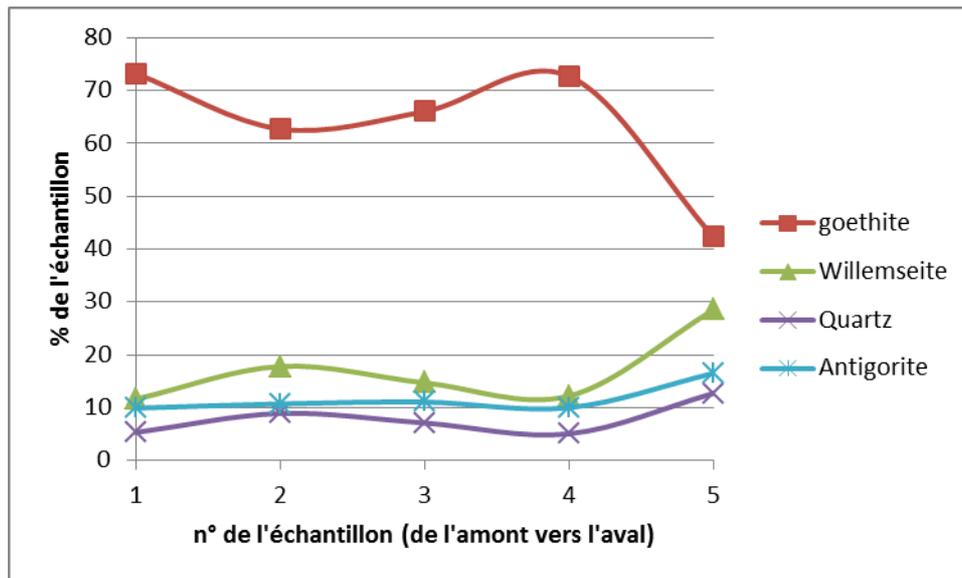


Figure 5 Pourcentage massique de chaque phase minérale de l'échantillon le long du bassin versant.

6.1.2 Taille des agrégats

Les analyses granulométriques ont plusieurs buts : tout d'abord, de déterminer la taille des particules d'un échantillon et ensuite d'obtenir leurs dimensions fractales et rayons de giration. Sont présentés dans la Figure 6 : distribution en taille des échantillons obtenus le long du bassin. Les échantillons ont subi des

ultrasons au cours de leur préparation. et

Figure 7 : distribution en taille des échantillons obtenus le long du bassin versant. Les échantillons n'ont pas subi d'ultrason., les résultats de plusieurs analyses granulométriques pour les mélanges de 1 à 5, qui sont des points intermédiaires sur le parcours des MES dans l'eau, de l'amont vers l'aval.

L'échantillon numéro 1 a été prélevé en amont et l'échantillon 5 en aval. Pour les échantillons avec ultrason, la distribution en taille des agrégats se décale vers les plus grandes dimensions de l'échantillon 1 à 4 ce qui est caractéristique d'une augmentation de la taille des agrégats lors de l'écoulement des particules le long du bassin versant.

Pour l'échantillon 5, la distribution en taille déplace à nouveau mais vers les plus petites dimensions pour retrouver l'allure de celle de l'échantillon 1. Cela s'accompagne par une forte diminution de la concentration des goethites, il est donc possible d'envisager que les agrégats n'ont plus la même nature dans l'eau salée au niveau de l'échantillon 5. Sans ultrason, la distribution en taille de l'échantillon 1 montre deux populations d'agrégats de taille différentes. Dès l'échantillon suivant, une seule population de particule, dont la taille est plus large, est détectée, par le mastersizer.

Le maximum est obtenu par l'échantillon 3. Pour 4 et 5, on observe à nouveau une diminution de la taille moyenne des agrégats en fin de parcours des MES. Le comportement de la dimension des agrégats le long du bassin versant est très proche quelque soit la méthode de préparation étudiée avec et sans ultrason. Néanmoins, leur utilisation permet

d'avoir accès à la taille d'agrégats les plus solides, agrégats qui ne sont pas détruits par les effets d'écoulement par exemple, et donc, a priori, les plus représentatifs.

Les dimensions fractales mesurées sont de l'ordre de 1,8 ce qui est caractéristique de la dimension fractale d'agrégats obtenus par un processus d'agrégation limité par la diffusion (2,1 pour un processus limité par la réaction) [31]. Le Rayon de giration a une valeur moyenne 10 μm pour les différents points de prélèvement. La taille des particules primaires constituant les floccs est de l'ordre de 3 nm ce qui vérifie le deuxième critère de la théorie RGD. La vitesse de sédimentation de Stokes, qui néglige le mouvement brownien, donne 0,15 mm/s ce qui est plus proche de ce que l'on peut visualiser en pratique. Cela correspond à 1h30 pour parcourir 1 m. En effet, l'agitation dans la cuve du Malvern suffit à casser les agrégats les plus gros et on n'observe donc pas d'agrégats de l'ordre du mm comme lors des expériences de sédimentation. Ce que corrobore l'absence de différence avec et sans ultrason où les agrégats les moins cohésifs sont déjà cassés par l'agitation.

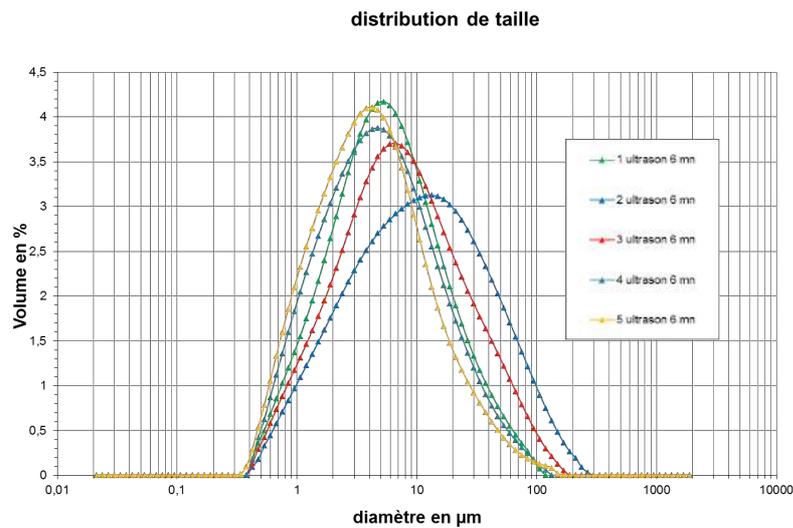


Figure 6 : distribution en taille des échantillons obtenus le long du bassin. Les échantillons ont subi des ultrasons au cours de leur préparation.

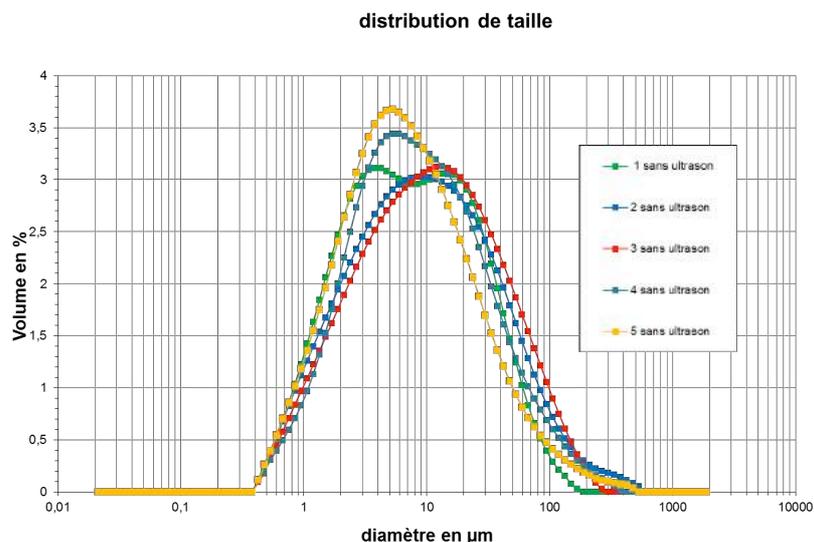


Figure 7 : distribution en taille des échantillons obtenus le long du bassin versant. Les échantillons n'ont pas subi d'ultrason.

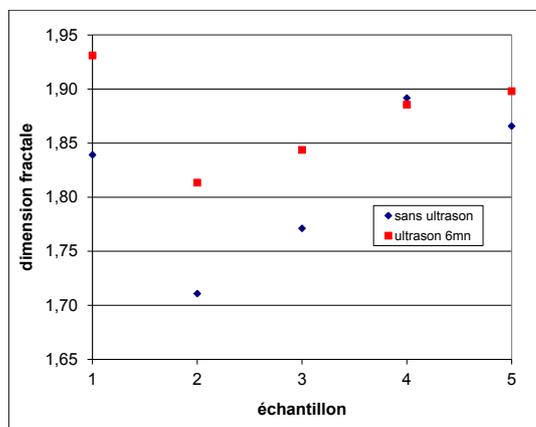


Figure 8 Diamètre fractal des agrégats fonction de l'échantillon le long du bassin versant

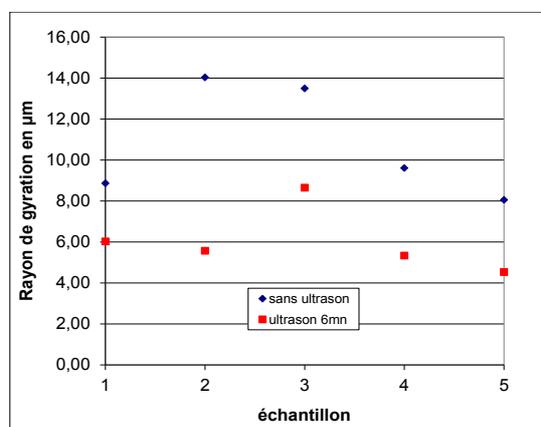


Figure 9 rayons de giration des agrégats en fonction de l'échantillon le long du bassin versant

6.2 Résultats obtenus pour les échantillons AM20, AM21 et sédiment

6.2.1 Caractérisation des phases minérales par diffraction de rayon X

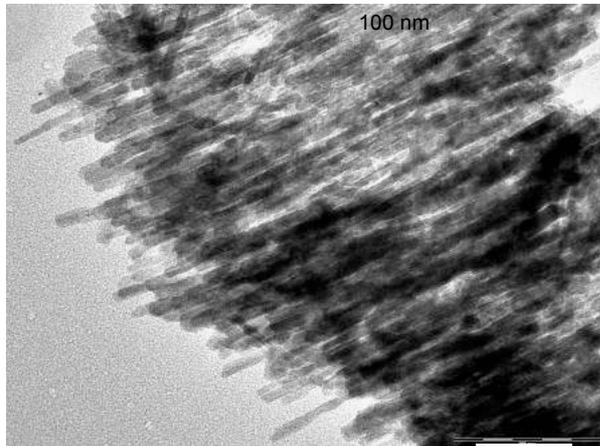
Echantillon	% de Goethite	% de Willemseite	% de Quartz	% d'Antigorite
AM 20	76,13	9,75	4,90	9,22
AM 21	88,8	2,80	5,20	3,10
Sédiment	69,81	15,52	6,32	8,33

Tableau 2 Proportion des différentes phases minérales obtenues par diffraction des affinements Rietvelt échantillons AM20,AM21 et sédiment

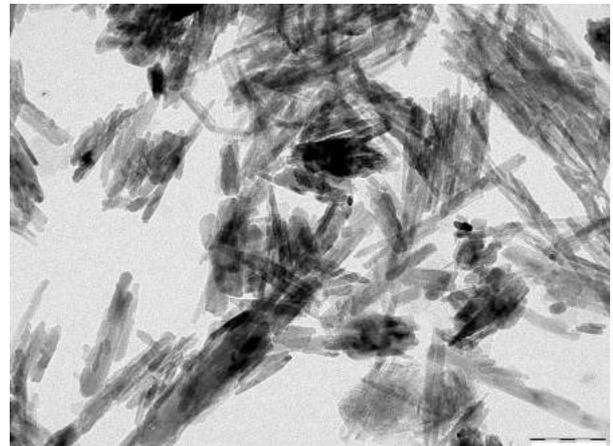
Les échantillons AM20, AM21 et sédiment sont issus des décanteurs intermédiaires le long du bassin versant. Ils ont été choisis d'avantage pour leurs différentes proportions que leur situation le long du bassin versant. Ces résultats obtenus par diffraction des rayons X et analyse par affinement Rietveld sont reportés dans le Tableau 2 Proportion des différentes phases minérales obtenues par diffraction des affinements Rietvelt échantillons AM20,AM21

et sédiment. L'échantillon AM21 a une proportion de Goethite supérieure à 80 % ce qui diffère par rapport aux deux autres. On pourra remarquer aussi que la proportion de willemseite + quartz sont proches de 15 % pour les échantillons sédiments et AM 20 alors que leurs proportions ne sont que de 8 % pour l'échantillon AM21.

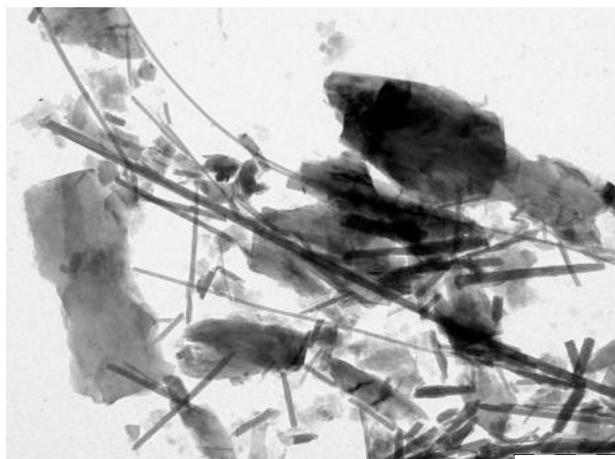
6.2.2 Cliché de microscopie électronique



A) Cliché de microscopie électronique de l'échantillon AM20



B) Cliché de microscopie électronique de l'échantillon AM21



C) Cliché de microscopie électronique d'un échantillon d'antigorite et chrysothile



D) Cliché de microscopie électronique d'un échantillon de Willemseite

Figure 10 Clichés de Microscopie des échantillons AM20 (A), AM21 (B), et d'échantillons Modèles d'Antigorite et Willemseite

La Figure 10 Clichés de Microscopie des échantillons AM20 (A), AM21 (B), et d'échantillons Modèles d'Antigorite et Willemseite représente les clichés de microscopie électronique des échantillons AM20, AM21 et deux échantillons de référence : Antigorite et Willemseite.

Pour, les échantillons AM20 et AM21 il est possible d'observer une majorité de particules de formes allongées qui se terminent par des bouts anguleux. La taille moyenne de ces particules est de l'ordre de 200 à 300 nm. Il est aussi possible d'observer des fibres plus grossières rectangulaires qui sont caractéristiques des phases de type Antigorite. Ceci peut être vérifié sur l'échantillon modèle dont l'image correspond à la Figure 10 Clichés de

Microscopie des échantillons AM20 (A), AM21 (B), et d'échantillons Modèles d'Antigorite et WillemseiteC ou cette phase minérale et majoritaire avec quelques fibres allongées caractéristiques de la Chrysotile. Enfin la figure Figure 10 Clichés de Microscopie des échantillons AM20 (A), AM21 (B), et d'échantillons Modèles d'Antigorite et WillemseiteD montre un échantillon modèle de Willemseite/Talc. Cette phase minérale se présente sous forme de larges voiles qui laissent entrevoir une structure lamellaire. Ce type de voile est moins visibles dans les échantillons AM20 et AM21. Cela est logique car la proportion de ce minéral est beaucoup moins importante que celle de l'Antigorite, par exemple, dans nos échantillons.

6.2.3 Caractérisation de la surface des particules par mesures de charge de surface.

L'objectif de cette partie n'est pas de mesurer la charge de surface qui, dans pour l'ensemble des phases en présence est déjà connue. En revanche, les mesures effectuées permettent de comparer les propriétés de charge des nos échantillons naturels à celles de particules de mêmes phases mais synthétisées en laboratoire ou préalablement traité pour retirer les matière organiques ou ions.

Les mesures de charges ont été réalisées à l'aide du protocole décrit au paragraphe 5.2.

6.2.3.1 Dosage de particules seules

Dans un premier temps, les particules présentes dans les échantillons seront analysées séparément afin de simuler le comportement des mélanges naturels. Les particules dosées dans cette partie sont issues de la collection de minéraux de l'université, et ne sont donc pas disponibles en grosse quantité. Ce sont des minéraux recueillis en Nouvelle-Calédonie et sont donc le plus proche possible des minéraux présents dans les échantillons naturels prélevés sur le site de Poro.

Pour d'autres échantillons, nous avons eu recours à des particules synthétisées au laboratoire comme pour les particules de Goethite par exemple.

6.2.3.1.1 Particules de Goethites

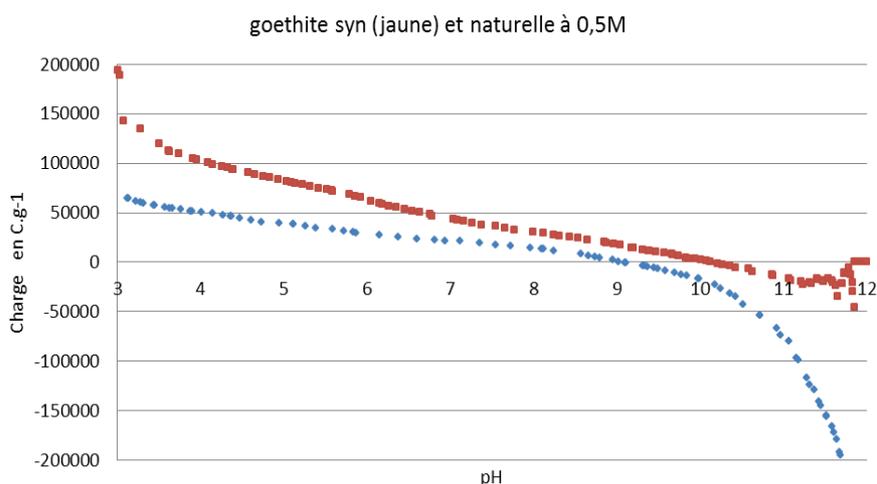


Figure 11 Courbe de charge des goethites naturelles et synthétiques

Dans le cas de la goethite, des particules ont été synthétisées afin de pouvoir comparer les résultats entre les goethites naturelles et les goethites synthétisées. Les PZC des goethites naturelles est de 9 et celui des goethites synthétisées est de 10,5 ce qui est proche des

valeurs de la littérature (9,5) [32, 33]. Les valeurs mesurées pour la goethite naturelle sont les plus faibles, ce résultat est en bon accord avec le fait que des ions carbonates ont tendance à décaler vers les bas pH le point de charge nulle des particules [34].

6.2.3.1.2 Antigorite

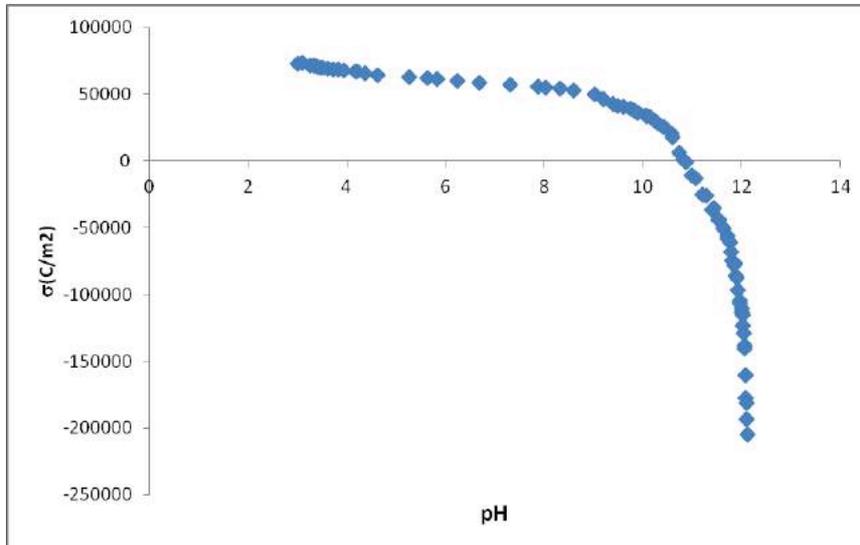


Figure 12 Courbe de charge de l'antigorite

Sur les courbes de charge de l'antigorite (Figure 12 **Courbe de charge de l'antigorite**) on peut observer que le point de charge nul est proche de 11 ce qui est proche des valeurs trouvées dans la littérature [33].

6.2.3.2 Dosage de mélanges réalisés à partir des particules naturelles

Dans le but mieux appréhender les équilibres entre charges de surfaces d'un mélange de phases minérales qui constituent nos échantillons, nous avons effectué des mesures sur des suspensions constituées de deux phases minérales.

6.2.3.2.1 Mélange antigorite-Goethite

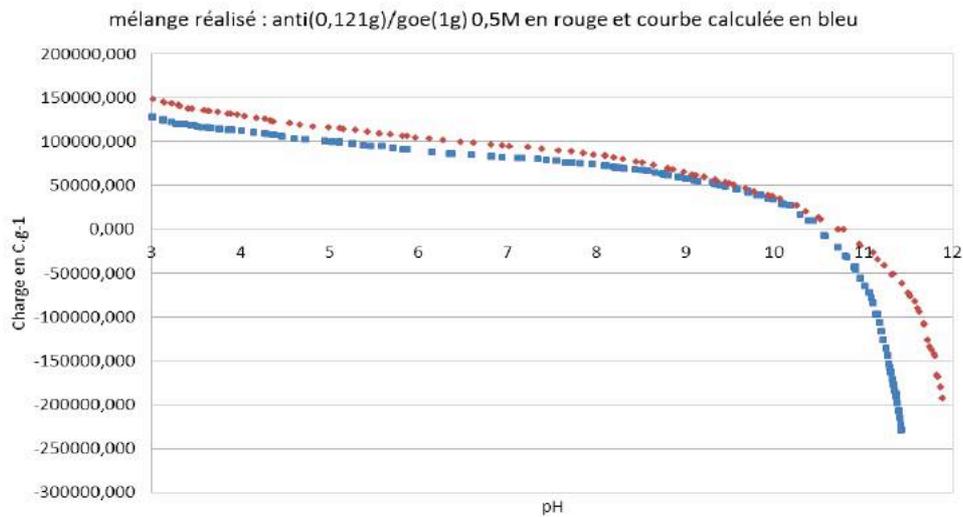


Figure 13 : Courbe de charge du mélange antigorite-goethite

La Figure 13 : **Courbe de charge du mélange antigorite-goethite** présente la courbe de charge d'un mélange de goethite et d'Antigorite dans des proportions proches de celles de nos échantillons (courbe rouge). En bleu est représenté, la courbe de charge calculée en effectuant les sommes pondérées des courbes de charge des différents constituants, comme cela a été décrit au paragraphe 5.2.

Dans ce cas, la prédiction de la courbe de charge par le calcul donne un résultat concordant, le calcul de la charge du mélange en proportion massique est donc fonctionnel. La charge totale du mélange suit la même forme que celle de l'Antigorite qui a une charge plus importante que la goethite malgré sa faible proportion dans le mélange. Le PZC obtenu est de 10,7.

6.2.3.2.2 Mélange Goethite-Quartz

Comme dans le cas précédent, la Figure 14 : **Courbe de charge du mélange goethite-quartz** représente les courbes de charges de surfaces expérimentales et théoriques d'un mélange de particule, dans ce cas il s'agit d'un mélange goethite quartz. Le calcul de la courbe de charge s'ajuste sur la courbe expérimentale, il n'y a donc pas d'interactions particulières entre la goethite et le quartz.

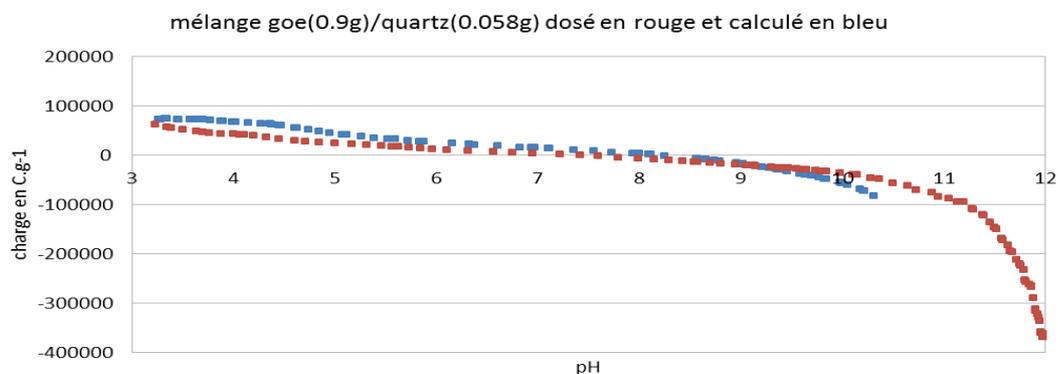


Figure 14 : Courbe de charge du mélange goethite-quartz

Pour mieux appréhender, les résultats de la mesure de la charge de surface globale d'un mélange de particules dont les PZC sont différents, nous avons réalisés plusieurs mesures à partir d'échantillons dont le rapport goethite/quartz varie (Figure 15 **Courbe de charge des mélanges goethite-quartz**).

On retrouve, dans le cas où les proportions goethite/quartz sont égales à 0/100 et 100/0 (mesures réalisées sur les phases pur), respectivement les valeurs de PZC valent 4 et 10 ce qui est en bonne accord avec les valeurs de la littérature. Pour les rapports goethite/quartz intermédiaires, le PZC baisse avec l'ajout de quartz ainsi que la charge et le calcul de la charge de chaque mélange concorde avec les résultats expérimentaux issus du dosage.

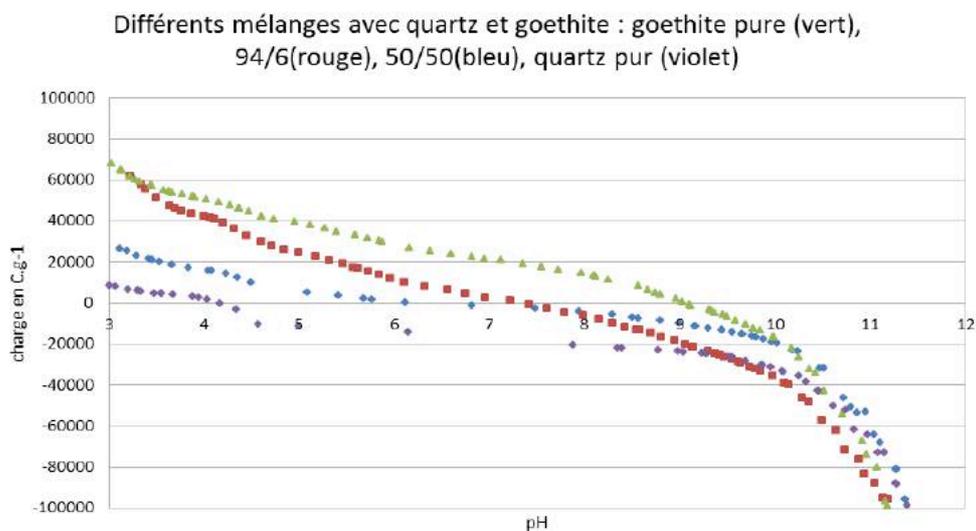


Figure 15 Courbe de charge des mélanges goethite-quartz

6.2.3.2.3 Mélange Antigorite-Quartz

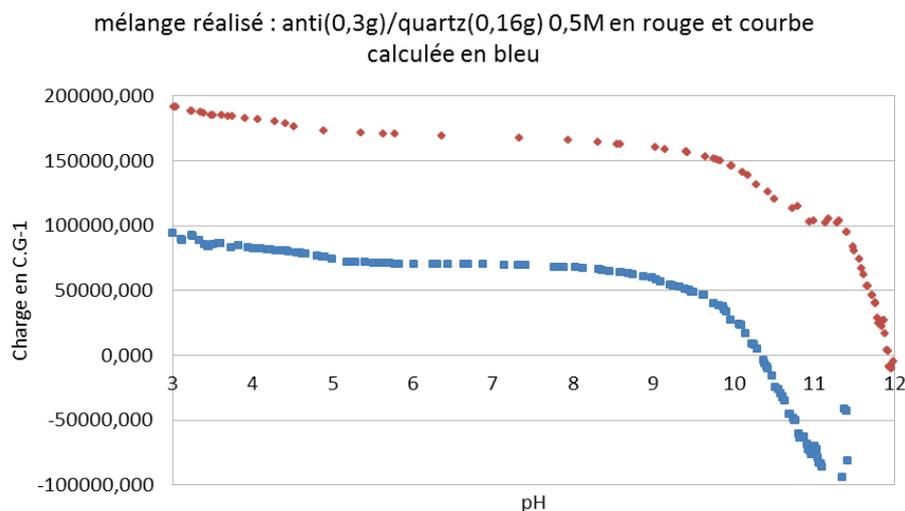


Figure 16 Courbe de charge du mélange antigorite-quartz

Une détermination de la charge de surface des particules à été mise en œuvre sur un mélange antigorite/quartz. Dans ce cas, le calcul de la courbe de charge est différent de

l'expérience. La charge ainsi que le PZC sont plus grands que ceux de l'Antigorite seule alors que l'ajout de quartz devrait abaisser ces valeurs. Il semble que les données obtenues soient décalées par rapport aux données obtenues par le calcul bien que les courbes aient des allures similaires. Ceci pourrait s'expliquer par des déplacements d'équilibres chimiques dues aux mélanges de deux phases minérales de compositions proches.

6.2.3.3 Dosage des mélanges naturels

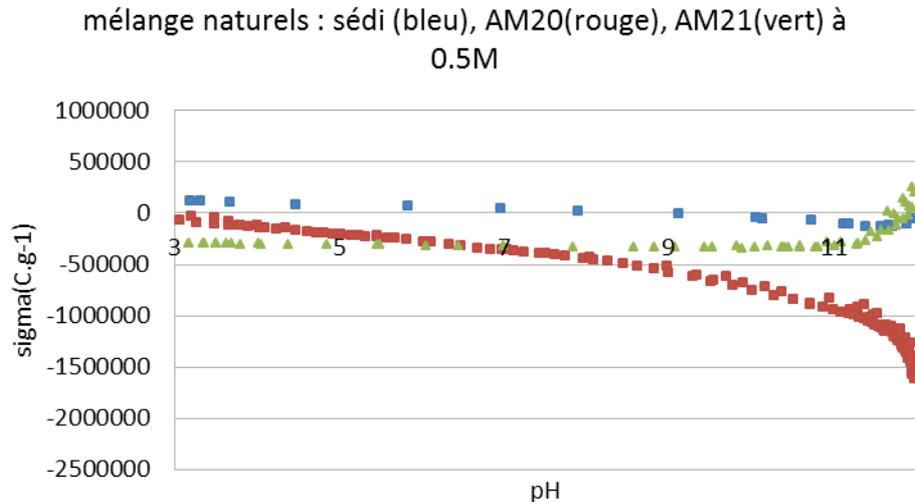


Figure 17 Courbe de charge des mélanges AM20, AM21 et sédimentation

Sont présentés ici trois mélanges de particules prélevées à différents moments au cours de l'année par le préleveur automatique. Les compositions sont proches mais pas identiques et les échantillons ont été concentrés 20 fois afin d'observer les effets des charges. On remarque cependant des comportements bien différents suivant les échantillons. Ces comportements, sont liés aux équilibres de charges entre les différences phase minérales, équilibres associés aux équilibres acido-basiques entre surfaces. Ainsi, les effets de charges de particules, constituant nos échantillons, sont non négligeables et il est possible d'en mesurer les effets, au moins de façon qualitative.

6.2.3.4 Conclusion des mesures de charges de surfaces

Ces mesures nous ont permis de montrer, concernant les dosages effectués sur les particules seules, que nos échantillons, issus des milieux naturels, ont des valeurs de point de charge nuls, et des comportements de charge de surface en fonction du pH du milieu, comparables aux données de la littérature.

Les mesures effectuées sur les mélanges de particules nous permettent de mettre en évidence les équilibres acido-basiques associés à la charge globale des surfaces minérales qui composent l'échantillon. Dans le cas des mélanges goethite/quartz et antigorite/quartz, il est possible de retrouver les valeurs de charge de surface globale mesurées en utilisant la somme des charges des constituants seuls pondérée par leurs proportions.

Enfin, les mesures réalisées sur les échantillons prélevés sur le bassin versant de Poro, montrent, de même, un comportement de la charge global intermédiaire par rapport aux comportements de la charge de chaque la phase minérale prise indépendamment. Ce comportement est représentatif d'équilibre acido basiques d'ensemble au sein de l'échantillon pour lesquels certaines phases sont chargées positivement et d'autres négativement, ce qui peut engendrer des phénomènes d'auto-coagulation entre particules et influencer leur sédimentation.

6.3 Phénomènes d'agrégation et de sédimentation.

L'objectif de cette partie est d'obtenir des données tels que la nature des agrégats, l'importance des effets électrostatiques au cours de cette agrégation ou encore quelques informations sur les vitesses de sédimentation.

6.3.1 Agrégation des particules

Une mesure des tailles de particules de l'échantillon AM 20 a été effectuée en fonction du temps sur un granulomètre mastersizer 2000. L'échantillon est introduit dans de l'eau distillée puis soumis à des ultrasons pendant 1 minute. Les distributions à $t=0$, 51, 75, 639, 728, 1003 s, sont représentées sur la Figure 18 : Evolution de la distribution de taille au cours du temps mesurée au Master Sizer pour l'échantillon AM 20 au pH de l'eau distillée.

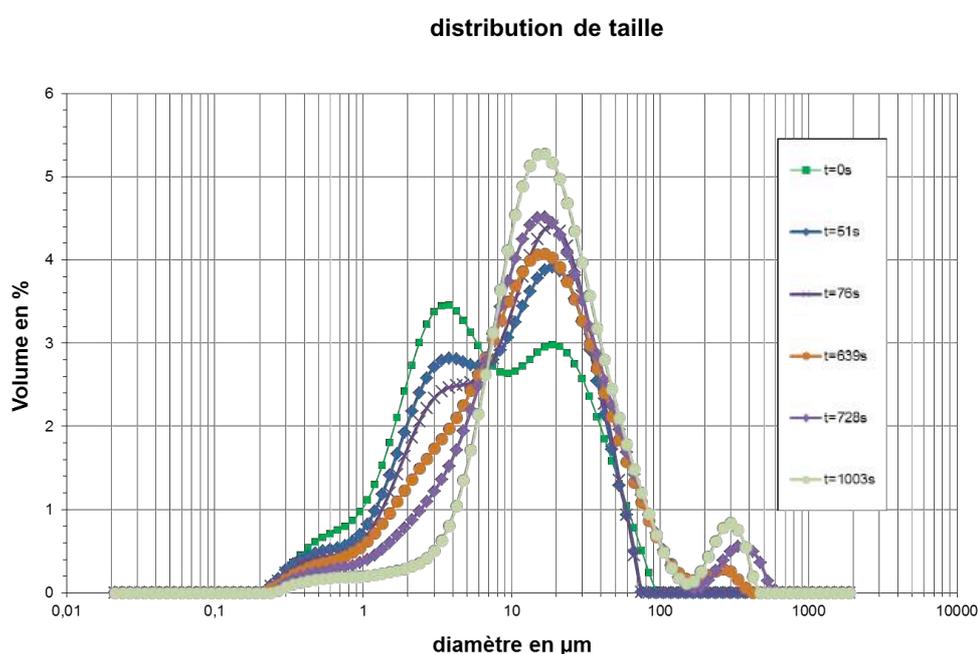


Figure 18 : Evolution de la distribution de taille au cours du temps mesurée au Master Sizer pour l'échantillon AM 20 au pH de l'eau distillée.

On note une diminution des particules d'un diamètre de 3 µm pour former, dans un premier temps, des objets d'une taille de l'ordre de 15 µm puis ensuite de l'ordre de 300 µm. Ceci est représentatif de l'agrégation de particules fines de 3 µm pour former des amas dont la taille est 10 fois supérieure.

Le Tableau 3 Rayons des particules primaires, rayon de giration et dimension fractales des échantillons AM20, AM 21, Goethite et sédiment présente les données dimensionnelles (rayons des particules primaires, rayon de giration des échantillons AM20, AM21, Goethite et sédiment). Les valeurs de taille de particules primaires de ce tableau ont été obtenues à partir de l'ajustement des courbes de diffusion de lumière tel qu'il est décrit au paragraphe 5.3. Les valeurs de taille des particules primaires, est de l'ordre de quelques centaines de nanomètre et sont comparables aux valeurs observées en microscopie électronique sur ces échantillons. Cette information, nous permet de montrer les tailles mesurées, à l'aide du mastersizer, sont bien généralement, des tailles d'agrégats et que les particules minérales qui les constituent sont des objets à l'échelle de quelques centaines de nanomètres.

Echantillon	Rayon des particules primaires (en m)	Rayon de giration (en m)
AM20	$3,42.10^{-7}$	$1,63.10^{-5}$
AM21	$3,26.10^{-7}$	$1,99.10^{-5}$
Goethite	$3,17.10^{-7}$	$1,86.10^{-5}$
Sédiment	$3,22.10^{-7}$	$9,03.10^{-6}$

Tableau 3 Rayons des particules primaires, rayon de giration et dimension fractales des échantillons AM20, AM 21, Goethite et sédiment

6.3.2 Vitesses de sédimentation

Dans cette partie, notre objectif est d'étudier l'effet des interactions électrostatiques entre particules sur les mécanismes de sédimentation. Pour cela, nous avons filmé la sédimentation d'échantillons en faisant varier leur pH, paramètre qui modifie l'état de charge de surface des particules.

6.3.2.1 Goethite

Les images des sédimentations des particules de Goethite au temps $t = 80$ s et à différents pH sont représentées sur la Figure 19 Images des échantillons de Goethite au temps $t = 80$ s et à différents pH.. On peut observer qu'il n'y a quasiment pas de sédimentation pour les pH 3.2 – 4.2 - 5.8 - 6.1 - 9.1 - 9.9 - 11 mais juste un éclaircissement progressif et la formation d'un dépôt de hauteur très faible au fond. De pH 6.6 à pH 8.1 le phénomène de sédimentation s'effectue en bloc et de façon plus marqué que pour les autres valeurs de pH. Sur aucun des films on ne voit la formation d'agrégats macroscopiques. A priori, on ne peut pas distinguer la formation d'agrégats à l'échelle macroscopique. Les vitesses de sédimentations établies par 6 traitements des données différents, sont représentées sur la Figure 20 Vitesse de sédimentation en fonction du pH pour l'échantillon Goethite. Les six méthodes de traitement utilisées sont décrites dans le « chapitre matériel et méthode ». Les figures 22 et 23 montrent que ces phénomènes de sédimentation sont d'avantage visibles pour de pH au centre de la gamme alors ces phénomènes sont plus lents ou pour des faibles et hauts pH.

Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de comportement de charge de la goethite. Ce minéral, dans l'eau, a d'avantage de charge de surface pour des faibles pH (charges positives) ou pour des hauts pH (charges négatives) que pour les pH intermédiaires. Ainsi la sédimentation des particules de goethite, pour ces pH intermédiaires, est induite par le manque de charge qui permet une rapide formation de plus gros agrégats ce qui augmente leur vitesse de sédimentation. Nous pouvons remarquer que la gamme de pH pour laquelle les particules de goethite flocculent est centrée sur la valeur 7,3 environ. Les mesures du PZC de la goethite (cf chapitre précédent) donnent une valeur de 9. Cette diminution de la valeur du PZC des goethites peut être expliqué par la présence d'ion carbonate qui décale vers le bas ce paramètre lorsque les manipulations ne sont pas réalisées sous atmosphère inerte [34].

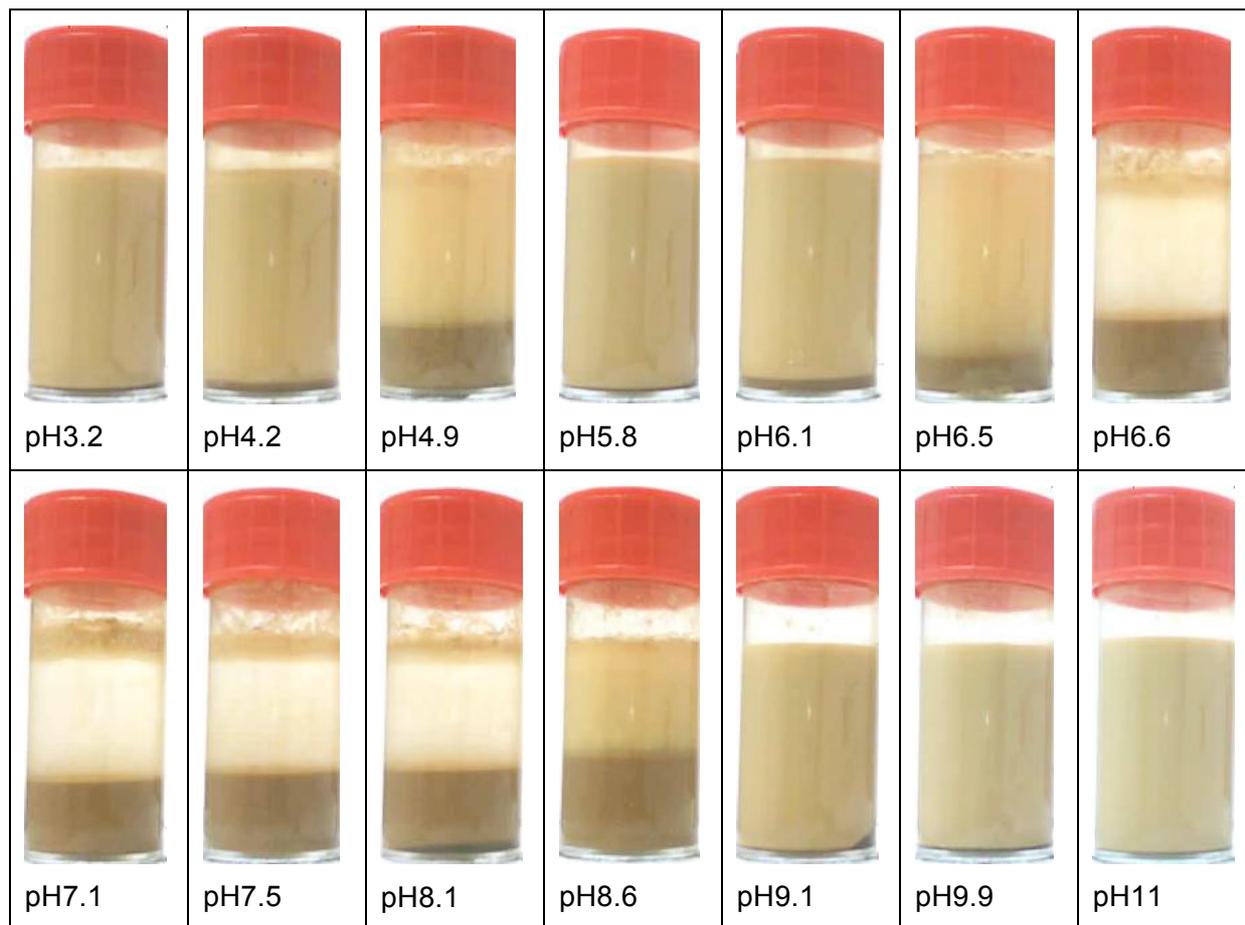


Figure 19 Images des échantillons de Goethite au temps $t = 80$ s et à différents pH.

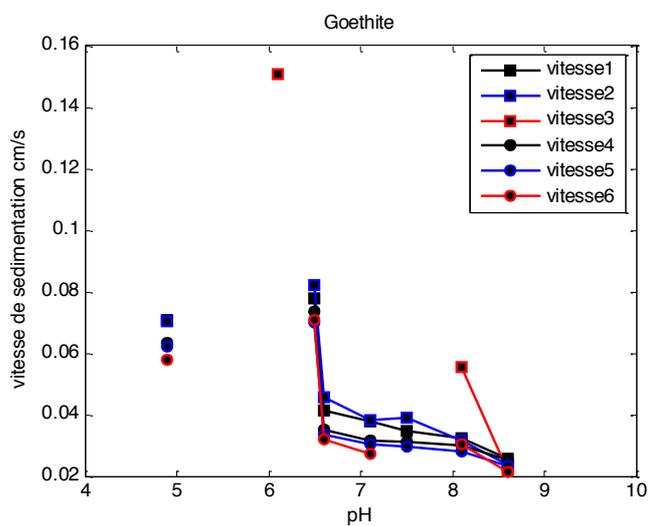


Figure 20 Vitesse de sédimentation en fonction du pH pour l'échantillon Goethite.

6.3.2.2 Echantillons AM20

L'expérience suivante a été réalisée sur un échantillon prélevé le long du bassin versant de Poro.

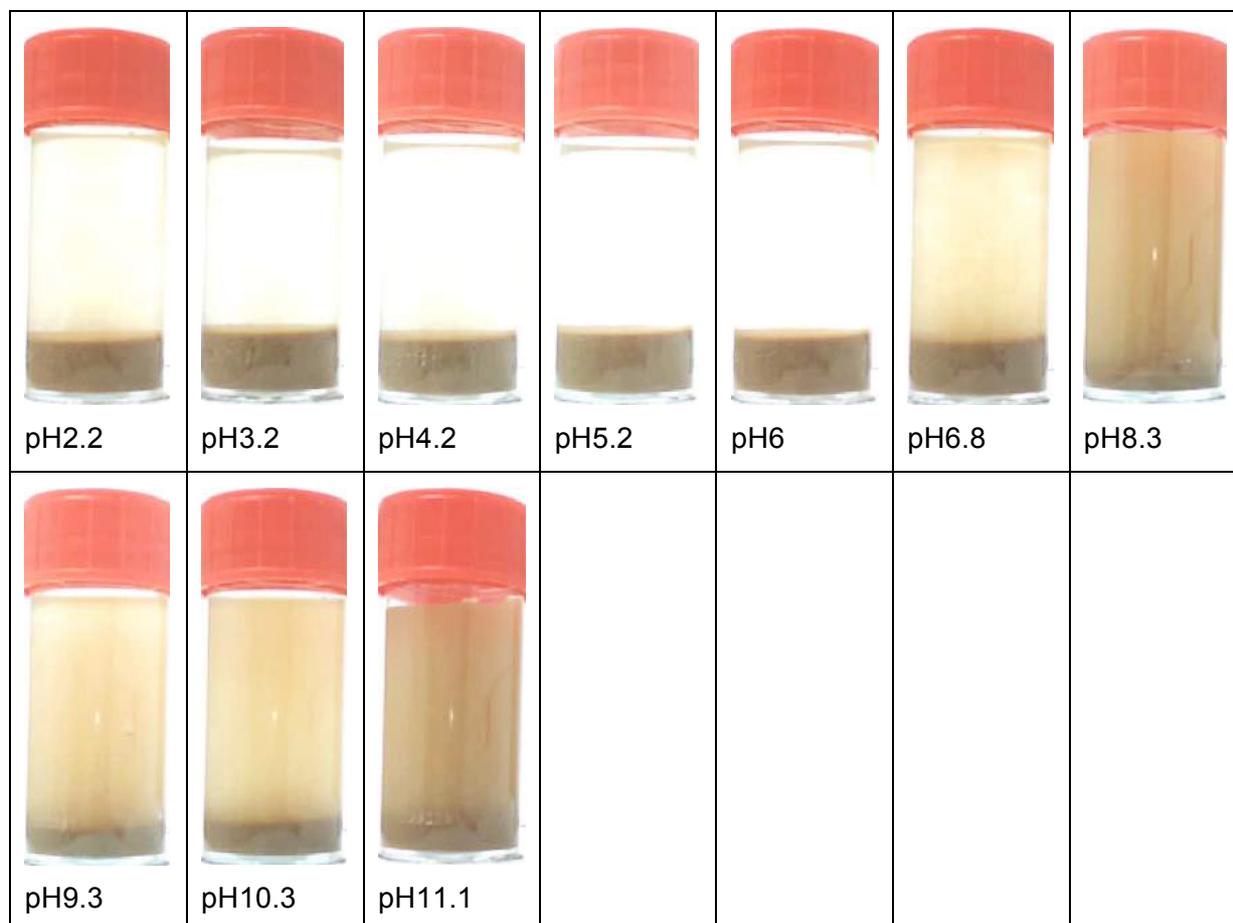


Figure 21 Image des échantillons AM20 à 80 s pour différents pH.

La Figure 21 Image des éch. montre que l'échantillon AM 20 a un comportement de sédimentation qui diffère de celui de l'échantillon Goethite pur. Pour les faibles valeurs de pH 2,2 – 3,2 - 4.2 - 5.2 – 6 -6,8, on observe que les matières en suspensions sédimentent en bloc laissant un surnageant très clair. Pour un pH de 8,3 et 11.1, il n'y a plus de sédimentation en bloc et un faible dépôt est visible. Cependant, la partie supérieure de l'échantillon reste très turbide avec une couleur brune. Enfin pour les pH 6,8 - 9,3 et 10,3, le front est nettement moins marqué par rapport aux échantillons de plus bas pH. Le surnageant reste turbide avec une couleur plus claire que le surnageant observé dans le cas des expériences à pH 11 et 8. Les calculs de vitesse de sédimentation (figure Figure 22 : Vitesse de sédimentation en fonction du pH pour l'échantillon AM20) sont cohérents avec les observations macroscopiques.

Le comportement de sédimentation des échantillons est donc très différent de celui de la goethite qui pourtant est la phase minérale majoritaire dans cet échantillon. Des premières hypothèses d'interprétation sont schématisées sur la Figure 23 : Schéma d'hypothèse pour l'interprétation du mécanisme de sédimentation de l'échantillon AM20. La différence de comportement de cet échantillon AM20 par rapport à celui de la goethite pure est particulièrement observable pour les bas pH où une sédimentation est visible, alors qu'aux mêmes pH la sédimentation de l'échantillon de goethite est lente. Une des hypothèses que

l'ont peut avancer pour expliquer ces phénomènes est l'existence d'hétérocoagulation entre les différentes phases minérales qui, suivant le pH du milieu, peuvent avoir des surfaces de charges opposées. La charge est négative pour l'antigorite et la goethite et positive pour le quartz et la willemsite. Pour cette dernière phase minérale, on suppose que son comportement de charge de surface est proche de celui du Talc [35], aucune donnée spécifique lui sont à priori consacrée. Ce phénomène a été décrit, par exemple, par Voorn et col. [36], qui ont observé l'agrégation de particules de latex sur des particules de gibbsite. Ces auteurs ont pu montrer une forte agrégation des deux types de particules, de charges opposées, pour un rapport du nombre de particules de latex/nombre de particule de gibbsite égale à 75.

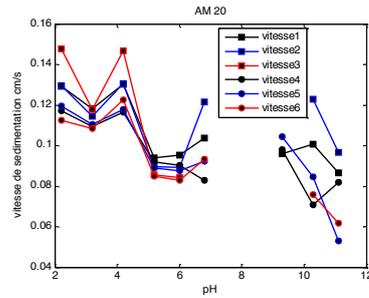


Figure 22 : Vitesse de sédimentation en fonction du pH pour l'échantillon AM20

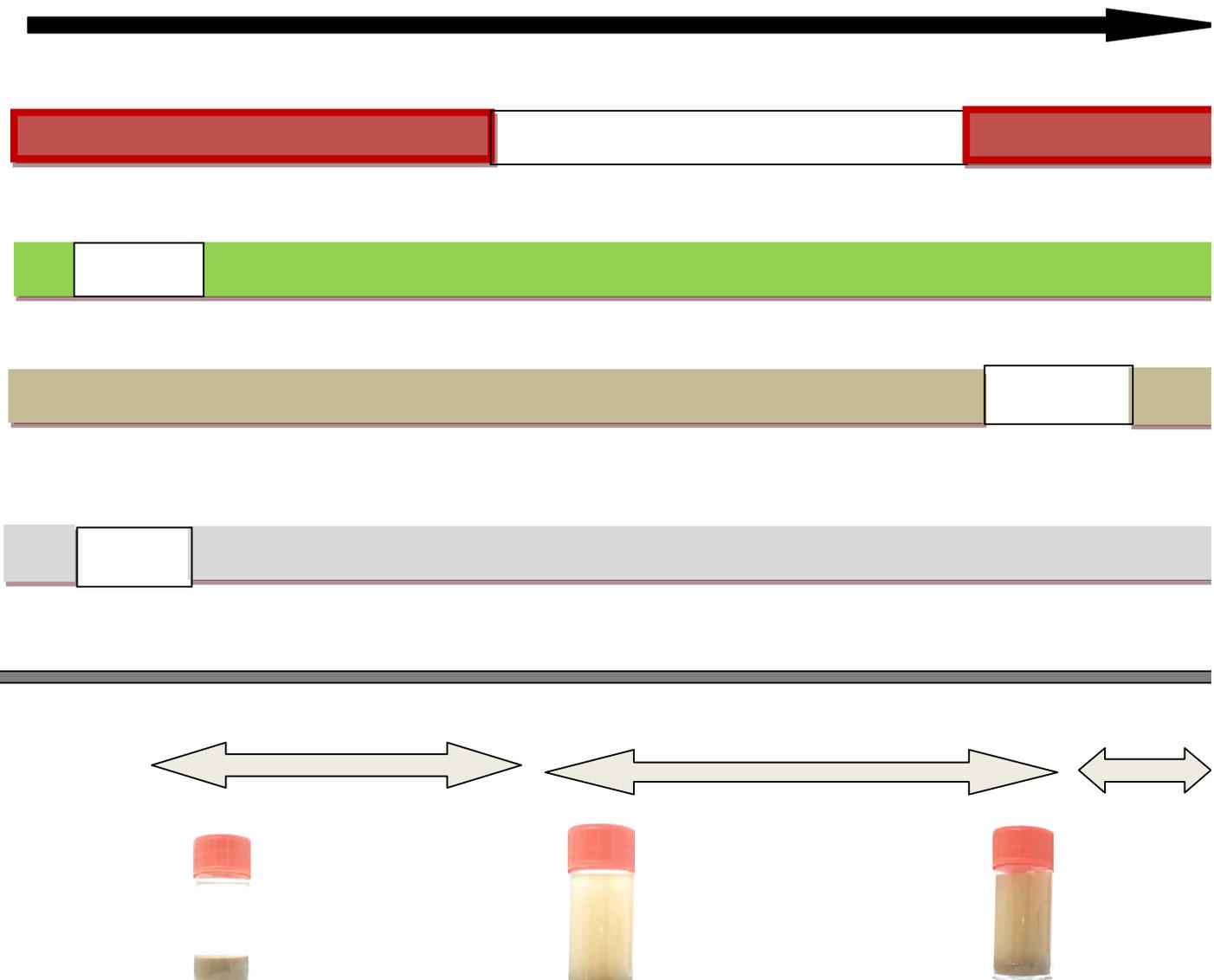


Figure 23 : Schéma d'hypothèse pour l'interprétation du mécanisme de sédimentation de l'échantillon AM20

Pour des pH compris entre 6,8 et 10,3, les particules chargées négativement sont dans des gammes de pH où elles sont peu chargées (6,8 à 9,5 pour la goethite, 9,5 à 11,5 pour les autres antigorite). Les particules de goethite, pour les plus bas pH de cette gamme ne participent plus à la formation d'agrégats engendrés par les charges opposées entre particules. Le surnageant, bien que turbide, a une couleur beaucoup plus claire, ce qui suppose que ce sont les phases d'antigorite et de willemseite qui sont d'avantage restées en suspension. Enfin pour la gamme de pH supérieure à 10,3 toutes les particules sont chargées négativement et interagissent via des interactions répulsives. A pH=8,3, la sédimentation semble lente et le surnageant conserve une couleur brune caractéristique des particules de goethite. Pour cette valeur de pH, de façon ponctuelle, les interactions sont a priori différentes. Il est difficile de donner, à ce stade, une explication détaillée de ce phénomène intermédiaire. Mais, on pourrait considérer que pour ce pH, les particules de goethite retrouvent une charge qui limite leur sédimentation. Néanmoins, il faut être prudent car cela pourrait être imputable à un artéfact de manipulation.

6.3.2.3 Echantillon AM21

Une expérience similaire a été réalisée sur l'échantillon AM21 pour différents pH (Figure 24 : . Une image est enregistrée au temps t=80s.



Figure 24 : Image des échantillons AM21 à 80 s pour différents pH

Figure 26 : Hauteur du front en fonction tu temps pour l'échantillon AM21.

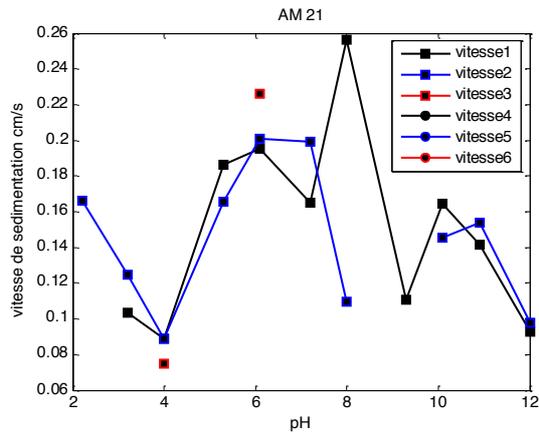
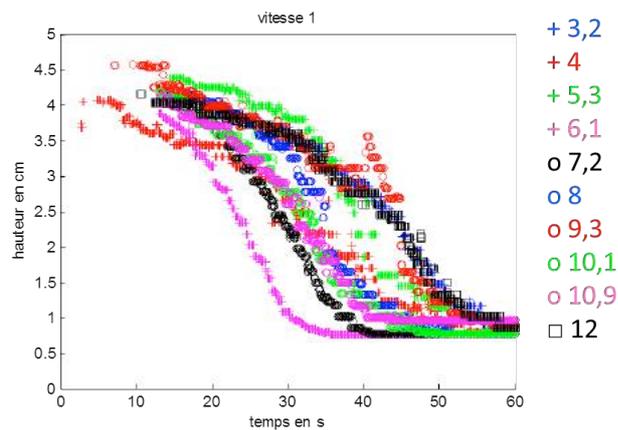


Figure 25 : Vitesse de sédimentation en fonction du pH



Pour AM21, on n'observe pas de sédimentation en bloc. En revanche, un éclaircissement progressif de la suspension est visible. Cet éclaircissement est accompagné d'un dépôt qui semble toujours avoir quasiment la même hauteur. Celui-ci est de faible épaisseur mais la suspension ne doit pas être assez concentrée pour pouvoir former des agrégats macroscopiques. Il est aussi possible de constater que les échantillons à pH=6,1 et pH=7,2 ont une coloration plus claire qui est révélatrice d'une sédimentation de la goéthite. La Figure 25 : Vitesse de sédimentation en fonction du pH montre aussi que la vitesse de sédimentation est plus rapide pour ces pH. Un graphique de la hauteur des fronts de sédimentation en fonction du temps est représenté sur la Figure 26 : Hauteur du front en fonction du temps pour l'échantillon AM21 pour plusieurs échantillons de pH différents.

Les courbes obtenues ont une allure sigmoïdale de pentes relativement proche ce qui implique que la vitesse de sédimentation, dans chaque cas, est similaire dans l'ensemble. En revanche, les temps nécessaires pour lesquels la chute du front se déclenche, varient de

façon importante en fonction pH de l'échantillon. Si on s'intéresse on temps $t=30$ s, les fronts les plus bas sont ceux des échantillons à $\text{pH}=6,1$ et $\text{pH}=7,2$ ce qui en bon accord avec les mesures de vitesses de sédimentation et les observations macroscopiques. A $\text{pH} 8$, la différence des vitesses V_1 et V_2 montre une sédimentation de deux phases de l'échantillon (une phase qui sédimente rapidement et l'autre qui est plus lente).

Ce résultat va dans le sens d'une sédimentation de la goethite avant les autres particules. Ce phénomène, bien qu'il semble atténué par l'aspect turbide de l'échantillon, est similaire à la celui qui a été observé aux $\text{pH} 6,2$ et 7 de façon macroscopique. Le faible contraste du front ne nous a pas permis, dans ces cas, d'utiliser les données des vitesses V_1 et V_2 .

6.3.2.4 Echantillon sédiment

Une expérience identique aux précédentes, acquisition vidéo d'échantillon au cours des sédimentations, a été réalisée pour l'échantillon « sédiment » à différents pH.

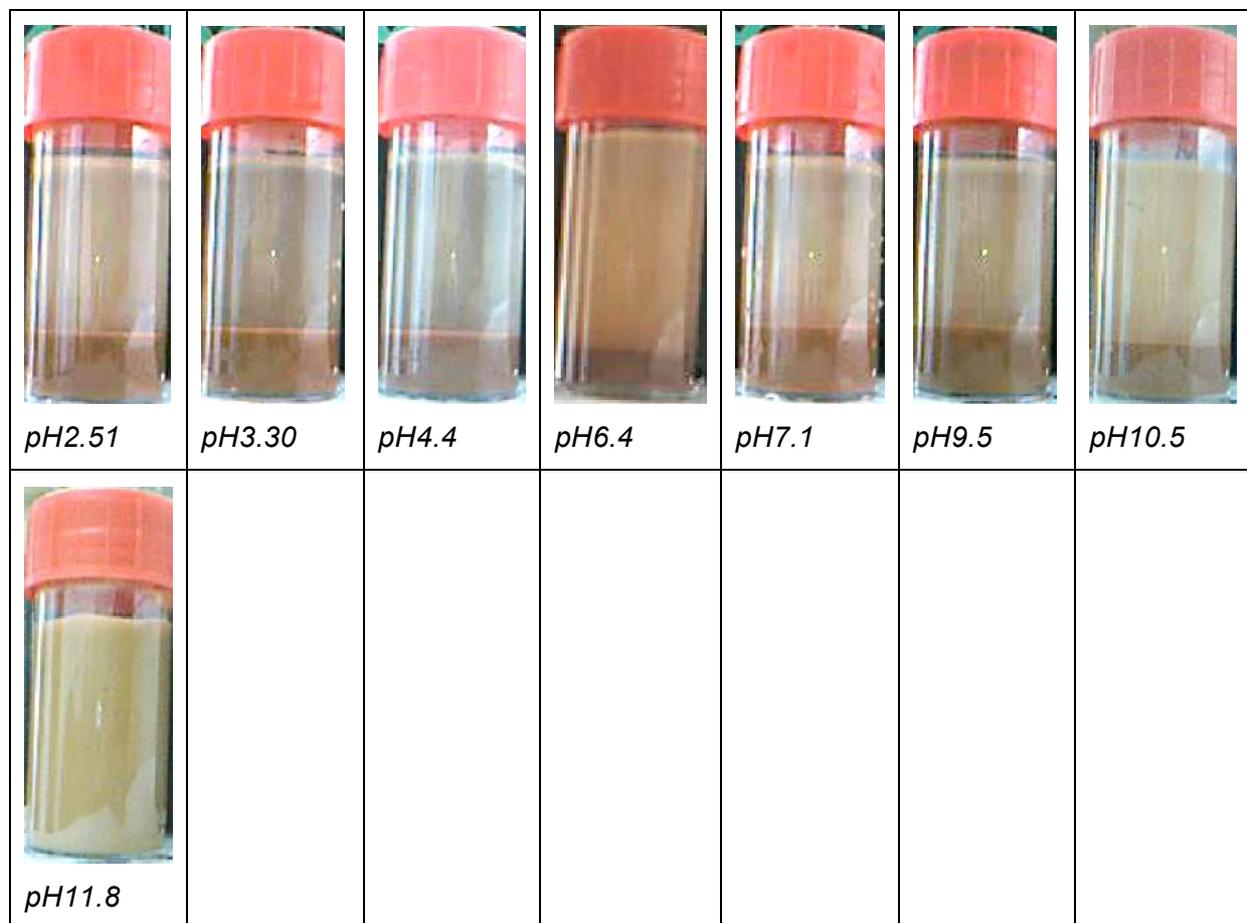


Figure 27 Image des échantillons sédiments à 80 s pour différents pH

La Figure 27 montre, comme dans les cas précédents, les images des échantillons au bout de 80 s. On retrouve, de façon générale, le comportement de l'échantillon AM 20. L'échantillon à $\text{pH}=11,8$ ne sédimente pas, ce qui avait été expliqué précédemment par le fait que pour ce pH toutes phases minérales en présence sont chargées négativement ce qui limite la formation d'agrégats. Pour les échantillons préparés avec des pH inférieurs à 6,4, on

retrouve une sédimentation en bloc que l'on avait comparé aux phénomènes d'hétérocoagulation.

Pour les valeurs de pH intermédiaire 6,4 à 10,5, donne une impression de floculation en bloc des échantillons. Les mesures de vitesses de sédimentation (Figure 28 : Vitesse de sédimentation en fonction du pH pour l'échantillon « sédiment », au contraire, sont plus faibles dans cette gamme. Les mécanismes de sédimentation et floculation sont donc ralentis comme c'est le cas pour l'échantillon AM 20.

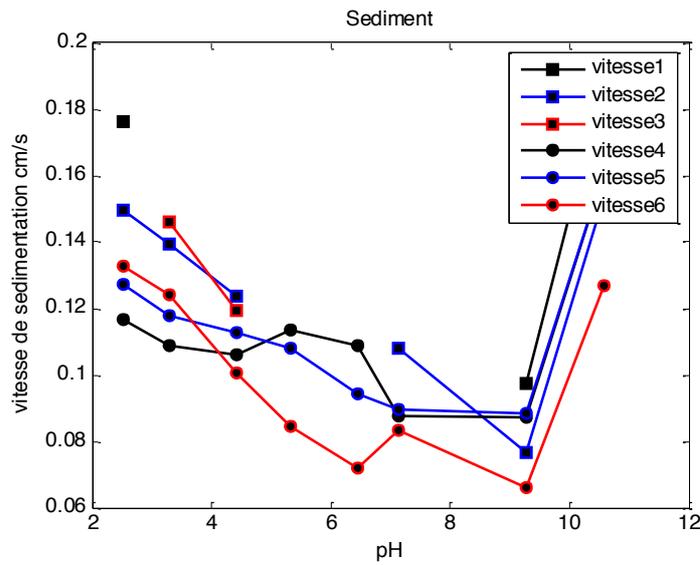


Figure 28 : Vitesse de sédimentation en fonction du pH pour l'échantillon « sédiment »

6.3.3 Evolution des vitesses en fonction de la conductivité

L'étude de la sédimentation des particules s'effectue maintenant pour une valeur de pH constante égale à 6,44 mais en faisant varier leur conductivité. La méthode de traitement utilisée est la méthode décrite par Sutherland et col [37].

Pour l'ensemble des conductivités, un front net de sédimentation apparaît au sein de l'échantillon (Figure 30 : Images des échantillons « sédiment » à t=80s pour différentes valeurs de la conductivité. A 80 s un surnageant turbide est visible, ce qui prouve que l'ensemble des phases minérales n'ont pas sédimenté.

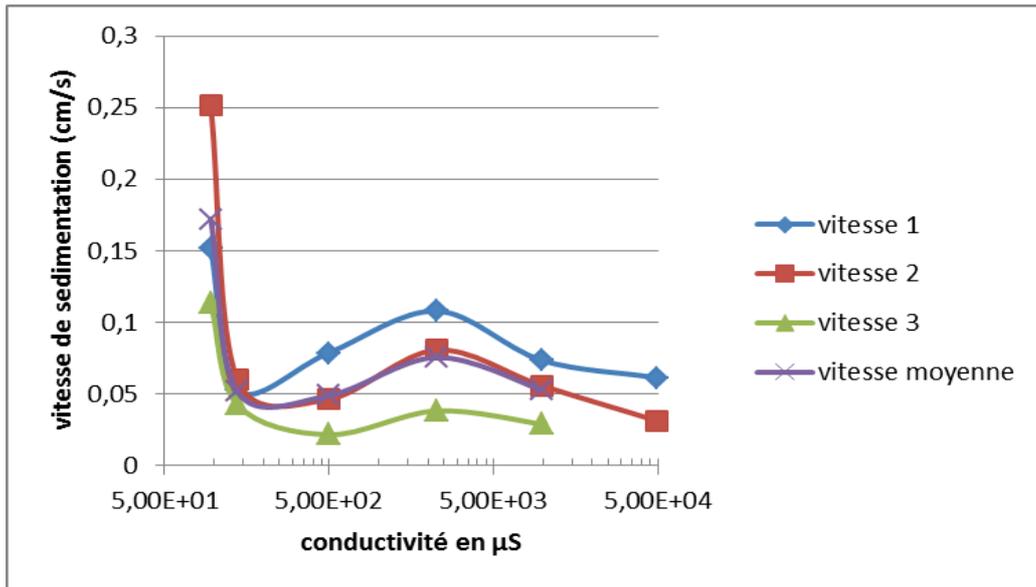


Figure 29 Vitesses de sédimentation des particules en fonction de la conductivité du milieu.

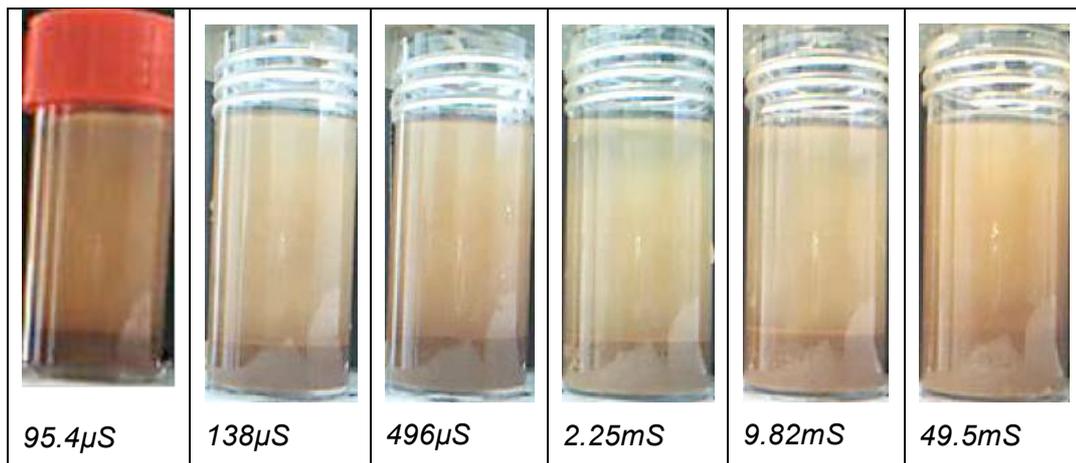


Figure 30 : Images des échantillons « sédiment » à t=80s pour différentes valeurs de la conductivité

Sur la (Figure 29 Vitesses de sédimentation des particules en fonction de la conductivité du milieu. sont représentées les vitesses de sédimentation en fonction de la conductivité de l'échantillon. L'échantillon qui a la conductivité la plus forte chute le plus rapidement. La force ionique étant corrélée à la conductivité de l'échantillon, on retrouve logiquement le phénomène d'écrantage des charges électrostatiques qui accélère la formation des agrégats et la sédimentation de l'échantillon. Pour la valeur de 2,25 ms les vitesses de sédimentation ont l'écart le plus important, ce qui est représentatif d'une sédimentation partielle d'une phase minérale avant les autres. Ceci peut être expliqué par le fait que la force ionique du milieu, associée à une valeur de 2,25 ms, permet de compenser les charges électrostatique d'une ou plusieurs phases minérales mais pas de l'ensemble des phases.

6.3.4 Conclusion de la partie caractérisation des phénomènes de sédimentation

Les expériences de mesure des fronts de sédimentations nous ont permis de mettre en évidence que :

- La hauteur du front de sédimentation suit un comportement de type sigmoïde. La vitesse de chute du front est globalement toujours la même mais le déclenchement de cette chute varie en fonction des conditions de l'échantillon (pH, force ionique). Le mécanisme global est donc en deux temps avec une première étape de formation des agrégats puis une étape de chute de ces agrégats.
- Les mesures de taille de particules issues des dimensions fractales des échantillons nous montrent bien que les particules élémentaires sont de l'ordre de 300 nm.
- Pour la goethite, les mécanismes de sédimentation suivent le comportement de charge des particules avec une floculation plus rapide pour des pH proches du PZC des particules. La valeur de ce PZC étant plus faible que celles décrites dans la littérature.
- Le comportement d'un échantillon prélevé sur la zone de poro, dont la fraction massique en goethite est supérieure à 80 % (AM 21) montre un comportement analogue à celui de la goethite. Une phase minérale reste en suspension quand les particules de goethites sédimentent aux pH proches du PZC.
- Pour les échantillons dont la fraction massique en goethite est inférieure à 80 %, il est possible d'observer une floculation nette au bas pH que l'on peut comparer aux phénomènes d'hétéro-coagulation observés dans la littérature. Aux plus hautes valeurs de pH, l'échantillon reste stable, toutes les particules des différentes phases minérales ont une charge identique négative. Pour des valeurs de pH intermédiaires une sédimentation partielle des échantillons est visible après 80 s.
- La force ionique du milieu influence la vitesse de sédimentation mais cela est particulièrement vrai pour des valeurs de conductivité de l'ordre de 50 mS.

De façon plus générale ces expériences montrent que les comportements de sédimentations diffèrent en fonction de la composition des échantillons. Ces différences nous permettent de confirmer l'existence d'effets dus à la présence de charge électrostatique en surface des particules, effets qui influencent, de façon importante, leurs mécanismes d'agrégation. C'est particulièrement la première étape de formation des agrégats qui est impactée.

7 CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a été réalisée sur le petit bassin versant du site de Poro. Elle nous a permis de montrer, dans un premier temps, et en travaillant à partir des prélèvements réalisés différents prélèvements le long de ce bassin versant que :

- La composition des échantillons révélée par diffraction des rayons X, est représentative d'un mélange de Goethite en majorité, d'antigorite, de willemseite et de quartz. Proche de l'embouchure du bassin versant la quantité de goethite diminue.
- La taille des agrégats augmente le long du bassin pour diminuer au niveau de l'embouchure.

La dimension fractale des échantillons sont en moyenne proche de 1,8 ce qui correspond à des agrégats dont la croissance est limitée par leur diffusion. Les rayons de giration moyens sont de l'ordre de 10 μm , et la taille moyenne des particules élémentaires calculées à l'aide de dernier paramètre est proche de 300 nm.

- Les clichés de microscopie électronique réalisés sur les prélèvements montrent plusieurs types de particules minérales. Une majorité des particules ont des formes allongées avec des bouts francs et pointus (goethite), d'autre ont des allures de blocs rectangulaires (antigotite) ou de voiles flexibles (willemseite). Leurs tailles sont de quelques centaines de nm ce qui est en bon accord avec les résultats précédents.

Pour trois échantillons issus des prélèvements de terrain, et dont les proportions sont différentes, nous avons pu :

- Retrouver en partie les propriétés de charges décrites dans la littérature pour chaque nature de particules minérales différente. Il a aussi été possible de retrouver les valeurs des charges de surfaces globales des échantillons, constitués de mélanges de particules, à partir des sommes pondérées des charges de chaque phase constituant le mélange. Les mesures de charges de surfaces globales effectuées sur les échantillons prélevés ont montré des valeurs de ce paramètre, pour chaque phase minérale, qui dépendent de la composition du mélange.
- Obtenir des informations au sujet des mécanismes de sédimentation des échantillons issus de prélèvements et l'importance des charges de surfaces dans chaque cas. Des mesures de front de sédimentation, à différents pH, ont montré que la vitesse de chute de ce front reste globalement constante alors que le temps nécessaire pour déclencher cette chute varie fortement suivant les caractéristiques (pH, force ionique) de l'échantillon. L'image des échantillons et leur état de sédimentation sont très différents suivant leur pH. Cela peut être expliqué par des phénomènes d'agglomérations entre particules. Par exemple, il a été possible d'observer des phénomènes d'hétéro-coagulation, pour les faibles pH, et de sédimentation partielle pour les plus haut pH et cela dans le cas d'échantillons dont la concentration en goethite est inférieure à 80 %.
- Observer les effets de la force ionique sur les échantillons. Un effet de l'augmentation caractéristique de la vitesse de sédimentation est visible à partir d'une valeur seuil de concentration.

Ces résultats nous ont permis d'obtenir des précieuses informations concernant la nature des matières en suspensions et des facteurs qui influencent les mécanismes responsables de la formation des agrégats. De nombreuses questions, ont été aussi ouvertes et plusieurs perspectives de ce travail pourraient être envisagées. On peut citer en exemple des travaux complémentaires visant à approfondir les données par rapport à la nature des agrégats formés (phase minérales en présence notamment) où encore les mécanismes mis en jeu lors de la première étape de formation des agrégats avant leur sédimentation.

Néanmoins, ces résultats nous permettent de donner des indications concernant le transport des MES le long du bassin versant et la dépollution de MES dans les décanteurs.

Ces MES transportés sont constituées de l'ensemble des phases minérales vers l'embouchure. Les phases minérales de goethite sédimentent majoritairement quand la salinité de l'eau augmente. La taille des agrégats augmente au cours du transport. Ce n'est pas forcément la quantité de particules qui influence leur formation mais d'avantage les conditions qui permettent la diffusion des particules les unes vers les autres elles.

Les matières en suspensions sont constituées de particules élémentaires dont la taille est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres et qui s'agrègent en quelques dizaines de secondes pour former des agglomérats de dimensions plus importantes. Au cours de cette

première étape de formation des agrégats, l'état de charge de ces particules minérales dans l'eau influence fortement leur taille et nature finale. Une fois ces objets formés, le comportement de sédimentation s'effectue classiquement à l'aide des paramètres hydrodynamiques.

Pour accélérer la sédimentation dans les décanteurs, des flocculant organiques sont souvent utilisés. Leurs fortes affinités de ces molécules organiques, avec les surfaces minérales, leurs permettent de rendre les surfaces des particules minérales hydrophobes ce qui induit une sédimentation très rapide. Cependant, dans notre cas, les phases minérales sont différentes avec des charges de surfaces parfois opposées ce qui pourrait limiter leur efficacité. On a aussi recourt à d'autres solutions comme l'utilisation d'ions flocculants [20], mais suivant la nature des phases minérales en présence le type et la concentration des sels à utiliser peut être différente.

Une recommandation qui peut faite, à la lumière de ces résultats, est d'effectuer une analyse de la nature et des compositions des MES, pour chaque bassin de décantation. A partir de ces données, des tests préalables permettraient de sélectionner les meilleurs additifs, en fonction des phases minérales en présence, mais aussi leurs concentrations optimales. Une trop grande quantité serait inutile, une quantité trop faible ne permettrait pas l'atténuation des répulsions électrostatiques entre particules minérales.

8 BIBLIOGRAPHIE

- 1 Ac Jouon , S Ouillon, P. Douillet , J. P.Lefebvre, J. M. Fernandez ,X. Mari, J.-M. Froidefond, *Marine Geology* , 256 (2008) 36–48
- 2 Z. T. Bainbridge, E. Wolanski b,d, J G. Álvarez-Romero, S. E. Lewis, J E. Brodie, *Marine Pollution Bulletin*, 65 (2012) 236–248
- 3 R. J. Gibbs, D. M. Tshudy, L. Konwa, J. M. Martin, *Sedimentology* (1989) 36,987-999
- 4 Ac Jouon , S Ouillon, P. Douillet , J. P.Lefebvre, J. M. Fernandez ,X. Mari a, J.-M. Froidefond, *Marine Geology* , 256 (2008) 36–48
- 5 Z. T. Bainbridge, E. Wolanski b,d, J G. Álvarez-Romero, S. E. Lewis, J E. Brodie, *Marine Pollution Bulletin*, 65 (2012) 236–248
- 6 R. J. Gibbs, D. M. Tshudy, L. Konwa, J. M. Martin, *Sedimentology* (1989) 36,987-999
- 7 Y. Ran, J.M. Fu, G.Y. Sheng, R. Beckett, B.T. Hart, *Chemosphere* 41 (2000) 33-43
- 8 E. Montarges-Pelletier, L Jeanneau,P Faure., I. Bihannic. O. Barres, B. S. Lartiges, *Environ Geol* 53 (2007) 85–102
- 9 A.J. Mannin, K.R. Dyer, *Marine Geology* 245 (2007), 107–122
- 10 R.L. Soulsby, A.J. Manning,2, J. Spearman1 and R.J.S. Whitehouse, *Journal of Marine Geology* (2013), 1-12
- 11 R. P. C. Morgan, J. N. Quito, R. E. Smith, G. Govers, J. W. A. Poesen, K. Auerswald, G. Chiscis,D. Torri AND M. E. Styczen, *Earth Surf. Process. Landforms* 23 (1998), 527–544
- 12 C. Ankers, D. E. Walling, R. P. Smith, *Hydrobiologia*, 494 (1-3) 159-167
- 13 K.J. Wilkinson, J-C Nègre, J Buffle, *Journal of Contaminant Hydrology*, 26 (1997) 229-243
- 14 V. Chaignon, B.S. Lartiges, A. El Samrani, C. Mustin, *Water Research* 36 (2002) 676–684
- 15 V. Krivtsova, M.J. Howarth, S.E. Jones, A.J. Souza, C.F. Jago, *ecological modelling* 212 (2008) 37–52
- 16 A.Thill, S. Moustier, J. M. Garnier, C. Estournel, J.J. Naudin, J. Y. Bottero, *Continental Shelf research* 21 (2001) 2127-2140.
- 17 T. Grangeon, I. G. Droppo, C. Legout, M. Esteves, *Hydrol. Process.* 28, (2014) 4141–4155
- 18 H. W. Walker, M. M. Bob, *Wat. Res.* 35 (4), (2001) 875-882,
- 19 K. E. Searcy,A. I. Packman,1 E. R. Atwill,T.Harter, *Applied and Environmental Microbiology*, 71(2) (2005) 1072–1078
- 20 D Dihang, P.Aimar, J Kayem, S.N. Kougnou, *Chemical Engineering and processing*, 47 (2008) 1509-1519
- 21 F. Maggi, F. Mietta, and J. C. Winterwerp, *J. Hydrol.*, vol. 343, (2007), 43–55
- 22 F Maggi,., J.C., Winterwerp, *Physical Review E*, 69, (2004), 011405
- 23 A., Khelifa, P.S., Hill, *Journal of Hydraulic Research*, 44, (2006),. 390– 401
- 24 P., Tang, J., Raper, *Powder Technology*, 123, (2002),.114–125
- 25 Vahedi A., Gorczyca B., *Water Res.*, 46, (2012) 4188–4194
- 26 A. Thill, thèse de l'Université d'Aix-Marseille 3 (1999)
- 27 G. C. Bushell, Y. D. Yan, D. Woodfield, J. Raper, and R. Amal, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 95, (2002), 1–50
- 28 H.M. Rietveld, *J Appl. Cryst*, 2 (1969), 65
- 29 L. Lutterotti, S. Matthies and H. -R. Wenk,*Proceeding of the Twelfth International Conference on Textures of Materials (ICOTOM-12)*, 1(1999), 1599,
- 30 C. Taubaso et al., *Geoderma*, 12, (2004) 123–133

-
- 31 A. Thill, S. Lambert, S. Moustier, P. Ginestet, J.M. Audic, J.Y. Bottero, *Journal of Colloid and Interface Science*, 228 (2000) 386–392.
- 32 M. Kosmulski et al., *Journal of Colloid and Interface Science*, 353 (2011), 1–15.
- 33 M. Kosmulski, E. Maczka, W. Janusz, J. B. Rosenholm, *J. Colloid Interface Sci.*, 250 (2002), 99–103.
- 34 F Gaboriaud, J.J. Ehrthart, *Geochimica and cosmochimica acta*, 67(5) (2003) 967-983.
- 35 P. Huang, D. W Fuerstenau, *Colloid and surfaces A*, 177 (2001) 147-156
- 36 D.J. Voorn, W. Ming, J. Laven, J. Meuldijk, G. de Withb, A.M. van Herk, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 294 (2007) 236–246.
- 37 B. R. Sutherland, K. J. Barrett, and M. K. Gingras, *Environ. Fluid Mech.*, Juin. (2014).

1.5 Evolution de la chimie des eaux

Peggy Gunkel-Grillon et coll. (UNC)





Rapport de synthèse

Projet « **Fonctionnement des petits bassins versants miniers** »

Partie « **Evolution de la chimie des eaux** »

Travaux réalisés par :

**Peggy Gunkel-Grillon (UNC - laboratoire PPME),
Christine Laporte-Magoni (UNC - laboratoire PPME)
Nicolas Bazire (stagiaire M2 à l'UNC - laboratoire PPME)**

Novembre 2014

CNRT BV, Volet III- Evolution de la chimie des eaux

Travaux réalisés par : Peggy Gunkel-Grillon (UNC-laboratoire PPME), Christine Laporte-Magoni (UNC-laboratoire PPME) et Nicolas Bazire (stagiaire M₂ à l'UNC-laboratoire PPME)

Sommaire

- 1- Introduction
 - 2- Les objectifs des travaux de recherche
 - 3- Protocoles expérimentaux
 - 3.1- Echantillonnage d'eau
 - 3.2- Analyses d'eau
 - 3.3- Echantillonnage de sédiments
 - 3.4- Analyses physico-chimique des sédiments
 - 4- Résultats des analyses de sédiments
 - 4.1- Evolution des MES avec la pluviométrie
 - 4.2- Caractérisation physico-chimique des sédiments et MES
 - 5- Composition chimique de la fraction dissoute des eaux superficielles
 - 5.1- Evolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction
 - 5.2- Evolution de la concentration en solutés
 - 5.3- Evolution de la concentration en éléments métalliques majeurs
 - 5.4- Evolution de la concentration en ligands
 - 5.5- Evolution des concentrations en Fe, Mn, Al, Ni et Cr
 - 6- Evolution de la spéciation dans la fraction dissoute
 - 7- Les MES un vecteur de chrome hexavalent dans les eaux superficielles
 - 8- Conclusions et perspectives
- Références bibliographiques

1. Introduction

Les activités minières, une source d'éléments métalliques de la mine au lagon

Les massifs miniers sont riches en éléments métalliques dont certains sont potentiellement toxiques. Les processus d'érosion des massifs ultrabasiques représentent ainsi des apports importants de ces métaux potentiellement toxiques (Gad, 1989 ; Costa, 2003) aux écosystèmes littoraux (Ambatsian, 1997 ; Dalto, 2006 ; Fernandez, 2006 ; Marchand, 2011). Lors des fortes pluies, les terrains miniers mis à nu par l'activité minière sont érodés et les matériaux érodés sont transportés vers les écosystèmes littoraux (Andrefouët, 2002 ; Dupouy, 2008 ; Fuchs, 2012). Les eaux de ruissèlement de la mine au lagon sont alors enrichies en éléments métalliques et cet enrichissement concerne la fraction particulaire (fraction granulométrique supérieure à $0.45\mu\text{m}$) puisque les matières en suspension sont des particules terrigènes issues des massifs miniers. Mais cet enrichissement concerne également potentiellement la fraction dissoute (fraction granulométrique inférieures à $0.45\mu\text{m}$). Au cours de leur trajet, les matières en suspension d'origine minière, riches en éléments métalliques (Fe, Mn, Ni, Cr...), peuvent libérer les éléments métalliques qu'elles contiennent. Ainsi lors de son cheminement de la mine au lagon, la composition chimique de la fraction dissoute des eaux de surface peut évoluer. Le volet III de la réponse à l'appel à projet concerne alors l'étude de l'évolution de la chimie de la fraction dissoute des eaux de surface de la mine au lagon.

Importance de la spéciation des éléments métalliques sur leur mobilité, toxicité et biodisponibilité

La mobilité, la biodisponibilité (fraction d'une substance ayant la possibilité d'être absorbée et d'être utilisée par le métabolisme d'un organisme vivant) et la toxicité des éléments métalliques (M) dépend de leur forme chimique c'est-à-dire de leur spéciation (Gunkel, 2002; Acosta, 2011; Albuquerque 2011; Zeng, 2011 ; Pérez-Esteban, 2013). La spéciation dépend elle-même des conditions environnementales (pH, E_h , teneur en oxygène dissous, en matière organique et en ligands inorganiques, ...). Dans la phase particulaire, les métaux peuvent être présents sous forme de précipités tels que les hydroxydes $M(\text{OH})_{x(s)}$, les sulfures $(M_xS_y)_{(s)}$, coprecipités avec les oxydes et hydroxydes de fer et/ou de manganèse, coprecipités avec les carbonates d'éléments majeurs ou coprecipités avec les sulfures de fer et manganèse. Dans la phase particulaire, ils peuvent également être adsorbés à la surface de particules minérales ou organiques. Si le métal est adsorbé à la surface des particules, il peut alors être facilement remobilisé vers la phase aqueuse, simplement par remise en suspension des sédiments comme cela a été démontré pour le zinc et le plomb (Superville, 2014). Dans la phase dissoute, ils peuvent être libres sous forme de cation métallique ($M^{x+}_{(aq)}$), sous forme oxydée ($M_xO_y^{z-}_{(aq)}$), liés à des ligands organiques ou inorganiques dissous ($L_{(aq)}$) pour former des complexes ($ML^{x+}_{(aq)}$). La biodisponibilité des espèces métalliques en solution est également dépendante de leur spéciation en solution (Slaveykova, 2002 ; Worms, 2006). En effet, pour la plupart des espèces métalliques, l'internalisation dans un être vivant, qui nécessite une étape de transport à travers une membrane plasmique, n'est possible le plus souvent que pour l'espèce

métallique libre, même si des phénomènes d'endocytose ou de transport passif à travers la membrane plasmique sont possibles (Buffle, 1994). La présence de matière organique dissoute peut par formation de complexes stabiliser les contaminants métalliques en phase dissoute mais limiter les processus d'internalisation dans les tissus biologiques. De plus, les diverses formes chimiques d'un élément métallique n'ont pas la même toxicité. Le chrome par exemple est trouvé en solution aqueuse principalement sous forme d'ion $\text{Cr}^{3+}_{(\text{aq})}$ ou d'ion chromate $\text{CrO}_4^{2-}_{(\text{aq})}$. L'ion Cr^{3+} est beaucoup moins toxique que l'ion CrO_4^{2-} classé substance cancérigène (WHO, 1990). L'étude de la spéciation des éléments métalliques dans les eaux de surface dans un bassin versant minier est donc essentielle pour une meilleure estimation du risque écotoxicologique lié à la dispersion des éléments métalliques contenus dans les sédiments miniers.

2. Les objectifs des travaux de recherche

Evolution de la chimie des eaux de la mine au lagon et influence de la pluviométrie

Cette étude est une première approche qui ambitionne d'apporter des premiers éléments de réponse au sujet de l'évolution de la chimie des eaux de surface des petits bassins versants miniers. L'étude est réalisée pour diverses conditions pluviométriques afin d'appréhender la variation de la composition chimique (concentrations en éléments chimiques et spéciation des éléments métalliques) des eaux de surface avec la pluviométrie sur le site de Poro. Dans ce projet, nous souhaitons d'une part déterminer si la composition chimique des eaux de ruissellement des bassins versants miniers évolue sur le parcours de la mine au lagon et d'autre part déterminer comment elle évolue avec la pluviométrie. Il est attendu que la concentration en solutés, dont les éléments métalliques, diminue par dilution lorsqu'il pleut. Toutefois, les terrains amont lessivés par les eaux de pluie ainsi que les particules terrigènes transportées sous forme de matière en suspension (MES) sont riches en éléments métalliques et sont donc susceptibles de libérer des éléments métalliques. La dilution peut alors être compensée par la solubilisation d'éléments présents dans les particules terrigènes. L'étude de la réactivité des sédiments miniers est alors également nécessaire. L'étude est donc réalisée pour diverses conditions pluviométriques afin d'appréhender la variation de la composition chimique (concentrations en éléments chimiques et spéciation des éléments métalliques) des eaux de surface avec la pluviométrie sur le site de Poro. Les évolutions des concentrations en solutés en fonction de la pluviométrie sont sujettes à des phénomènes antagonistes de dilution et de remobilisation par solubilisation/désorption à partir des matières en suspensions ou à partir des terrains miniers dénudés (figure 1). Sur le parcours de la mine au lagon, l'espèce métallique dissoute $\text{M}_{(\text{aq})}$ peut également voir sa concentration diminuer par réaction de précipitation ou par changement d'état rédox (figure 1). Le suivi de l'évolution de la chimie des eaux a pour but de tenter de cerner les phénomènes et réactions prépondérantes impliqués dans la modification des concentrations en éléments métalliques dissous.

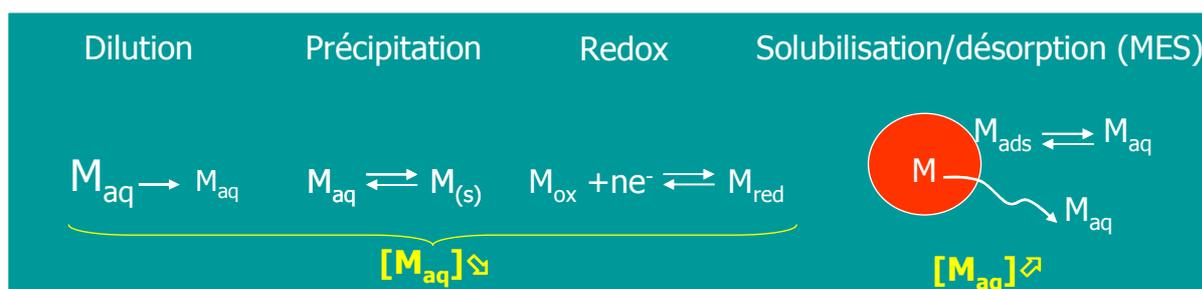


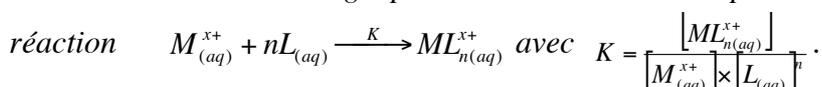
Figure 1 : phénomènes et réactions antagonistes susceptibles de modifier les concentrations en solutés et plus particulièrement en élément métallique M dans les eaux superficielles.

Sélection des paramètres nécessaires au suivi

Au vu des réactions et phénomènes antagonistes possibles, un grand nombre de paramètres doivent être suivis. Parmi ces paramètres, il y a le pH dont le rôle est essentiel dans les réactions de solubilisation/précipitation des éléments métalliques, le potentiel d'oxydoréduction mais aussi la composition en sel du milieu. Il est en effet reconnu que la salinité du milieu a une influence sur la mobilité des éléments métalliques (Acosta, 2011 ; Zhao, 2013). Les concentrations en cations métalliques majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) peuvent avoir un rôle important dans les réactions de solubilisation des cations métalliques tels que le fer (Fe^{3+}), nickel (Ni^{2+}), chrome (Cr^{3+}), manganèse (Mn^{2+}) ou aluminium (Al^{3+}) potentiellement adsorbés à la surface des matières en suspension (MES). Ces cations majeurs présents en fortes concentrations remplacent les éléments métalliques M_{ads} adsorbés à la surface des particules terrigènes par compétition pour les sites d'adsorption (figure 2-a). Le suivi des concentrations en éléments majeurs est alors essentiel pour la compréhension de la dynamique des éléments métalliques. La solubilisation des éléments métalliques contenus dans les particules terrigènes peut également être favorisée par la présence de ligand tel que la matière organique (Buffle, 1994 ; Yuan, 2007 ; Pérez-Esteban, 2013). En phase aqueuse, ces ligands sont des ligands plus ou moins forts, comme la matière organique dissoute (ligand généralement fort) ou les anions dont certains sont forts et d'autres plus faibles. Le tableau 1 présente les valeurs des constantes thermodynamiques d'équilibre pour la formation de complexes métalliques avec les anions. Plus cette constante est élevée ($\log K >$) plus le complexe est stable et donc plus l'anion concerné favorise le maintien de l'espèce métallique en solution. L'ion phosphate, cyanure et fluorure sont des ligands inorganiques pouvant favoriser le maintien en solution du fer, aluminium, chrome, nickel et manganèse. L'ion sulfate est également un ligand qui peut former un complexe stable avec le chrome.

$L_{(aq)}$ M^{x+}	PO_4^{3-}	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	CN^-	NO_3^-	Cl^-	F^-
Al^{3+}	$AlHPO_4^+$ 20.0	$Al_2(OH)_2CO_3$ 2+ 4.3	$Al(SO_4)_2^-$ 5.6	-	-	$AlCl^{2+}$ -0.4	$AlF_{3(aq)}$ 16.7
Fe^{3+}	$FeHPO_4^+$ 22.3	-	$Fe(SO_4)_2^-$ 5.4	$Fe_2(CN)_{6(aq)}$ 47.6	-	$FeCl^{2+}$ 1.5	$FeF_{3(aq)}$ 13.7
Cr^{3+}	$CrHPO_4^+$ 26.1	-	$Cr_2(OH)_2(SO_4)_{2(aq)}$ 17.9	-	$CrNO_3^{2+}$ 8.2	$CrCl^{2+}$ 9.3	$CrF_{3(aq)}$ 21.6
Ni^{2+}	$NiHPO_{4(aq)}$ 26.1	$NiCO_{3(aq)}$ 4.6	$NiSO_{4(aq)}$ 2.3	$Ni(CN)_4^{2-}$ 30.2	$NiNO_3^+$ 0.4	$NiCl_{2(aq)}$ -1.9	$NiF^+_{(aq)}$ 1.3
Mn^{2+}	$MnHPO_{4(aq)}$ 15.8	$MnCO_{3(aq)}$ 4.7	$MnSO_{4(aq)}$ 2.3	$Mn(CN)_{2(aq)}$ 4.1	$Mn(NO_3)_{2(aq)}$ 0.6	$MnCl_{2(aq)}$ 0.3	$MnF^+_{(aq)}$ 1.5

Tableau 1 : Valeurs de logK pour les réactions de complexation avec les principaux anions pour la



En résumé, les réactions de solubilisation d'un métal à partir des matières en suspension peuvent être une désorption de métal adsorbé à la surface des particules d'origine minière par compétition avec un cation majeur tel que par exemple Mg^{2+} (figure 2-a), la solubilisation de métal adsorbé par complexation avec un ligand L organique ou inorganique (figure 2-b) ou la solubilisation du métal M inclus dans les phases minérales plus ou moins bien cristallisées par formation de complexes si le ligand L est suffisamment fort (Figure 2-c). Le suivi du taux de carbone organique dissous et des concentrations en anions sont alors également essentiels pour cette étude.

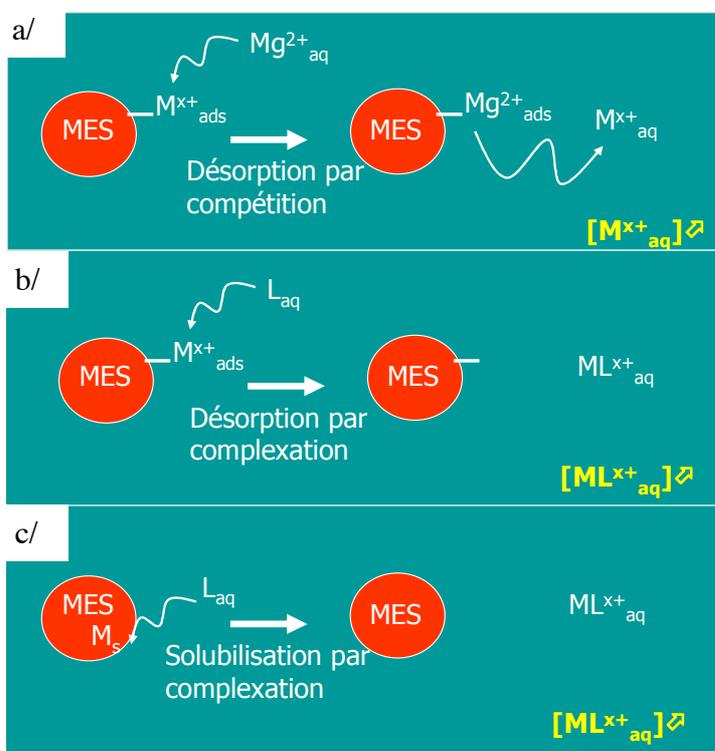


Figure 2 : Solubilisation des éléments métalliques adsorbés (M^{x+}_{ads}) à la surface des matières en suspension (MES) par compétition avec les cations majeures (a) ou par complexation avec des

ligands dissous (L_{aq}) (b). Solubilisation des éléments métalliques inclus dans les phases minérales (M_s) par complexation (c). La concentration en élément métallique augmente alors dans la fraction dissoute soit sous sa forme libre $M^{x+}_{(aq)}$ soit sous une forme complexée $ML^{x+}_{(aq)}$.

3. Protocoles expérimentaux

3.1 Echantillonnage des eaux superficielles

Les mesures ont été réalisées sur le site minier expérimental de Poro, conformément au cadrage de l'appel d'offre. Des échantillons d'eaux superficielles et de sédiments ont été collectés du 14 mars au 29 avril 2011 sans pluie significative 24h avant la collecte, après de faibles pluies (3.5 et 50.0mm/24h) et après de fortes pluies (100.0 et 135.2 mm/24h), ce qui fait un total de 5 prises d'échantillons d'eau. Les calculs de pluviométrie ont été réalisés grâce aux données météorologiques journalières disponibles pour la commune de Houaïlou.

Les échantillons d'eaux sont collectés dans des flacons neufs en polyéthylène haute densité (HDPE) et conservés à 4-6°C avant analyse.

Les prélèvements d'échantillons d'eau sont réalisés dans le site minier au niveau de la résurgence au sommet de la mine école de Poro (point A), à l'exutoire (point D) (Figure 3). Des échantillons d'eau sont également prélevés au niveau du village de Poro, dans la rivière (point E) et à son embouchure (point F) (Figure 1).

La rivière du village de Poro n'est pas alimentée uniquement par le bassin versant minier mais fortement influencée par ce dernier.



Figure 3 : Le centre minier de Poro, le village de Poro et les points d'échantillonnage sur mine (A= résurgence, B= décanteur amont, D= exutoire) et dans le village (E= rivière, F= embouchure).

3.2 Analyses de la fraction dissoute des échantillons d'eau

La quantification des matières en suspension (MES) dans les échantillons prélevés sont déterminées par filtration à l'aide d'un dispositif à filtration sous vide *nalgène* sur filtre préalablement séchés et pesés de porosité 0,45µm. Le filtrat est alors la fraction dissoute.

Les mesures réalisées sur la fraction dissoute sont le pH, le potentiel redox, la conductivité, la teneur en carbone organique, les concentrations totales en éléments métalliques de la fraction dissoute (nickel, chrome, cobalt, cuivre, fer, manganèse, aluminium), les concentrations totales en anions (chlorures, nitrates, phosphates, cyanures) et cations majeurs (calcium, magnésium, sodium, potassium). Les concentrations en chrome hexavalent ont également été déterminée par polarographie (voltampérométrie par redissolution en présence de DTPA, bulletin d'application Metrohm N° 116/3e) et par spectroscopie UV-visible après réaction avec le diphénylcarbazide ($\lambda=540$ nm).

Paramètres sous-traités	Normes
<i>Chrome total – eaux douces</i>	<i>NF EN ISO 15586</i>
<i>Carbone organique dissous – eaux douces</i>	<i>EPA 10129</i>
<i>Carbone organique dissous – eaux de mer</i>	<i>NF EN 1484</i>
<i>Oxygène dissous en mg/L et % - eaux douces et de mer</i>	<i>NF EN 25814</i>
<i>Titre alcalimétrique complet – eaux douces et de mer</i>	<i>NF EN ISO 9963 – 1</i>
<i>Cyanures libres – eaux douces et de mer</i>	<i>EPA 8027</i>
<i>Chlorures dissous – eaux douces</i>	<i>NF EN ISO 10304 – 1</i>
<i>Chlorures dissous – eaux de mer</i>	<i>NF EN ISO 9297</i>
<i>Sulfate dissous – eaux douces</i>	<i>NF EN ISO 10304 – 1</i>
<i>Sulfate dissous- eaux de mer</i>	<i>EPA 8051</i>

Tableau 2 : références des méthodes normées pour les analyses des paramètres physico-chimiques

Sur la fraction dissoute, plusieurs mesures ont été sous-traitées et réalisées selon les méthodes normées listées dans le tableau 2. Les dosages des concentrations totales en K, Na, Ca, Mg, Cr, Fe, Mn, Ni, Al, Co ont été réalisées par spectroscopie atomiques par atomisation de flamme ou atomisation électrothermique au laboratoire PPME.

3.1. Prélèvement de sédiments miniers

Des échantillons de sédiments sont prélevés sur le site minier au point B (au niveau du décanteur amont) et au niveau du point D dans le décanteur à l'exutoire (figure 1). 2 kg de sédiment sont prélevés à la bêche sur une profondeur de 0-30 cm, séchés à 45°C jusqu'à masse constante, tamisés à 2 mm et mélangés manuellement afin d'obtenir un échantillon homogène.

3.2. Analyses physico-chimiques des sédiments

La granulométrie des échantillons de sédiments ou des matières en suspension est déterminée par granulométrie laser (Malvern Mastersizer 2000).

L'identification des phases minérales est réalisée par diffraction des rayons X (Inel CPS 120).

Des réactions d'étude du comportement à la lixiviation ont également été réalisées sur les sédiments miniers dans le but de déterminer leur potentiel de libération du chrome. La concentration en chrome hexavalent échangeable est déterminé par extraction du chrome à partir de 1g de sédiment extrait en présence de 34 mL de KH_2PO_4 0.1M (1h, 20°C) puis par dosage dans le surnageant de la solution d'extraction du chrome hexavalent par spectroscopie UV-visible après réaction avec le diphénylcarbazine ($\lambda=540$ nm). Des études de cinétiques d'extraction du chrome en solution aqueuse ont également été réalisées pour différentes conditions de pH et ce pour une gamme de pH allant de 5.9 à 12.6. 6 g de sédiment sont extraits dans 30 mL d'eau déionisée dont le pH est ajusté au préalable par ajout de soude NaOH ou par ajout d'acide nitrique HNO_3 . La solution aqueuse est tamponnée avec un tampon MES ou MOPS 0.1M lorsque le pH souhaité est proche de la neutralité afin de contrer le pouvoir tampon des sédiments.

3.3. Modélisation de la spéciation de Al, Fe, Mn, Ni et Cr en solution

Les concentrations en éléments dissous étant analysés, il est possible de calculer, à partir de logiciels, la spéciation des éléments métalliques. Ce calcul est basé sur les calculs de complexation des espèces métalliques présentes avec les ligands disponibles dans le milieu. Le logiciel utilisé est Visual MINTEQ, version 3.0. La base de données de ce logiciel regroupe des valeurs de constantes d'équilibre pour la plupart issue de la base de données NIST Critically Selected Stability Constants of metals complexes : NIST 46.7.

4. Résultats des analyses de sédiments

4.1 Evolution des concentrations en matières en suspension

A l'exutoire du site minier (D), les teneurs en matières en suspension sont faibles (0.0028 ; 0.044 et 0.0012 g/L) pour les faibles pluviométries (0mm, 3.5 mm et 50 mm) mais peuvent augmenter pour les fortes pluviométries avec 0.0168 g/L et 0.257g/L pour respectivement 110 et 132.5 mm. **Ce résultat démontre que pour de fortes pluies une quantité significative de particules sédimentaires quittent le site minier.**

Dans la rivière et son embouchure du village de Poro (E et F), la concentration en MES peut devenir importante voir très importantes en cas de plus forte pluviométrie avec respectivement 0.0808g/L et 0.1336 g/L pour 110mm et 2.458 et 1.695 g/L pour 132.5 mm (figure 4).

Après de fortes précipitations, l'augmentation de la quantité de matière en suspension est visible à l'œil nu dans la rivière du village de Poro et au niveau de son embouchure puisque les eaux sont colorées en rouges (figure 5).

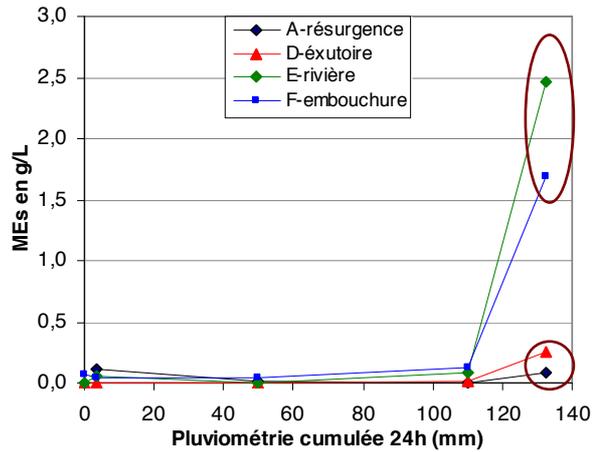


Figure 4 : Teneurs en matières en suspensions dans les échantillons d'eaux superficielles de Poro



Figure 5 : augmentation de la turbidité dans la rivière du village de Poro (E) et à son embouchure (F) après la forte pluie du 29 avril 2011(132.5 mm).

4.1. Caractérisation physico-chimique des sédiments miniers

Les sédiments miniers prélevés dans le décanteur au sommet du site minier (B) ou dans le décanteur à l'exutoire (D) ont des compositions chimiques très proches (figure 6). Ils sont composés

majoritairement d'oxydes de fer, de silicates, d'oxyde de magnésium, d'oxyde de nickel, d'oxyde d'aluminium, d'oxyde de chrome et d'oxyde de manganèse. Des analyses ont été réalisées sur des sédiments de différentes granulométries et les résultats sont proches des compositions présentées figure 6. Les sédiments prélevés à l'embouchure (F) ont également des composition chimiques proches mais dans des proportions différentes, la proportion de silicates étant inférieure et la proportion d'oxyde de fer supérieure.

Ces analyses ont toujours été réalisées sur des sédiments prélevés sur une profondeur maximale de 30cm. Nous n'avons donc pas étudié la potentielle modification des propriétés chimiques des sédiments dans des conditions anoxiques.

D'après ces résultats, les sédiments miniers du site de Poro sont alors principalement des sources, sous forme particulaire, de fer, silicium, magnésium, nickel, aluminium, chrome, manganèse et calcium vers les écosystèmes aval. Pour ce projet nous nous sommes alors concentrés sur le suivi de l'évolution des concentrations en fer, nickel, aluminium, manganèse et chrome dissous et nous avons volontairement écarté les éléments présents en très faible proportion dans les sédiments miniers analysés ici (TiO_2 , CoO , CuO , ZnO , Rb_2O , SnO_2 , Ta_2O_5 ...).

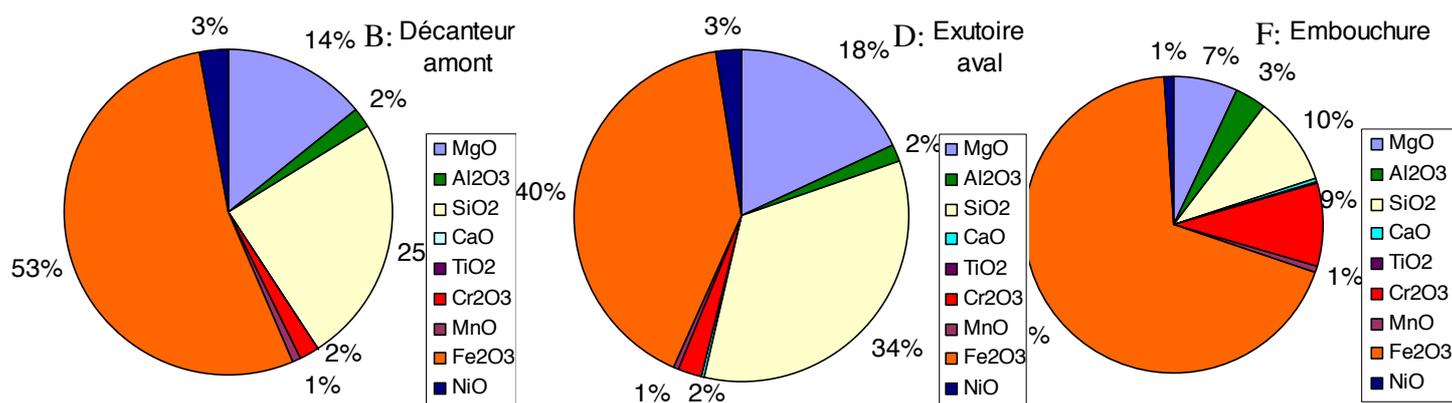


Figure 6 : Composition chimique, déterminée par fluorescence X, des sédiments prélevés dans le décanteur amont (point B), dans le décanteur de l'exutoire (point D) et à l'embouchure (point F).

La quantification des flux de matière solides transportés de la mine au lagon permettrait alors d'estimer les flux de métaux sous forme particulaire vers les écosystèmes aval, c'est l'objet de la programmation 2013 des appels à projet du CNRT, « bassin versant de la mine au lagon ».

L'identification des phases minérales présentes dans les sédiments miniers est nécessaire à la compréhension de la réactivité des sédiments et à la détermination de leur potentiel de libération d'éléments métalliques, soit par dissolution des phases minérales, soit parce que ces phases minérales ont de fortes capacités d'adsorption d'espèces métalliques ou même des propriétés redox. Par exemple, il est connu que vis-à-vis du chrome hexavalent, les oxydes de fer selon la phase minérale considérée peuvent induire différentes réactions de surface. La goethite adsorbe le chrome hexavalent tandis la magnetite provoque la réduction du chrome hexavalent puis sa précipitation à l'interface (Deng, 1996). La nature des phases minérales présentes dans les sédiments miniers ou

dans les matières en suspension d'échantillons d'eau prélevés après les décanteurs amont (B) et aval (D) a été déterminée par diffraction des rayons X et révèle la présence principalement de goethite et de quartz (figure 7). Nous avons également déterminé au microscope la présence de chromite, minérale qui n'est pas facilement identifiable par diffraction des rayons X avec une anticathode au cobalt. **La présence systématique de goethite, parfois seule phase minérale identifiée (MES, figure 6), nous laisse alors supposer que les matières en suspension peuvent avoir un rôle dans la circulation du chrome dans les eaux superficielles.**

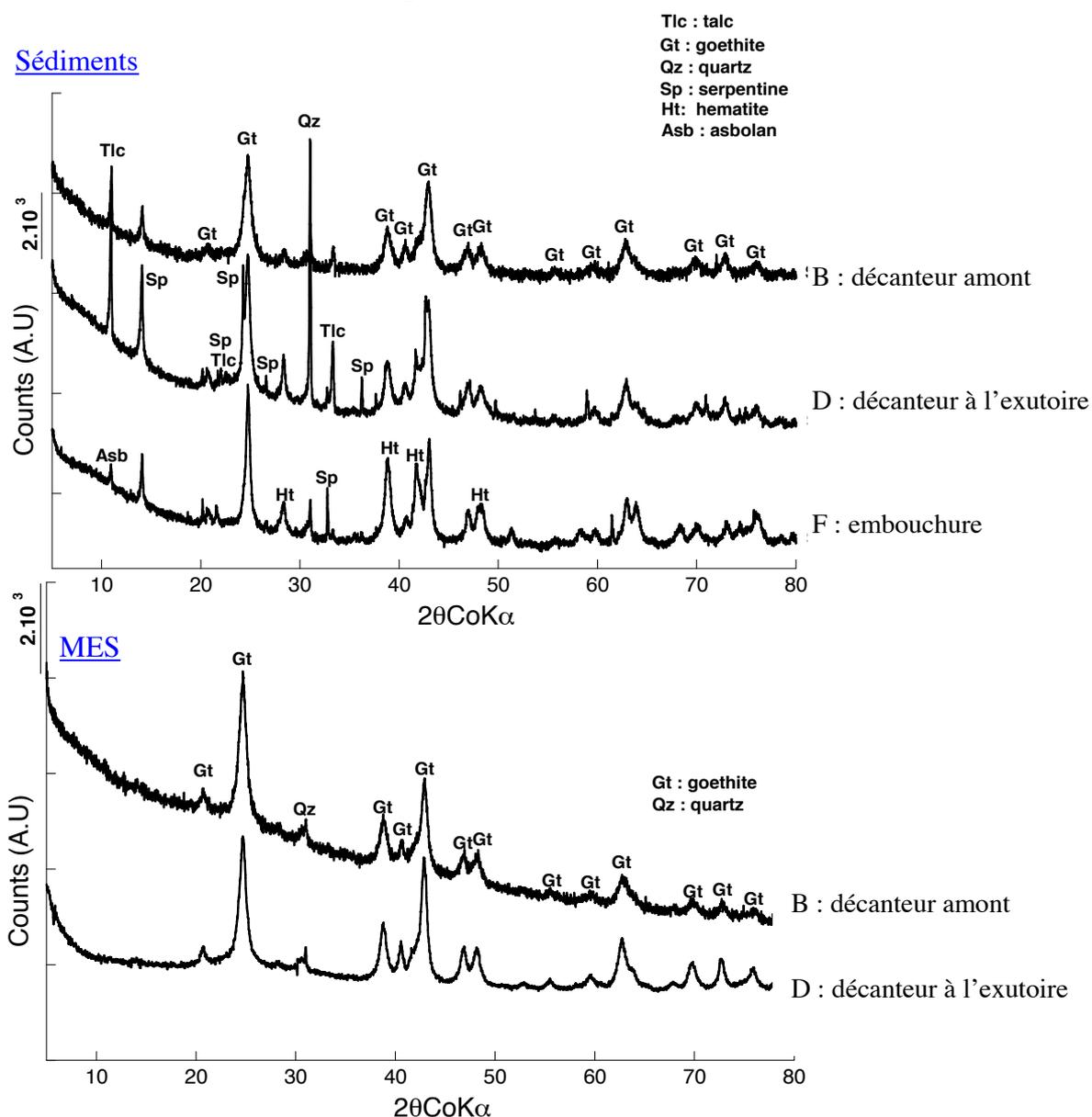


Figure 7 : Nature des phases minérales présentes dans les sédiments miniers prélevés dans le décanteur amont (B), dans le décanteur de l'exutoire (D) et à l'embouchure (F) et dans les matières en suspension.

5. Résultats des analyses de la fraction dissoute des eaux superficielles

5.1 Evolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction

Au niveau de la résurgence (A), le pH des échantillons d'eau est le plus bas et devient légèrement acide lorsqu'il pleut (pH=6.6 et pH=6.4 pour respectivement 3.5 et 132.5mm de pluie). Pour les autres échantillons, prélevés à l'exutoire (D), dans la rivière (E) ou à l'embouchure (F), le pH est plutôt alcalin (supérieur à 7.5) sauf en cas de forte pluie (<7.0 pour 132.5 mm) (Figure 8). **On peut s'attendre à une solubilisation d'éléments métalliques contenus dans les matières en suspension lorsque le pH baisse de manière importante donc pour 132.5mm de pluie.**

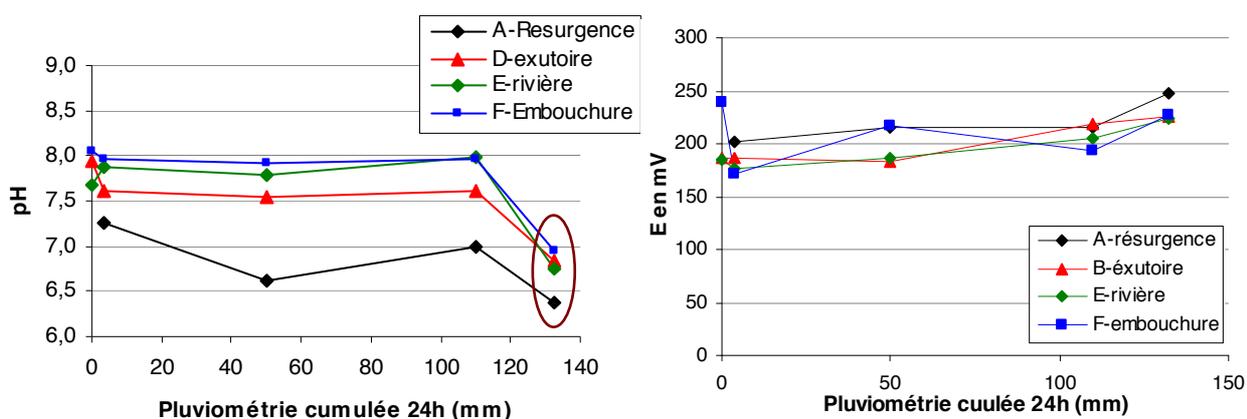


Figure 8 : Evolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction des échantillons d'eau avec la pluviométrie (n=19)

Le potentiel d'oxydoréduction est élevé dans la totalité des échantillons d'eau et supérieur à +170mV par rapport à l'électrode normale à hydrogène (Figure 8). **Ces valeurs révèlent que les conditions sont clairement oxydantes, incompatibles avec la présence de sulfures d'éléments métalliques (présents si $E < -150\text{mV}$) et incompatible avec la réduction des oxydes de fer (réduction possible si $-50 < E < +100\text{mV}$).** Le fer en solution sera présent sous sa forme Fe^{3+} en phase solide (ou du moins dans la zone interfaciale des matières en suspension) ou en solution. Nous pouvons également noter que le potentiel d'oxydoréduction a tendance à légèrement augmenter avec la pluviométrie.

5.2 Evolution de la concentration en solutés

La conductivité électrique (CE) dépend de la quantité d'espèces ioniques en solution. Sa mesure permet donc de suivre la quantité de solutés dans les échantillons d'eau.

Globalement, la conductivité électrique diminue avec la pluviométrie (figure 9). Il existe une corrélation entre baisse de la conductivité et la pluviométrie avec $R^2= 0.9622$ à la résurgence (A), $R^2=0.8690$ à l'exutoire (D), $R^2=0.8370$ à la rivière (E) et $R^2=0.7625$ à l'embouchure (F). Cette baisse de la conductivité électrique avec la pluviométrie indique que les apports d'eau de pluie sont

suffisants pour induire une dilution des masses d'eau. La variation de conductivité électrique dans les échantillons d'eau A, B et E est cependant plutôt faible et il faut de fortes précipitations pour observer une conductivité inférieure à $100\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 9).

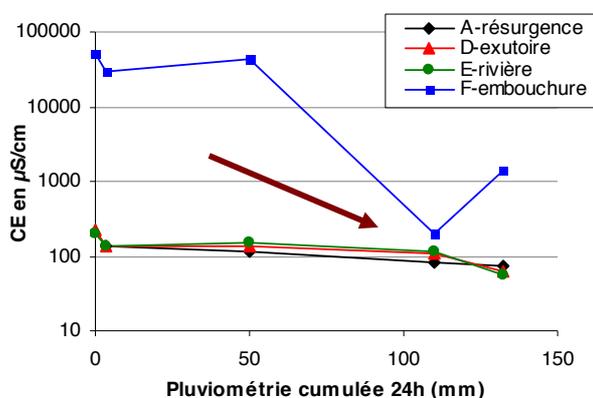


Figure 9 : Baisse de la conductivité électrique (CE) avec la pluviométrie (n=19)

Le rapport de la conductivité maximale (pour 0mm) sur la conductivité minimale (pour 110mm) est de 3.5 à l'exutoire (D), 3.4 à la rivière (E) et 256 à l'embouchure (F). Ces résultats démontrent que la concentration en solutés diminue de manière modérée mais est notable à l'exutoire et dans la rivière mais diminue très fortement à l'embouchure. Il y a alors à l'embouchure une très forte dilution.

La faible dilution observée en amont de l'embouchure peut être expliquée de deux manières :

- les apports de pluie ne sont pas suffisants pour diluer fortement les masses d'eau et dans ce cas les concentrations en espèces solubles ne diminuent pas ou diminuent peu et donc la conductivité électrique diminue peu. Cela est probable pour les faibles précipitations mais est peu probable pour les fortes précipitations. En effet, sur site minier les masses d'eau sont assez faibles et les volumes augmentent de manière importante et visible à l'œil nu pour les fortes précipitations.

- les apports de pluie sont suffisants pour induire une augmentation importante des masses d'eau et donc une dilution importante avec pour conséquence une forte baisse de la conductivité électrique. Si la conductivité électrique ne diminue pas ou peu cela signifie que la dilution est compensée par des remobilisations d'espèces chimiques solubles. Ces espèces chimiques solubles sont mobilisées par lessivage des terrains amont et/ou par lessivage des matières en suspension.

La faible baisse de la conductivité électrique en amont de l'embouchure, même pour les fortes précipitations est donc très probablement liée au fait que des espèces chimiques soient solubilisées à partir des particules terrigènes charriées lors des fortes précipitations.

5.3 Evolution des concentrations en éléments métalliques majeurs

Les éléments métalliques majeurs suivis sont le magnésium, calcium, sodium et potassium. Les évolutions des concentrations de ces éléments ont le même profil que les courbes de conductivité électrique (figure 9, figure 10) et diminuent avec la pluviométrie, de manière modérée à la résurgence (A), à l'exutoire (D) et dans la rivière (E), mais de manière importante à l'embouchure

(F). Les concentrations en magnésium, sodium, calcium et potassium sont d'ailleurs corrélées à la conductivité électrique avec respectivement $R^2=0.9973, 0.9981, 0.9966$ et 0.9655 ($n=19$).

Les concentrations en calcium et magnésium, principaux cations compétiteurs pour les sites d'adsorption (figure 2), diminuant avec la pluviométrie, il est alors possible de dire qu'ils ne sont pas des cations compétiteurs et donc qu'ils n'interviennent pas de manière significative dans une réaction de désorption par compétition du fer, nickel, aluminium, manganèse ou chrome sur site minier ou dans la rivière. Par contre, la réaction de désorption par compétition peut cependant avoir lieu lorsque les MES arrivent à l'embouchure puisque les concentrations en cations compétiteurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} et dans une moindre mesure Na^+ et K^+) sont beaucoup plus élevée dans l'eau de mer.

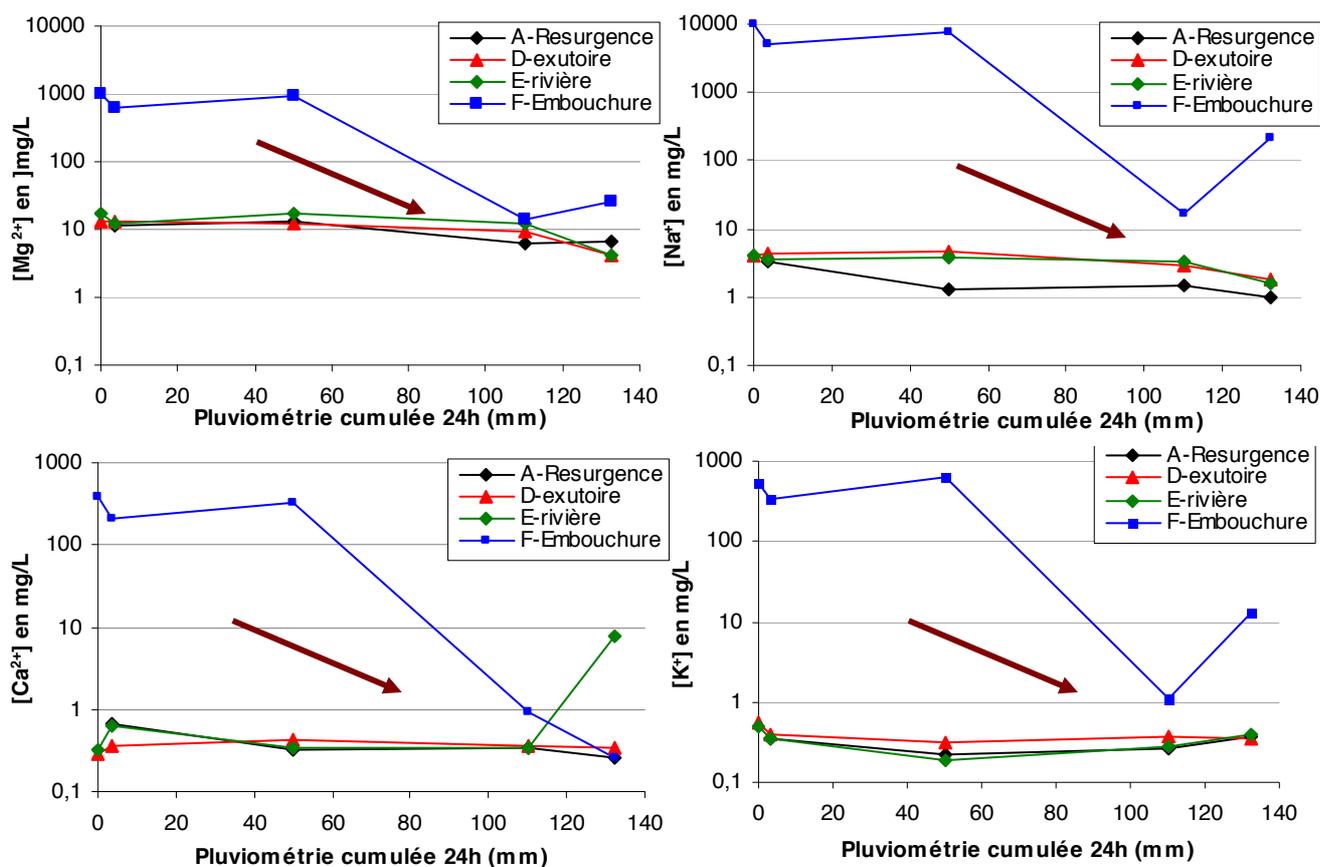


Figure 10 : Diminution avec la pluviométrie des concentrations en magnésium, sodium, calcium et potassium dissous dans les échantillons d'eau superficielle ($n=19$).

1.1. Evolution des concentrations en ligands

Les ligands des éléments métalliques sont les anions et le carbone organique dissous. Les anions suivis sont l'ion phosphate (PO_4^{3-}), l'ion fluorure (F^-), nitrate (NO_3^-), cyanure (CN^-), chromate (CrO_4^{2-}), bicarbonate/carbonate (HCO_3^-/CO_3^{2-}), sulfate (SO_4^{2-}) et chlorure (Cl^-). Certains anions sont des paramètres couramment mesurés pour les analyses environnementales d'autant que certains sont toxiques comme l'ion chromate qui est la forme hexavalente du chrome ou l'ion cyanure. Ils sont également des ligands plus ou moins forts et peuvent donc intervenir comme la matière organique

dissoute dans les réactions de solubilisation des éléments métalliques adsorbés à la surface des particules sédimentaires d'origine minière (figure 2).

Les analyses n'ont pas été réalisées pour l'épisode pluvieux de 50 mm car toutes les analyses d'anions (sauf l'ion chromate) ont été réalisées en sous-traitance et sont onéreuses.

Les concentrations en ion phosphate sont inférieures à la limite de détection (<0.5mg/L). Les milieux étant peu concentrés en ion phosphate, ce ligand inorganique plutôt fort (tableau 1) ne sera pas impliqué dans ce contexte dans la solubilisation du fer, nickel, aluminium, manganèse ou chrome.

Les concentrations en ion fluorure sont inférieures à la limite de détection (<0.1mg/L) sauf à l'embouchure (point F). A l'embouchure, elle diminue avec la pluviométrie avec une concentration de 2.14mg/L pour 0mm, 1.04 mg/L pour 3.5mm, 0.28 mg/L pour 110mm et <0.1 mg/L pour 132.5mm. L'ion fluorure est un ligand relativement fort de l'aluminium, du chrome(III) et du fer(III) (tableau 1) mais sa faible concentration rend peu probable son rôle dans des réactions de solubilisation de l'aluminium, du fer ou du chrome.

Les concentrations en ion nitrate sont inférieures à la limite de détection (<0.5mg/L) sauf à l'exutoire (point D) avec une concentration de 2.3mg/L pour 3.5mm, 1.3mg/L pour 110mm et 0.5mg/L pour 132.5mm et à l'embouchure (point F) avec une concentration de 1.8mg/L pour 0 mm et 23.4mg/L pour 132.5 mm. Cet élément est un ligand faible des éléments métalliques (tableau 1) et sa faible concentration indique qu'il n'intervient pas dans les réactions de complexation des éléments métalliques tels que Al, Fe, Mn, Ni et Cr.

Les concentrations en carbone organique dissous sont souvent inférieures à la limite de détection (<0.5 mg/L). Des concentrations mesurables ont été notées pour 3.5mm (à la résurgence 0.9 mg/L, à l'exutoire 0.7mg/L et dans la rivière 0.6 mg/L), pour 110 mm (3.4 mg/L à la résurgence, 0.3 mg/L à l'exutoire et 1 mg/L à l'embouchure) et pour 132.5 mm (19.7 mg/L à la résurgence et 1.8 mg/L à l'embouchure). **Paradoxalement, les plus fortes concentrations en matières organique sont mesurées à la résurgence pour les deux plus fortes pluviométries A-110 mm et A-132.5mm avec 3.4 mg/L et 19.7 mg/L. Il est alors probable que les éléments métalliques soient liés à la matière organique et maintenus en solution pour 110 et 132.5 mm.**

Les concentrations moyennes en ion cyanure, chromate, bicarbonate/carbonate, sulfate et chlorure sont présentées dans le tableau 3. Les plus faibles concentrations sont mesurées pour le cyanure avec $0.001\text{mg/L} \leq \text{CN}^- \leq 0.062\text{mg/L}$. Cet anion est toxique mais peut également former facilement des complexes avec le fer et le nickel. Sa présence en faible concentration indique qu'il est probablement peu impliqué dans les réactions de solubilisation du fer et du nickel. Les concentrations en ion chromate sont élevées avec $0.002\text{mg/L} \leq \text{CrO}_4^{2-} \leq 1.62\text{mg/L}$. Les concentrations en bicarbonate/carbonate et sulfate sont du même ordre de grandeur avec $12.2\text{mg/L} \leq \text{HCO}_3^- \leq 109.8\text{mg/L}$ et $3\text{mg/L} \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 2219\text{mg/L}$ respectivement. Les plus fortes concentrations sont mesurées pour l'ion chlorure avec $1.2\text{mg/L} \leq \text{Cl}^- \leq 17265\text{mg/L}$ et des valeurs logiquement élevées à l'embouchure.

Les concentrations en général ne diminuent pas ou diminuent peu avec la pluviométrie, sauf pour l'ion chlorure (figure 11).

Localisation	CN ⁻	CrO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
A-résurgence (n=3)*	0.025±0.027	0.65±0.66	32.5±4.0	21.3±4.7	3.1±3.1
D-exutoire (n=4)**	0.019±0.006	0.26±0.07	35.1±17.9	18.2±4.9	4.0±1.8
E-rivière (n=4)**	0.009±0.004	0.06±0.06	61.0±21.3	4.8±3.6	4.1±1.8
F-embouchure (n=4)**	0.030±0.024	0.09±0.13	82.4±34.7	792±1008	5971±7873

Tableau 3 : valeurs moyennes des concentrations en cyanure, chromate, carbonate, sulfate et chlorure dissous en mg/L. * n=4 pour CrO₄²⁻ et ** n=5 pour CrO₄²⁻.

Dynamique du cyanure

La concentration en cyanure est très variable à la résurgence (A) et dans le village (E et F) avec une concentration moyenne respective de 0.025±0.027mg/L, 0.009±0.004mg/L et 0.030±0.024mg/L (tableau 3). La concentration en cyanure à l'exutoire (D) est constante avec une concentration moyenne de 0.019±0.006mg/L (tableau 3). Le rapport entre la plus faible concentration mesurée (pour A-110mm) et la plus élevée (pour F-3.5mm) est égal à 62, ce qui souligne la grande amplitude de variation de concentrations en cyanure sur le parcours et avec la pluviométrie.

Dynamique du chrome hexavalent

La concentration en ion chromate (chrome hexavalent) à la résurgence (A) est élevée avec une concentration moyenne de 0.65±0.66mg/L (tableau 3). **A la résurgence, la concentration diminue avec la pluviométrie avec R²=0.8506** (n=4) (figure 11). La concentration à l'exutoire (D) est relativement constante et est de 0.26±0.07mg/L. Dans la rivière (E) et à l'embouchure (F), les concentrations sont inférieures à celles mesurées à la résurgence avec respectivement des concentrations moyennes de 0.06±0.06mg/L et 0.09±0.13mg/L (tableau 3). **Dans la rivière, la concentration en ion chromate augmente avec la pluviométrie avec R²=0.7141** (n=5) (figure 11). Dans la rivière, le rapport de la concentration maximale (pour 132.5mm) et de la valeur minimale (pour 0 mm) est de 9 tandis que ce rapport pour 132.5mm et 50-mm est de 170 à l'embouchure. L'amplitude possible de variation de concentrations dans le village est alors très élevée. **Les concentrations en chrome hexavalent atteignent dans le village des concentrations préoccupantes pour 110mm et 132.5 mm avec des valeurs du même ordre de grandeur que celles mesurées sur site minier** (figure 11). L'augmentation en chrome hexavalent à l'embouchure peut atteindre un facteur 170 alors que la conductivité à l'embouchure pour 132.5 mm est diminuée d'un facteur 37.5. Malgré donc une dilution importante, la concentration en ion chromate augmente de manière très importante. Cela implique nécessairement une très forte libération, à partir des matières en suspension, de chrome à l'embouchure. Un paragraphe est dédié à l'étude du chrome dans le but d'expliquer ces augmentations de concentrations dans la rivière et à l'embouchure.

Dynamique du bicarbonate/carbonate

La concentration en ion carbonate est du même ordre de grandeur à la résurgence (A), à l'exutoire (D), dans la rivière (E) et à l'embouchure (F). Les concentrations n'évoluent pas de manière importante avec la pluviométrie (figure 11).

Dynamique du sulfate

La concentration en ion sulfate sur à la résurgence et à l'exutoire (A et D) est du même ordre de grandeur et est constante avec une concentration moyenne respective de 21.3 ± 4.7 mg/L et 18.2 ± 4.9 mg/L (tableau 3). La concentration dans la rivière (E) atteint une valeur maximale de 10.2 mg/L pour 132.5 mm ce qui est 3.5 fois plus élevée que pour les pluviométries inférieures (figure 11). A l'embouchure (F) la concentration en sulfate est beaucoup plus élevée qu'en amont mais elle diminue nettement pour les 2 fortes pluviométries avec respectivement une concentration de 7 mg/L et 73.2 mg/L pour 110 et 132.5 mm contre 2219 et 867 mg/L pour 0 et 3.5 mm. A l'embouchure, le rapport de la concentration maximale (pour 0 mm) et la concentration minimale (pour 110 mm) est alors de 317, **l'ion sulfate est alors fortement dilué lors des fortes précipitations mais à l'embouchure uniquement.**

Dynamique de l'ion chlorure

La concentration en ion chlorure à la résurgence (A), à l'exutoire (D) et dans la rivière (E) est du même ordre de grandeur avec respectivement une concentration moyenne 3.1 ± 3.1 mg/L, 4.0 ± 1.8 mg/L et 4.1 ± 1.8 mg/L (tableau 3). La concentration en ion chlorure diminue avec la pluviométrie ($R^2=0.9928$, $R^2=0.8287$ et $R^2=0.7772$) (figure 11). Le rapport de concentration maximale (pour 3.5 mm) et minimale (pour 132.5 mm) est de 5.3. Les ions chlorure sont donc dilués lors des événements pluvieux. A l'embouchure (F) les concentrations en chlorure sont beaucoup plus élevées qu'aux points précédents mais les concentrations diminuent également nettement avec la pluviométrie ($R^2=0.6836$) (figure 11). Le rapport de la concentration maximale (pour 0 mm) et la concentration minimale (pour 110 mm) est de 614. A l'embouchure, cet anion est donc très fortement dilué.

L'ion chlorure est la seule espèce chimique nettement et systématiquement diluée par les apports d'eau lors des précipitations. Ce résultat confirme alors que l'apport d'eau par la pluie dilue les masses d'eau même si cette dilution est faible pour les faibles précipitations. Lorsque la baisse de concentration d'une autre espèce chimique n'est pas constatée, cela implique alors nécessairement qu'il y a eu des remobilisations par lessivage des terrains amont et/ou par lessivage des matières en suspension.

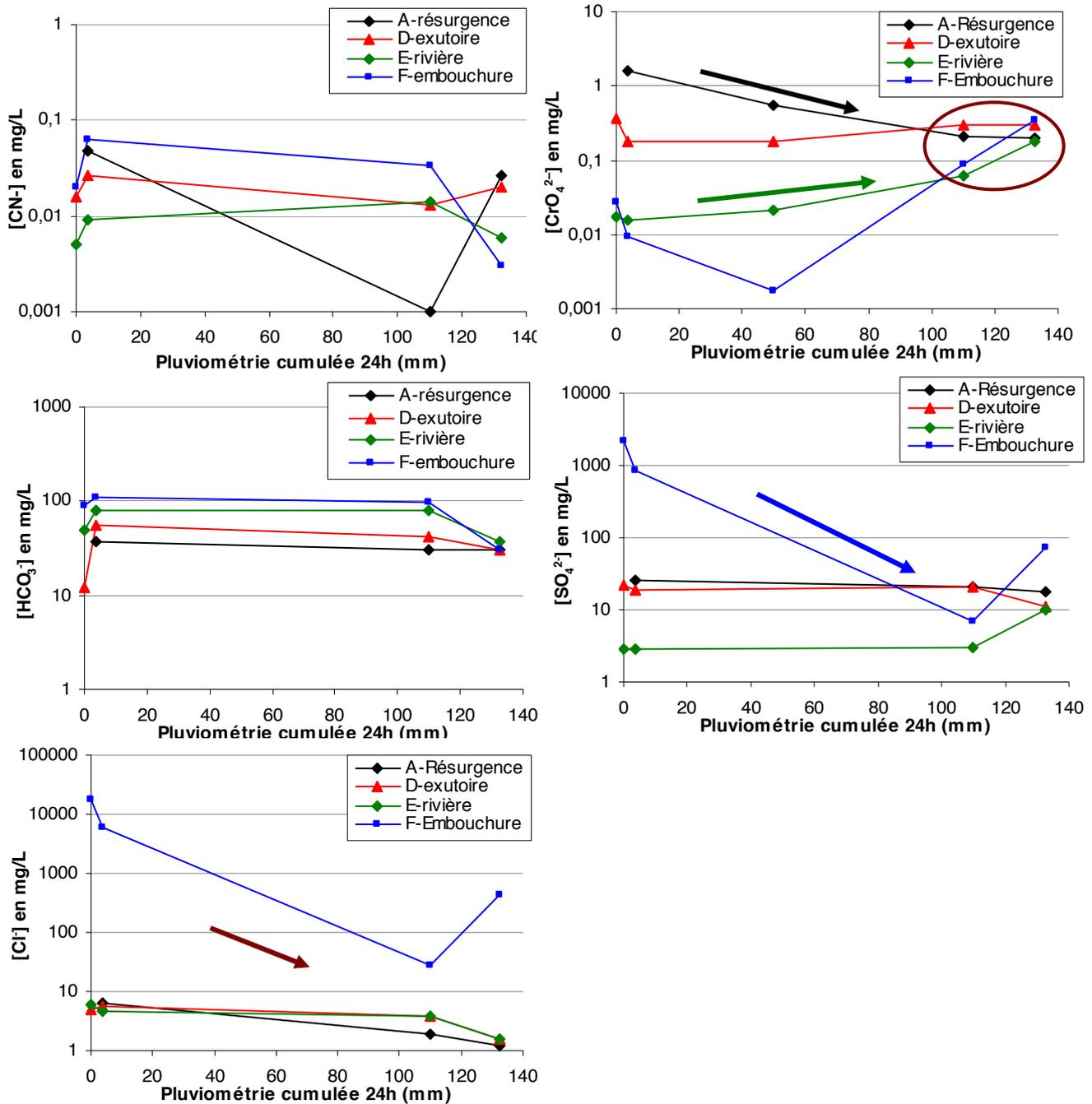


Figure 11 : Evolution avec la pluviométrie des concentrations en cyanure, chromate, bicarbonate, sulfate et chlorure dissous dans les échantillons d'eau superficielle (n=15 et n=19 pour l'ion chromate).

5.5 Evolution des concentrations en fer, manganèse, aluminium, nickel et chrome

Les concentrations en fer, manganèse, aluminium, nickel et chrome sont variables selon l'élément considéré, selon la localisation du prélèvement et selon la pluviométrie (figure 12). Les plus faibles concentrations sont mesurées pour le nickel avec $0.0005\text{mg/L} \leq \text{Ni}_{\text{dissous}} \leq 0.0059\text{mg/L}$ (tableau 4). Les concentrations en aluminium et manganèse sont du même ordre de grandeur avec $0.0004\text{mg/L} \leq \text{Al}_{\text{dissous}} \leq 0.019\text{mg/L}$ et $0.0001\text{mg/L} \leq \text{Mn}_{\text{dissous}} \leq 0.048\text{mg/L}$. Les plus fortes concentrations sont mesurées pour le fer et le chrome avec $0.003\text{mg/L} \leq \text{Fe}_{\text{dissous}} \leq 0.292\text{mg/L}$ et

0.05mg/L \leq Cr_{dissous} \leq 2.41mg/L. **Les concentrations en chrome sont très élevées et préoccupantes d'un point de vue sanitaire et écotoxicologique. Le chrome mesuré ici est le chrome total dissous.** C'est la somme du chrome trivalent et du chrome hexavalent : Cr_{dissous} = Cr(III) + Cr(VI).

Les concentrations en général ne diminuent pas ou diminuent peu avec la pluviométrie (figure 12). Donc bien que ces éléments soient peu solubles (sauf la forme hexavalente du chrome), **il y a alors nécessairement des réactions de solubilisation à partir des particules terrigènes en place ou à partir des matières en suspension pour compenser la dilution est expliquer que les concentrations ne diminuent pas avec la pluviométrie.**

Localisation	Ni _{dissous}	Al _{dissous}	Mn _{dissous}	Fe _{dissous}	Cr _{dissous}
A-résurgence (n=4)	0.0014±0.0002	0.0018±0.0008	0.012±0.002	0.0038±0.0006	1.3±0.8
D-exutoire (n=5)	0.0005±0.0003	0.0021±0.0011	0.03±0.01	0.014±0.006	0.84±0.15
E-rivière (n=5)	0.0018±0.0020	0.0035±0.0029	0.011±0.005	0.085±0.104	0.37±0.29
F-embouchure (n=5)	0.0014±0.0014	0.013±0.005	0.007±0.009	0.028±0.043	0.26±0.19

Tableau 4 : valeurs moyennes des concentrations en nickel, aluminium, manganèse, fer et chrome dissous exprimées en mg/L

Dynamique du nickel

La concentration en nickel est constante à la résurgence (A) avec une concentration moyenne de 0.0014±0.0002mg/L (tableau 4). Sa concentration à l'exutoire (D) est bien inférieure à celle mesurée à la résurgence et est plus variable avec une concentration moyenne de 0.0005±0.0003mg/L. Par contre, on peut observer dans le village (E et F), qu'elle augmente fortement pour 132.5 mm (figure 12). Dans la rivière, le rapport entre la concentration maximale (pour 132.5 mm) et la concentration minimale (pour 0 mm) est de 11.8. **L'augmentation de concentration en nickel notée pour 132.5mm dans la rivière et à l'embouchure est alors importante ce qui indique qu'il est mobilisé de manière importante vers la phase dissoute.**

Dynamique de l'aluminium

La concentration en aluminium est du même ordre de grandeur à la résurgence (A), à l'exutoire (D) et dans la rivière (E) avec respectivement des concentrations moyennes de 0.0018±0.0008mg/L, 0.0021±0.001 mg/L et 0.0035±0.029 mg/L (tableau 4). La concentration moyenne mesurée à l'embouchure (D) est bien supérieure à celles mesurées en amont avec une concentration moyenne de 0.013±0.005mg/L. Sur le site minier ou dans le village, l'amplitude de variation de concentrations est plutôt faible puisque les concentrations restent du même ordre de grandeur ce qui signifie que cet élément est remobilisé et ce tout au long du parcours de la mine au lagon. Mais comparativement au nickel ou au chrome hexavalent, cet élément est faiblement remobilisé, puisque sa concentration n'augmente pas mais reste constante. **La remobilisation semble donc juste compenser la dilution pour l'aluminium.**

Dynamique du manganèse

La concentration en manganèse est du même ordre de grandeur à la résurgence (A), à l'exutoire (D), dans la rivière (E) et à l'embouchure avec respectivement des concentrations moyennes de $0.012 \pm 0.002 \text{ mg/L}$, $0.03 \pm 0.01 \text{ mg/L}$, $0.011 \pm 0.005 \text{ mg/L}$ et $0.007 \pm 0.009 \text{ mg/L}$ (tableau 4). La concentration en manganèse est peu variable à la résurgence (A) tandis qu'à l'exutoire (D), elle diminue avec la pluviométrie avec $R^2=0.9576$ (figure 12). Cette diminution est cependant faible puisque le rapport entre la plus forte concentration (pour 3.5 mm) et la plus faible concentration (pour 132.5 mm) est de 2.6. A l'embouchure (F), la concentration augmente avec la pluviométrie avec $R^2=0.7040$ (figure 12) et le rapport entre la plus faible concentration (pour 0mm) et la plus forte concentration (pour 132.5 mm) est de 230. Ce rapport souligne l'importance que peut être l'augmentation de concentration à l'embouchure avec la pluviométrie. **A l'embouchure, le manganèse est donc remobilisé de manière extrêmement importante lors de fortes pluies.**

Dynamique du fer

La concentration en fer est constante à la résurgence (A) avec une concentration moyenne de $0.0038 \pm 0.0006 \text{ mg/L}$ (tableau 4). A l'exutoire (D), elle est plus élevée et plus variable avec une concentration moyenne de $0.014 \pm 0.006 \text{ mg/L}$. Dans la rivière (E), la concentration est très variable et atteint la plus forte concentration pour une pluviométrie de 132.5 mm (figure 12). Le rapport entre la plus faible concentration (pour 0mm) et la plus forte concentration (pour 132.5 mm) est de 48.7. L'amplitude de concentration est alors importante dans la rivière. A l'embouchure (F), la concentration en fer est très variable. Le rapport à l'embouchure entre la plus faible concentration (pour 0mm) et la plus forte concentration (pour 110 mm) est de 38.7. **Dans la rivière et à l'embouchure l'augmentation de concentration en fer lors de fortes pluies est alors importante ce qui indique ce le fer est fortement remobilisé pour passer dans la fraction dissoute et ce malgré l'augmentation de pH à l'arrivée des matières en suspension à l'embouchure.**

Dynamique du chrome

La concentration en chrome total dissous à la résurgence (A) est très élevée avec une concentration moyenne de $1.3 \pm 0.8 \text{ mg/L}$. La concentration à la résurgence diminue avec la pluviométrie avec $R^2=0.8559$ (figure 12). La concentration à l'exutoire (D) est relativement constante et est de $0.84 \pm 0.15 \text{ mg/L}$ (tableau 4). Dans la rivière (E) et à l'embouchure (F), les concentrations sont inférieures à celles mesurées à la résurgence avec respectivement des concentrations moyennes de $0.37 \pm 0.29 \text{ mg/L}$ et $0.26 \pm 0.19 \text{ mg/L}$. Le rapport de la concentration maximale mesurée sur site minier (pour 3.5 mm) et minimale mesurée dans le village (pour 0mm) est de 48.2. **La concentration en chrome diminue donc de manière importante dans le village par rapport aux valeurs mesurées sur site minier. Cependant, les concentrations dans le village demeurent préoccupantes et la concentration à l'embouchure augmente avec la pluviométrie avec $R^2=0.9029$ (n=5)** (figure 12). A l'embouchure, le rapport entre la concentration maximale (pour 132.5mm) et la concentration minimale (pour 0mm) est de 11.4. L'augmentation de concentration en chrome total dissous est donc importante, cet élément est également remobilisé vers la fraction dissoute.

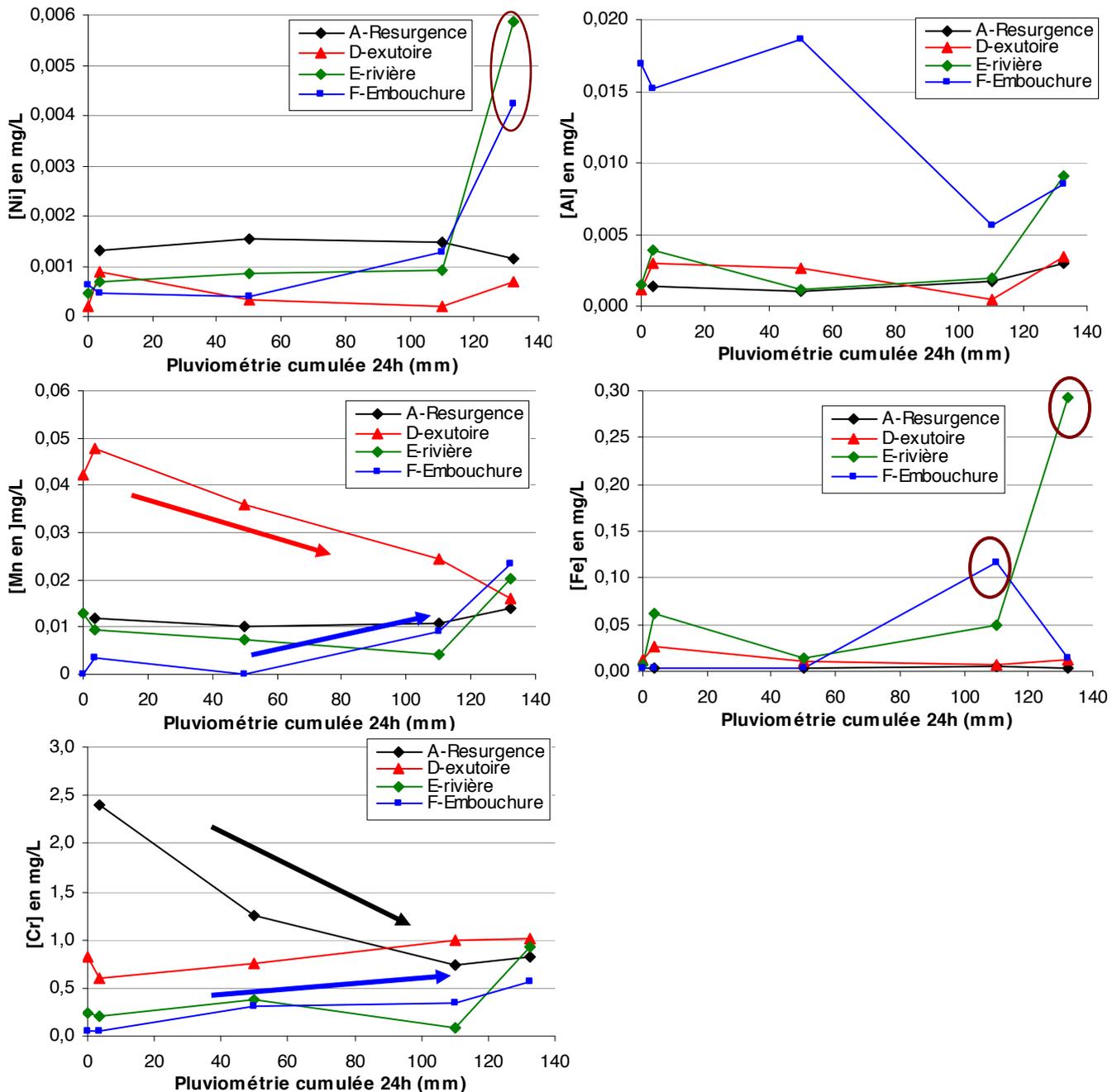


Figure 12 : Evolution avec la pluviométrie des concentrations en nickel, aluminium, manganèse, fer et chrome total dissous dans les échantillons d'eau superficielle (n=19).

6. Evolution de la spéciation des éléments métalliques dissous de la mine au lagon

Ces résultats sont issus des mesures de concentrations en éléments métalliques dissous, en anions dissous, en carbone organique total dissous et des calculs théoriques de spéciation basés sur les équilibres chimiques en solution aqueuse. Les résultats de ces calculs sont à manipuler avec précaution car ils dépendent, comme toute opération de modélisation, des données prises en considération pour les calculs. Toutefois, les paramètres de calcul étant les mêmes pour les différents

points et évènements pluvieux, ces calculs permettront de dégager les espèces chimiques majoritaires et l'évolution de ces espèces en terme de pourcentage de la mine au lagon et également de déterminer si la spéciation varie avec la pluviométrie. Les résultats des espèces minoritaires sont indicatifs au regard des incertitudes sur les valeurs des constantes d'équilibres des complexes considérés pour les calculs. En effet, les valeurs de constantes d'équilibre fournies dans la littérature sont déterminées expérimentalement pour une force ionique donnée. Mais les échantillons d'eau traités ne sont pas forcément aux forces ioniques établies pour la détermination des constantes d'équilibres. Pour les calculs de spéciation il est alors nécessaire d'extrapoler les valeurs des constantes à la force ionique du problème. Et c'est ces corrections liées à la force ionique qui conduisent à des incertitudes qui peuvent parfois être élevées.

Ces calculs de spéciation permettent de cerner le ligand ou les ligands ayant, en contexte minier, un rôle soit dans le maintien en solution d'un élément donné soit dans le transfert vers la fraction dissoute (désorption ou solubilisation par complexation) à partir des MES d'un élément donnée (figure 2-b et 2-c).

Evolution de la spéciation du nickel

Le nickel a une spéciation en solution très variable (figure 13) contrairement à l'aluminium, au fer et au manganèse. Il y a trois profils de spéciation du nickel qui se dégagent des calculs.

Le profil où le nickel est majoritairement présent sous sa forme libre Ni^{2+} c'est le cas pour A-3.5mm, A-110mm, D-3.5mm, D-110mm, D-132.5mm, E-0mm, E-3.5mm, E-132.5mm et F-132.5mm. Le nickel peut être trouvé majoritairement sous sa forme libre Ni^{2+} même pour les pH alcalins (7.68 pour E-0mm, 7.62 pour D-3.5mm et D-110mm, 7.87 pour E-3.5 mm).

Le profil où le nickel est majoritairement présent sous sa forme complexée à l'ion cyanure pour former majoritairement $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$ pour D-0mm, F-0mm, F-3.5mm et F-110mm. Pour l'échantillon E-110mm les deux formes libres et complexées à l'ion cyanure sont en proportion quasi équivalentes

Le profil où le nickel est principalement lié à la matière organique pour A-132.5mm avec 62.6% de l'espèce Ni-DOM. Contrairement aux autres métaux, le nickel se lie plus facilement à la matière organique puisque la présence de complexe Ni-DOM est calculée même pour les faibles quantités de matière organique dissoute. A la résurgence, de fortes proportions de nickel lié à la matière organique (22.7 et 62.6%) sont calculées pour A-110mm et A-132.5mm ce qui coïncide avec les concentrations en matière organique mesurées les plus élevées avec respectivement 3.4 et 19.7 mg/L.

La présence des complexes NiOH^+ , NiSO_4 , NiHCO_3^+ , $\text{NiCO}_3(\text{aq})$ et $\text{NiH}(\text{CN})_4^-$ a été calculée, mais le plus souvent dans de très faibles proportions.

Dans ce contexte, les principaux ligands du nickel sont alors la matière organique et l'ion cyanure.

Evolution de la spéciation de l'aluminium

L'aluminium est en solution présent principalement sous forme d'hydroxyde ($\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$) (figure 14). La forme $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ est majoritaire, même pour les échantillons d'eau prélevés à la résurgence (A) dont le pH est bas par rapport aux autres localisations (figure 8).

D'autres formes chimiques apparaissent pour les deux échantillons dont les pH sont le plus bas : à la résurgence (A-132.5 mm) ou dans la rivière (E-132.5 mm). Ces deux plus faibles valeurs de pH laissent alors la possibilité à l'aluminium de réagir avec d'autres ligands que l'ion hydroxyde OH^- et former à la résurgence des complexes avec l'ion fluorure pourtant présent en très faible quantité ($<0.1\text{mg/L}$) (AlF^{2+} et AlF_2^+ aux proportions respectivement de 4.7 et 8.7%), avec le phosphate (AlHPO_4^+ 2.3%) ou avec la matière organique dissoute (AIDOM, 12.7%). Il faut une très forte concentration en matière organique dissoute (19.7 mg/L) et un faible pH (6.37) pour que l'aluminium soit complexé à la proportion de 12.7% à la matière organique.

L'ion hydroxyde est donc en contexte minier le principal ligand de l'aluminium.

Evolution de la spéciation du manganèse

Le manganèse, contrairement aux autres éléments, est en solution présent principalement sous forme sa forme libre Mn^{2+} (figure 15) avec au minimum 71.8% du manganèse sous cette forme. La présence des complexes MnCl^+ , MnCl_2 , MnSO_4 , MnHPO_4 , MnHCO_3^+ et $\text{MnCO}_3(\text{aq})$ a été calculée, mais le plus souvent dans de très faibles proportions. Des proportions significatives de MnSO_4 sont calculées pour F-0mm avec 10,5% de Mn lié à l'ion sulfate lorsque la concentration en sulfate est la plus élevée avec 2219 mg/L. L'autre complexe présent en proportion significative est le complexe $\text{MnCO}_3(\text{aq})$ pour E-3.5mm, E-110mm et F-110mm. Le manganèse ne semble pas se lier à la matière organique dissoute dans les gammes de concentrations mesurées.

Le manganèse dans ce contexte n'est donc que très peu complexé et les principaux ligands sont lorsqu'ils se lient au manganèse l'ion sulfate et l'ion carbonate/bicarbonate.

Evolution de la spéciation du fer

Le fer, comme l'aluminium, est en solution présent principalement sous forme d'hydroxyde ($\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{aq})$ et $\text{Fe}(\text{OH})_4^-(\text{aq})$) (figure 16). La forme $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}(\text{aq})$ est très largement majoritaire dans tous les cas avec au minimum 84% du fer sous cette forme chimique. Le fer n'est pas significativement complexé à la matière organique dissoute. Une faible proportion de fer complexé à la matière organique est calculée à la résurgence avec une pluviométrie de 132.5mm (A-132.5mm) avec 0.5% d'espèce Fe-DOM. Comme pour l'aluminium, il faut une très forte concentration en matière organique dissoute (19.7 mg/L) et un faible pH (6.37) pour que le fer soit complexé à la matière organique.

L'ion hydroxyde est donc en contexte minier le principal ligand du fer.

Evolution de la spéciation du chrome

Le chrome a, comme le nickel une spéciation en solution très variable (figure 17). Il est présent au nombre d'oxydation +III et +VI.

Le chrome trivalent d'après calculs est alors principalement présent sous sa forme d'hydroxydes ($\text{Cr}(\text{OH})_2^+$, CrOH^{2+} , $\text{Cr}(\text{OH})_3(\text{aq})$) et lié à la matière organique sous forme de complexe Cr-DOM.

L'ion hydroxyde et la matière organique sont donc les principaux ligands du chrome trivalent en contexte minier.

Le chrome hexavalent est principalement présent sous forme d'ion chromate libre CrO_4^{2-} , d'ion chromate protoné HCrO_4^- sous forme d'ion chromate lié au sodium ou au calcium, NaCrO_4^- , $\text{CaCrO}_4(\text{aq})$.

Trois profils de spéciation du chrome se dégagent. Le profil où la proportion de chrome trivalent est très largement majoritaire, c'est le cas pour la majorité des situations E-0mm, D-3.5mm, E-3.5mm, F-3.5mm, A-110mm, F-110mm, A-132.5 mm, D-132.5mm, E-132.5mm. Le profil où la proportion de chrome trivalent et de chrome hexavalent est proche pour D-0mm, F-0mm, D-110mm et F-132.5mm. Le profil où le chrome hexavalent est largement majoritaire pour A-3.5mm, E-110mm.

Ces calculs de spéciation permettent de cerner que dans ce contexte minier, dans les gammes de concentrations en éléments métalliques, en anions et en carbone organique dissous mesurés, l'aluminium (III), le fer (III) et le chrome (III) sont principalement lié à l'ion hydroxyde. Ce qui signifie aussi que si le pH augmente beaucoup (au large de l'embouchure par exemple), l'aluminium, le fer et le chrome dissous sont susceptibles de précipiter. Le chrome (III) est ensuite principalement lié à la matière organique. Le nickel (II) et le manganèse (II) sont principalement présents sous forme libre donc non complexé. Ils s'associent donc moins « facilement » à l'ion hydroxyde. Lorsque le nickel est lié, il est principalement lié à la matière organique ou à l'ion cyanure. **La présence de matière organique peut donc jouer un rôle significatif dans le maintien en solution ou le transfert vers la fraction dissoute (désorption ou solubilisation par complexation) préférentiellement pour le nickel et le chrome (III). L'ion cyanure peut également jouer ce rôle pour le nickel. Le manganèse lorsqu'il est complexé est principalement lié à l'ion sulfate ou carbonate/bicarbonate. L'augmentation de concentration en manganèse dissous sera alors favorisée à l'embouchure ou au large de l'embouchure.**

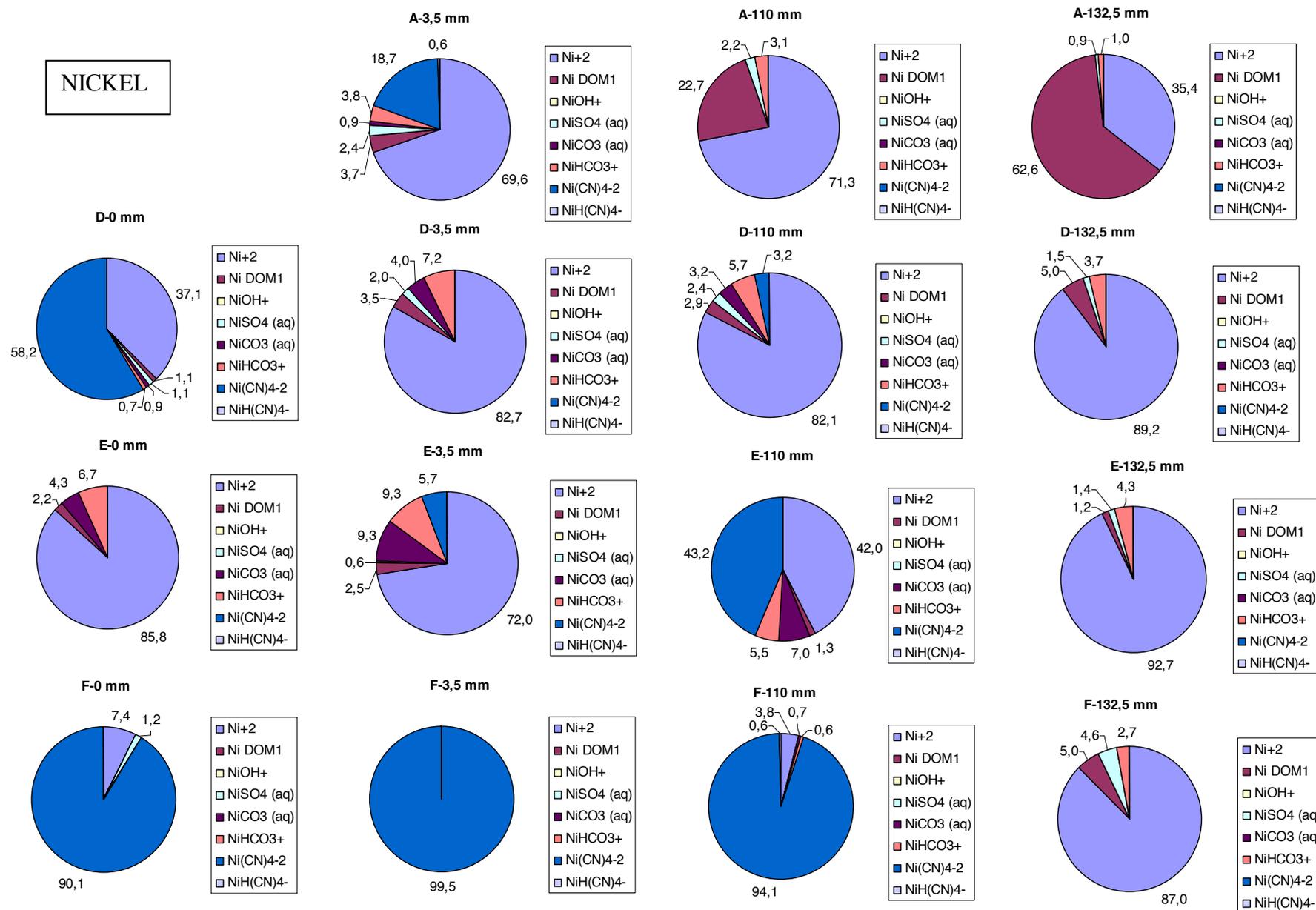


Figure 13 : Evolution de la spéciation du nickel en fonction de la pluviométrie (0, 3.5, 110 et 132.5 mm en 24 heures) ou de la localisation. Les points A (résurgence) et B (exutoire) sont localisés dans la mine de Poro, les points E (rivière) et F (embouchure) dans le village.

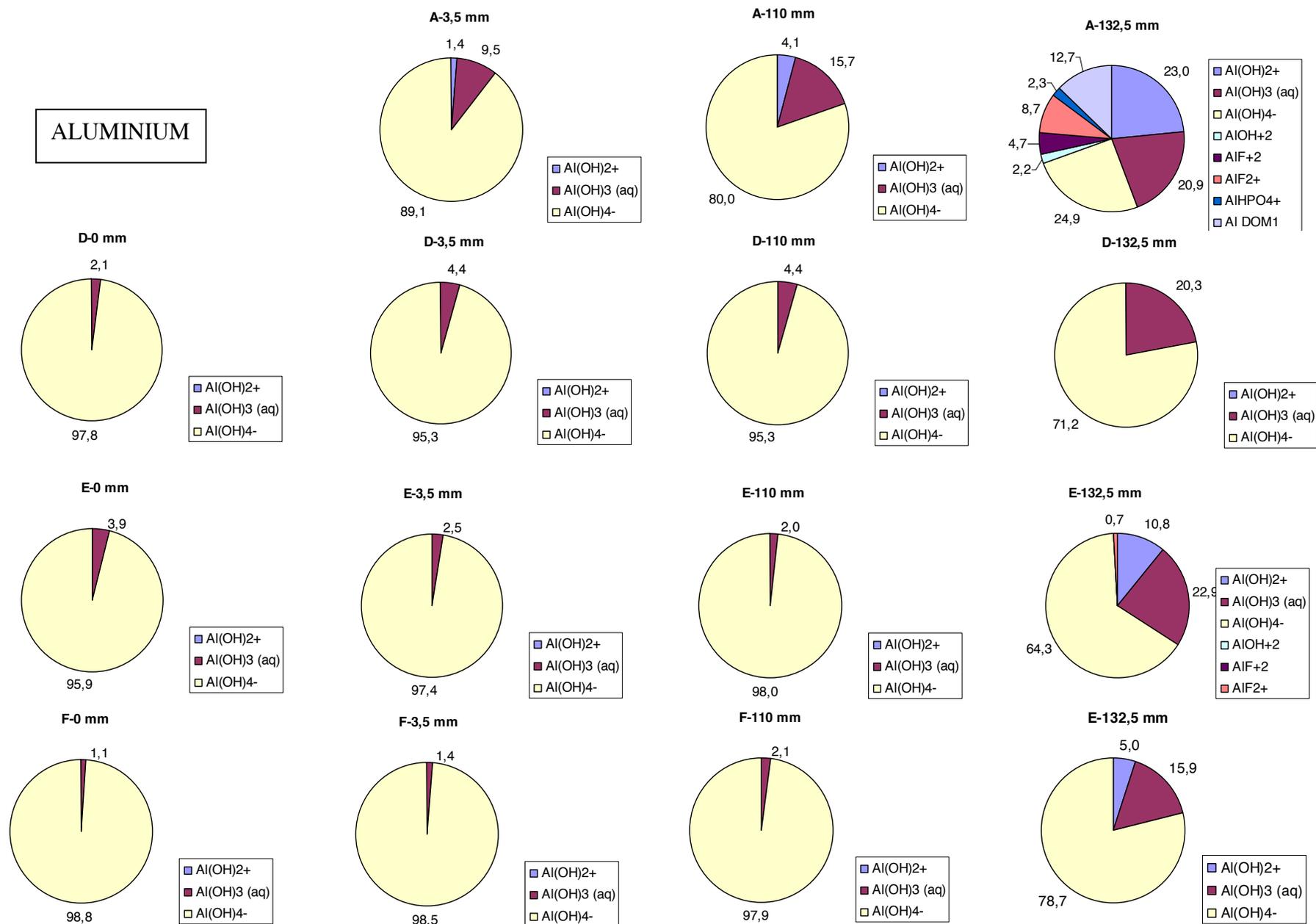


Figure 14 : Evolution de la spéciation de l'aluminium en fonction de la pluviométrie (0, 3.5, 110 et 132.5 mm en 24 heures) ou de la localisation. Les points A (résurgence) et B (exutoire) sont localisés dans la mine de Poro, les points E (rivière) et F (embouchure) dans le village.

MANGANESE

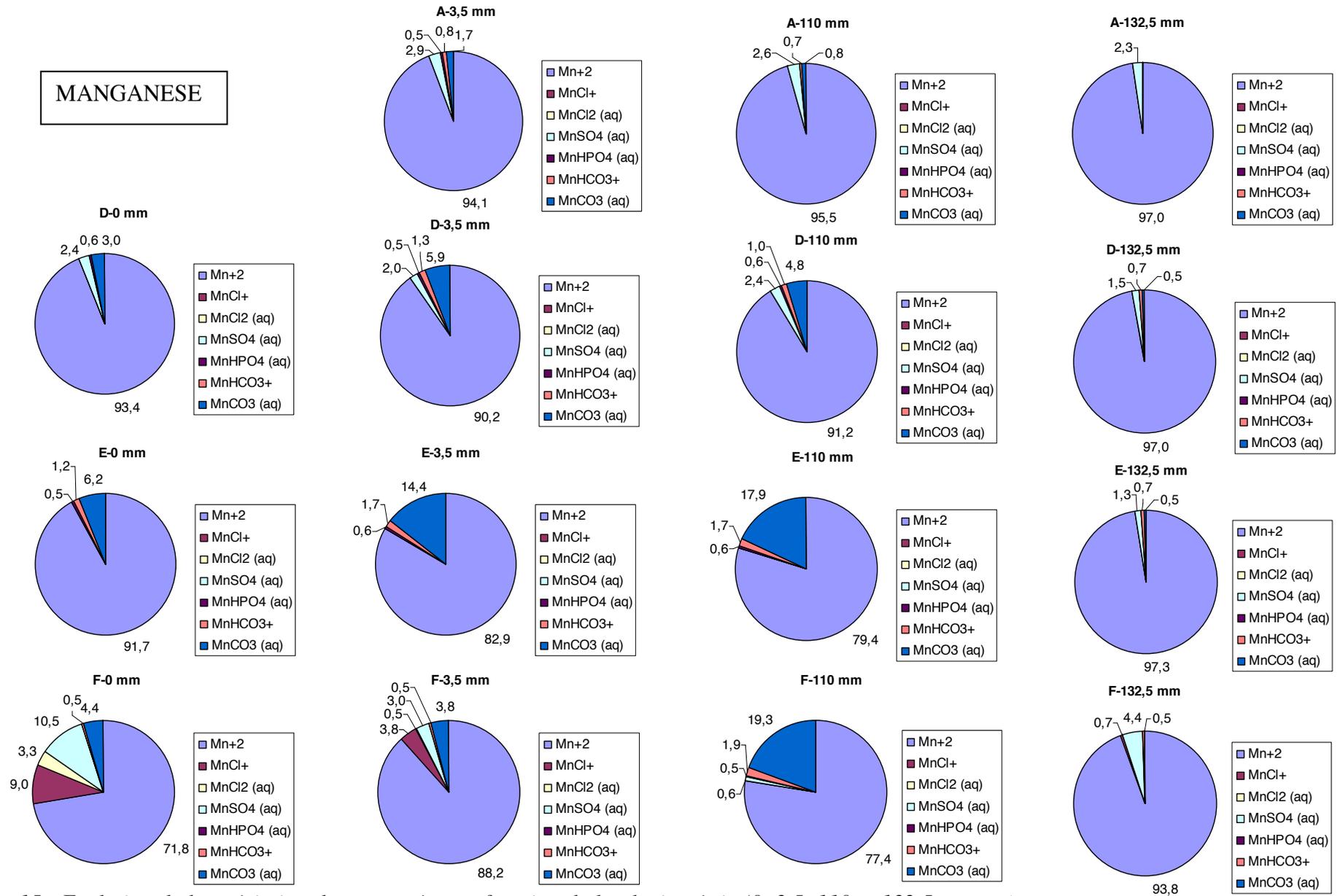


Figure 15 : Evolution de la spéciation du manganèse en fonction de la pluviométrie (0, 3.5, 110 et 132.5 mm en 24 heures) ou de la localisation. Les points A (résurgence) et B (exutoire) sont localisés dans la mine de Poro, les points E (rivière) et F (embouchure) dans le village.

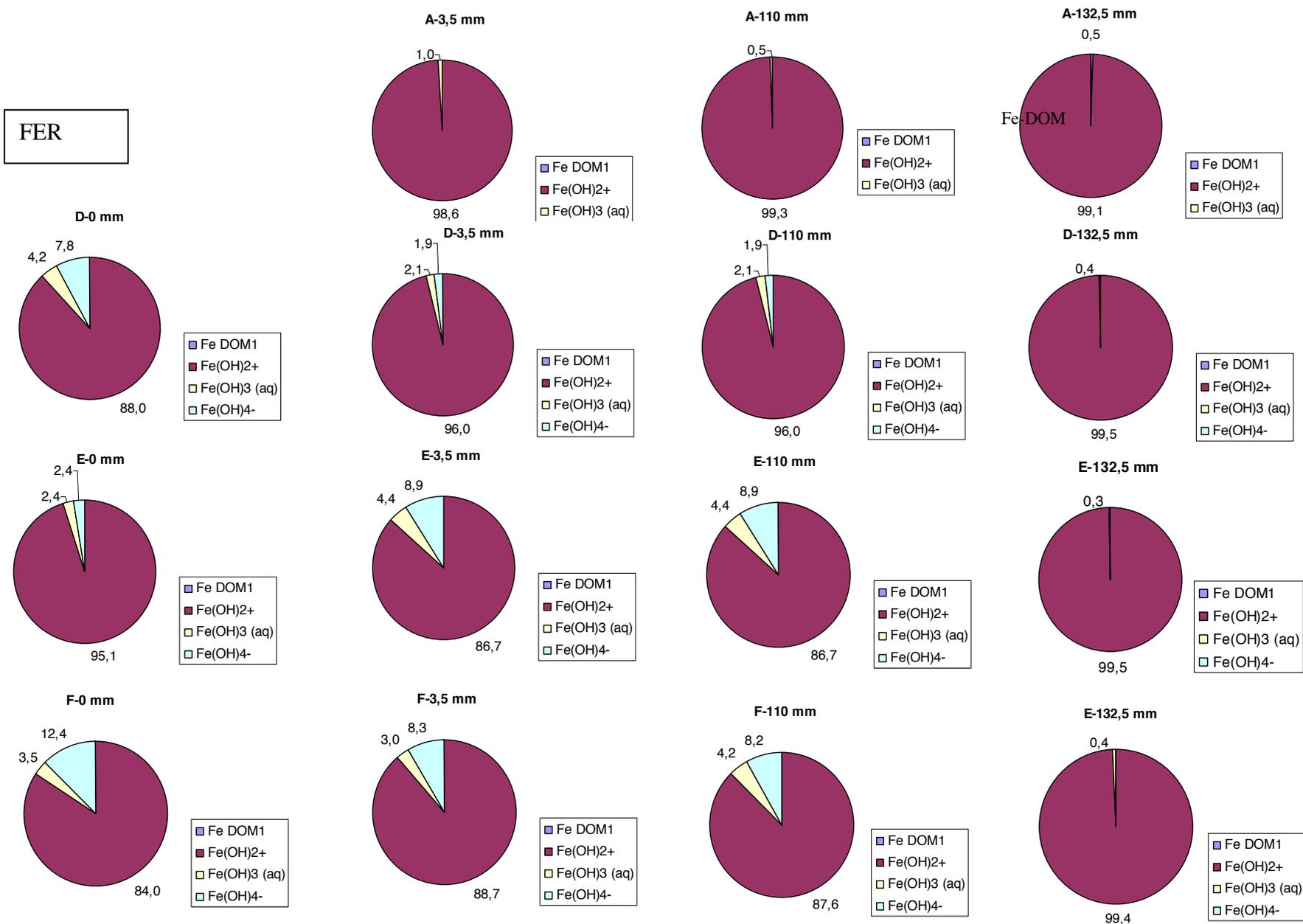


Figure 16 : Evolution de la spéciation du fer en fonction de la pluviométrie (0, 3.5, 110 et 132.5 mm en 24 heures) ou de la localisation. Les points A (résurgence) et B (exutoire) sont localisés dans la mine de Poro, les points E (rivière) et F (embouchure) dans le village.

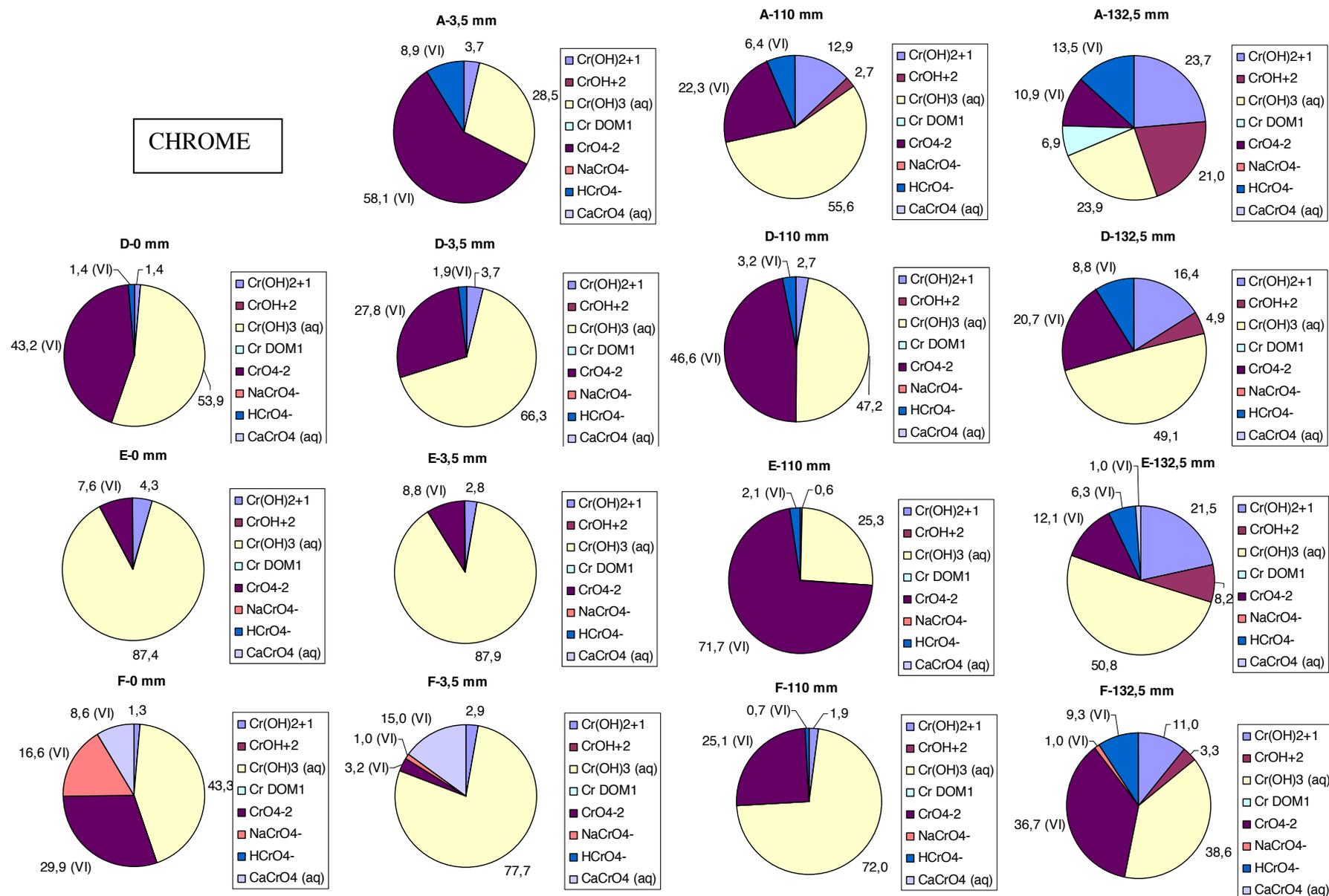


Figure 17 : Evolution de la spéciation du chrome en fonction de la pluviométrie (0, 3.5, 110 et 132.5 mm en 24 heures) ou de la localisation. Les points A (résurgence) et B (exutoire) sont localisés dans la mine de Poro, les points E (rivière) et F (embouchure) dans le village.

7. Les matières en suspension, un vecteur de chrome hexavalent dans les eaux superficielles

Au vue des concentrations en chrome total dissous dans les eaux superficielles, il nous a paru essentiel de comprendre son mécanisme de circulation dans les eaux superficielles influencées par les bassins versants miniers. Ce travail a fait l'objet d'une publication dans une revue internationale de rang A et est intégrée au présent rapport.

Ce travail avait pour but de comprendre l'origine et le mode de circulation du chrome dans les eaux superficielles en contexte minier (figure 18) et sous quelle forme chimique est véhiculé le chrome.

Les phases minérales porteuses de chrome, ici la chromite dans laquelle le chrome est sous sa forme trivalente Cr(III) libère en contexte oxydant du chrome hexavalent CrO_4^{2-} après oxydation du Cr(III) par un agent oxydant environnemental puis ce chrome hexavalent est libéré dans le milieu car il est très soluble. Le principal agent oxydant (Ox) probable dans ce contexte est l'oxygène dissous ou les oxydes de manganèse. Le chrome hexavalent libéré est alors adsorbé à la surface des particules terrigènes d'origine minière et riches en goethite.

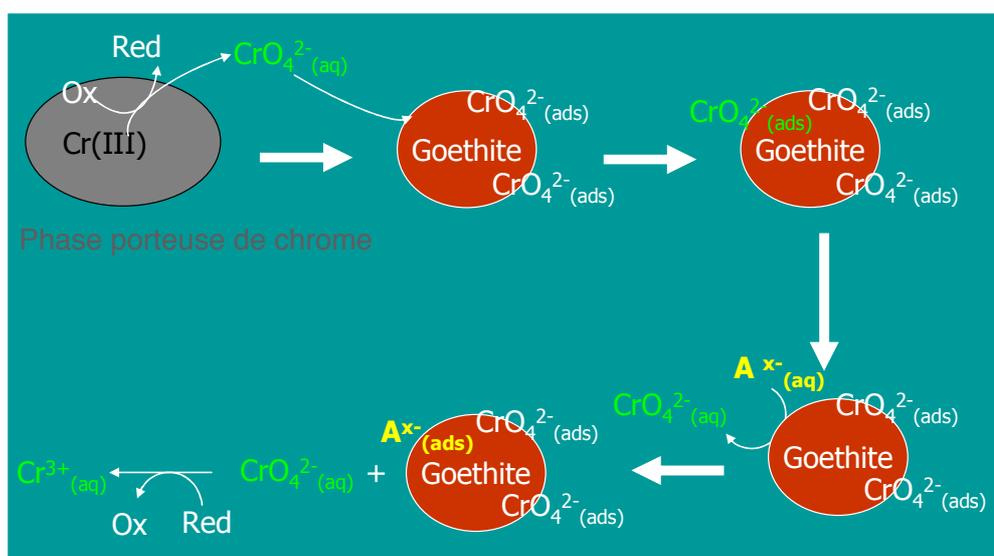


Figure 18 : Schéma de circulation du chrome dans les eaux superficielles en contexte minier

Nous avons montré que les sédiments miniers composés principalement de goethite se chargent en chrome hexavalent (CrO_4^{2-}) lorsqu'ils stagnent par exemple dans les décanteurs. Plus les particules sont petites, plus l'interface particule/solution est élevée et donc plus les surfaces d'adsorption sont élevées. Les petites particules sont alors particulièrement riches en ion chromate adsorbé et la concentration massique en ion chromate adsorbé peut alors atteindre une concentration proche de 900mg/kg. Cette réaction d'adsorption du chrome hexavalent sur les particules riches en

goethite est réversible. Au cours du trajet des particules terrigènes dans les eaux superficielles, le chrome hexavalent peut alors facilement passer en solution si le milieu est agité et/ou riche en anion compétiteur (OH^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} ...). Le transport solide de particules de goethite de petite taille est alors lié à une augmentation de concentration en chrome hexavalent dans les eaux superficielles. Après solubilisation par désorption, le chrome hexavalent peut être réduit en chrome trivalent dissous ($\text{Cr}^{3+}_{(\text{aq})}$). Le chrome est donc libéré exclusivement sous sa forme hexavalent mais peut être converti en chrome trivalent expliquant que des proportions variables de Cr(III) et Cr(VI) aient été mesurées. La principale molécule réductrice (Red) dans un environnement naturel est la matière organique. Ce schéma de circulation permet d'expliquer les fortes concentrations en chrome hexavalent observées lorsque le transport particulaire est important.

Toxic chromium release from nickel mining sediments in surface waters, New Caledonia

Peggy Gunkel-Grillon · Christine Laporte-Magoni ·
Monika Lemestre · Nicolas Bazire

Received: 14 May 2014 / Accepted: 4 July 2014
© Springer International Publishing Switzerland 2014

Abstract Mining sediments are excavated from nickel ore exploitation in New Caledonia. In those sediments, chromium (Cr) occurs as Cr(III), but Cr(III) can be oxidized to the toxic Cr(VI) under oxic conditions, for instance in overlying water. Here, we aimed to determine whether mining sediments could release available Cr(VI) in surface waters. Water samples were collected in a mine and in the village downstream, and then were analysed for Cr. Batch leaching experiments were performed on mining sediments in order to determine their exchangeable and their water-soluble Cr content as a function of pH. Results show that mine waters contain high concentrations of total dissolved Cr, of up to 0.73 mg/L. Moreover, Cr(VI) concentration in village waters increases with the rainfall rate upto 0.34 mg/L. Cr is released from sediments solely as Cr(VI). Desorption of chromate complexes is the main process involved in Cr release. We conclude that drainage of sediments mobilized by opencast Ni mines is a source of toxic Cr(VI) for surface waters.

Keywords Ni mines · Mining sediments · Chromium · Surface water · Ophiolitic substrate

Introduction

New Caledonia is a south-west pacific territory composed by one main island, in a middle of a large lagoon, and three smaller islands, “Loyalty Islands”. The surrounding barrier

reef was listed by UNESCO on the World Heritage List under the name “The Lagoons of New Caledonia: Reef Diversity and Associated Ecosystems” on 7 July 2008. Another important characteristic of New Caledonia is that ophiolitic complexes cover 2/3 of the main island, including alterites with Ni concentrations of economic interest. This Ni enrichment (laterite and saprolite) results from tropical miocene to present weathering of peridotites and pyroxenites. Since nickel ore is located at 10–30 m depth under lateritic levels, extraction technique adopted is strip mining, resulting in large opencast areas. After rainfalls, mining sediments are therefore conveyed along mining catchments, which are a significant water resource for domestic and agricultural use. Moreover, suspended particulate matter can reach quickly rivers and mouths of rivers because Ni mines are located close to the coast. It may result in a diffusive pollution of the lagoon. It is then crucial to understand the reactivity of the suspended particulate matter generated by mining activities. Among the elements present in mining sediments, the trivalent Cr form (Cr(III)) widely occurs in chromite [(Mg,Fe)(Al,Cr,Fe)₂O₄]. Cr(III) leaching rate from chromite minerals depends on pH, but the process is negligible since hexavalent chromium (Cr(VI)) is much more soluble than Cr(III) (Saputro et al. 2014). Cr(VI) is generated due to natural oxidation of Cr(III)-bearing minerals. The occurrence of hexavalent chromium (Cr(VI)) in laterite is related to the oxidative reaction of Cr(III) with Mn oxides (Fandeur et al. 2009). In mining sediments, the predominant mineral phase is goethite FeO(OH). Pure goethite is known to adsorb Cr(VI), and the reaction is reversible (Deng et al. 1996). But besides readsorption of Cr(VI) onto Fe oxyhydroxides, several reactions with or without the support of dissolved species may occur at the interface of these natural mineral mixtures. Reactions may be Cr(VI) reduction and

P. Gunkel-Grillon (✉) · C. Laporte-Magoni · M. Lemestre ·
N. Bazire
PPME Laboratory, Université de la Nouvelle-Calédonie BPR4,
98851 Nouméa cedex, Nouvelle-Calédonie, France
e-mail: peggy.gunkel-grillon@univ-nc.nc

precipitation or Cr(VI) reduction and readsorption (Saputro et al. 2014). Mining sediments may then become a source of chromium for aqueous media by Cr(VI) or Cr(III) desorption, or dissolution of Cr(III) precipitates formed at the interface. In open-cast Ni mining systems, generated sediments contain Cr(III)-bearing phases, Mn oxides and Fe oxyhydroxides, suggesting that after excavation, they should become a reservoir of Cr(III) and Cr(VI); since under oxic conditions, the transformation of Cr(III) to Cr(VI) should be facilitated and the secondary sorption reaction onto Fe oxides should significantly occur. The aim of the present study was to determine under realistic environmental conditions which oxidative state Cr(III) or Cr(VI) is significantly leached from Cr(III)-bearing minerals and then which oxidative state is involved in chromium circulation in surface waters influenced by Ni mining activities. Cr(VI) is considered as the most toxic form for living organisms. It can affect vital organs of freshwater fish (Mishra and Mohanty 2008), cause toxic and tissue-specific genotoxic effects to freshwater stinging catfish (Ahmed et al. 2013), and affect testicular function of adult male rats (Marouani et al. 2012) or photosynthesis in plants (Rodriguez et al. 2012). It is also carcinogenic for the human body (International Agency for Research on Cancer 1990). Cr(III) is an essential nutrient for animal metabolism (Anderson 1981), but accumulated at high levels, it can anyway generate serious troubles and diseases (Meibian et al. 2008).

The objectives of the present study were to analyse chromium content in mining-influenced surface waters and to evaluate the potential of Cr release from mining sediments. The exchangeable Cr(VI) content was determined with $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ or KH_2PO_4 0.1 M solution designed to remove sorbed chromate. The water-soluble Cr content as a function of pH is also determined. pH is one of the key parameters for heavy metals mobility in sediments (Gäbler 1997), and thus, the water-soluble Cr content is determined for a wide range of pH encountered in natural waters. This is the first time that Cr concentration and speciation are determined in waters influenced by Ni mining activities in New Caledonia and the results of the present study may then have implications for management of mining catchments.

Experimental

Site description

New Caledonia is located in the south-west Pacific Ocean (20–23°S). Its subtropical climate varies from a hot and humid period with high rainfalls (November to March) to a dry period (June to August). The studied site is the mining

centre of Poro, the oldest mining centre (exploitation from 1874), located on the east coast of New Caledonia. The mining site includes ultramafics (harzburgite, websterite) and their derived weathered rocks (sapolite, laterite). The Poro catchment surface is 33.3 ha, and the annual rainfall average is 2,801.5 mm/year (average of 2013, 2012, 2011 and 2010 for Poindimié; www.meteo.nc). Infrastructures exist to ensure the waters retention using bridging methods of the bench walls to sustain the residues and attenuate the erosive capacity of the waters' flow and also using rain-water channelling, drainage and sedimentation.

Sampling

Five sampling sites were selected from the top of the mining catchment to the mouth of the river (Fig. 1). A, B and D are sites located within the mine boundaries, while E and F are located downstream in the village of Poro.

Water samples were collected at the top of the mine at a resurgence just below carries (A), at the bottom of the mine outlet the latest settling tank of the mine (D), in the river going through Poro village (E) and at the mouth of the river (F). Samples were collected within the humid period from 14 March 2011 to 29 April 2011 after two high rainfall rates (100 mm/24 h and 132.5 mm/24 h), a medium and a low rainfall rate (50 mm/24 h and 3.5 mm/24 h) and without rainfall (0 mm/24 h). Water samples, collected in HDPE bottles, were kept at 6 °C prior to analysis.

Two sediment samples were collected: one at the top of the mine in a settling tank located at the upstream part of the first outlet (B) and another one at the bottom of the mine in the latest settling tank of the mine (D). About 2 kg was collected from the top layer (0–30 cm), dried at 45 °C until constant weight, sieved at 2 mm and manually mixed to obtain a homogenous material.

Extraction procedures and analytical techniques

Exchangeable anionic chromium (exchangeable Cr(VI)) was extracted by shaking 1 g of sediment with 34 mL of KH_2PO_4 0.1 M (1 h, 20 °C).

Water-soluble Cr was extracted as a function of pH by shaking 6 g of sediments in 30 ml of deionized water with pH acidified or alkalinized with HNO_3 or NaOH or buffered with MES (2-(*N*-morpholino)ethanesulfonic acid) or HEPES (4-(2-hydroxyethyl)-1-piperazineethanesulfonic acid) or MOPS (3-(*N*-morpholino)propanesulfonic acid) 0.1 M around neutral pH because of the buffer capacity of sediments.

Water samples and leachates were filtered at 0.22 µm before analysis. Cr(VI) concentration was measured using spectrophotometric determination of a complex formed with diphenylcarbazide (absorption at 540 nm), and total

Fig. 1 The mining centre, the village of Poro and location of the five sampling sites at the *top* of the mining catchment (*A, B*), at the *bottom* of the mine (*D*), in the river (*E*) and at its mouth (*F*). Pictures of the river before and after a rainfall show particulate matter run-off



Cr (Cr(III) + Cr(VI)) was measured by atomic absorption spectrometry according to the AFNOR French procedure (NF EN 1233, AFNOR 1996). All reagents were of analytical grade.

Particle size analysis (volume-based measurement) was performed using a Malvern Mastersizer 2000 Particle Size Analyser. Mineral phases were identified from powder by X-ray diffraction of sediments with Inel CPS 120 instrument.

Results

Dissolved chromium content in surface waters

Total dissolved Cr content in surface waters is high and ranges from 0.05 to 2.41 mg/L (Fig. 2a). Cr contents are higher in mine waters than in village waters. At the top of the mine (A), total Cr decreases as the rainfall rate increases, while in the village, at the mouth of the river (F) it increases as the rainfall rate increases.

Dissolved Cr(VI) content in mine waters (A, D) is very high ranging from 0.18 to 1.62 mg/L (Fig. 2b). The dissolved Cr(VI) content in village waters (E, F) is lower than in mine water ranging from 0.02 to 0.34 mg/L (Fig. 2c). Cr(VI) content at the top of the mine (A) decreases as the rainfall rate increases (Fig. 2 b) such as previously observed for the total Cr content. Cr(VI) content reduces significantly with rainfall rate at the top of the mine (A) due to dilution even if the concentrations remain very high. At the bottom of the mine (D), it is quite constant (Fig. 2c). In village waters (E, F), Cr(VI) content increases significantly with the rainfall rate (Fig. 2c). After rainfalls, there is a sediment load in the river (Fig. 1) and Cr(VI) dilution is then probably counterbalanced by Cr

remobilization from suspended materials provided by mining sediments. As demonstrated for Pb and Zn (Superville et al. 2014), metal desorption from disturbed sediments is the most relevant process responsible for the Cr content increase in surface waters.

Chromium leaching behaviour in mining sediments

In mining sediments, chromium is one of the major components after iron and magnesium since chromium oxide content is, respectively, 1.6 and 3.1 % in sediments collected at the top (B) and the bottom (D) of the mine (Table 1). The main mineral phases identified for both sediments on the X-ray diffractograms are goethite, talc and serpentine; goethite is dominant.

Exchangeable hexavalent chromium as a function of particle size

Exchangeable Cr(VI) content is very high for sediments collected at the top of the mine (B) with 577 mg/kg, while it is 9 times lower for those collected at the bottom (D) with 64 mg/kg (Table 1). These concentrations are in good agreement with contents of exchangeable Cr(VI) found for ultramafic soils with contents sometimes upper than 1000 mg/kg (Becquer et al. 2003, Garnier et al. 2006, Raous et al. 2013). With the hypothesis of desorption reaction, anionic hexavalent chromium content should be related to sediments texture. Sediment B is fractionated in three granulometric fractions by sieving in order to get five samples with different texture: crude sediment B with $Dv_{90} = 76 \mu\text{m}$, crude sediment D with $Dv_{90} = 502 \mu\text{m}$, the granulometric fraction of B $>2000 \mu\text{m}$ (no size analysis possible for such large particles) and two granulometric fractions of B with $Dv_{90} = 44$ and $Dv_{90} = 154 \mu\text{m}$.

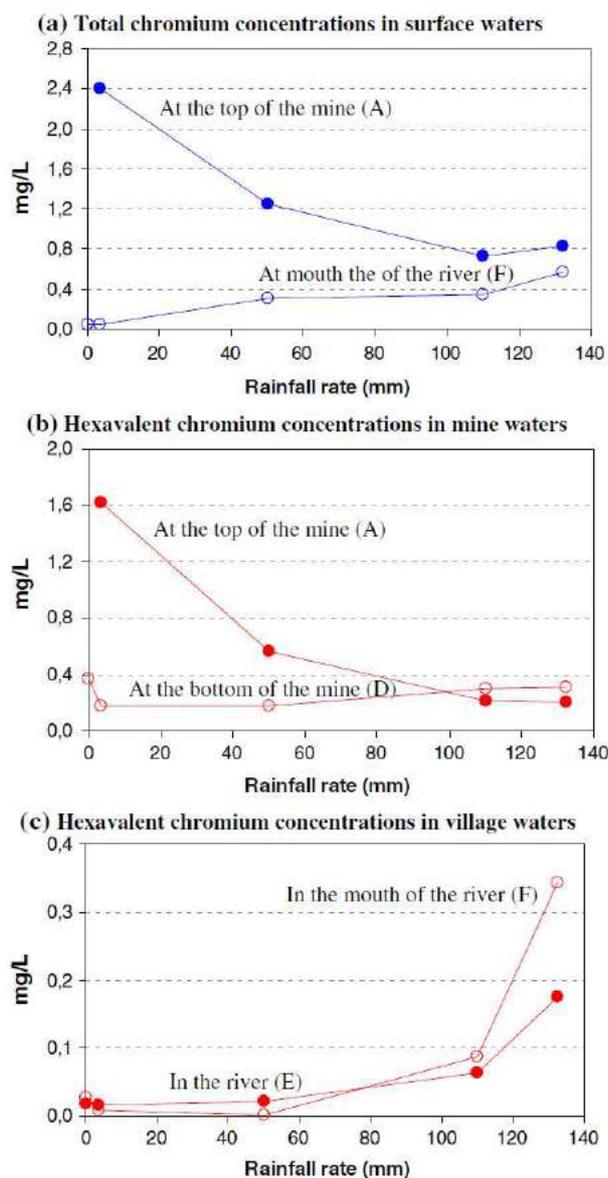


Fig. 2 Total chromium and hexavalent chromium concentrations as a function of the rainfall rate. They both decrease at the *top* of the mine, while they both increase at the mouth of the river

Results show that exchangeable Cr(VI) content decreases when particle size increases (Fig. 3a). Cr(VI) occurs then as sorption complexes. Mining sediments are then an important reservoir of exchangeable Cr(VI), especially the thinnest fractions.

Water-soluble chromium as a function of time and pH

Batch leaching experiments on the crude sediment B (fraction Dv90 = 76 μm) were performed at various pH and demonstrate that no significant amount of water-

Table 1 Physico-chemical properties of mining sediments: mean values ($n = 3$) for elemental composition (percentage weight), for exchangeable anionic chromium content and for Dv 90 (maximum particle diameter below which 90 % of the sample volume exists)

(wt%)	Physico-chemical properties of mining sediments collected	
	At the top of the mine (B)	At the bottom of the mine (D)
Fe ₂ O ₃	44.5	44.6
SiO ₂	20.3	23.2
MgO	11.8	11.0
Cr ₂ O ₃	1.6	3.1
NiO	2.4	1.5
Al ₂ O ₃	1.6	2.0
MnO	0.7	0.6
CaO	0.05	0.05
TiO ₂	0.05	0.10
CoO	0.09	0.07
Exch. Cr(VI) (mg/kg)	577 \pm 9	64 \pm 5
Dv 90 (μm)	76 \pm 5	502 \pm 11

soluble Cr(III) is detected (Fig. 3b). It indicates that Cr is only released as Cr(VI) and that no significant Cr(III) desorption or dissolution of Cr(III) precipitates occurs. Cr(VI) release is fast (high concentrations measured as soon as 1 h), and the rate of dissolved Cr reaches a maximum value of 358 \pm 16 mg/kg after 8 h for pH 12.6 and 31 \pm 1 mg/kg for pH 7.5 (Fig. 3b). Over the entire pH range tested (5.9–12.6), the water-soluble Cr(VI) fraction increases with the pH of the solution (Fig. 3c) and no significant amount of Cr(III) was measured. It is known that chromate ions adsorption by Mn, Fe and Al oxides decreases as pH increases (Richard and Bourg 1991). The process involved with mining sediments, which main mineral phase is goethite, is then the opposite process, *i.e.* increasing Cr(VI) desorption with pH. Here, we then demonstrate that mining sediments are a reservoir of easily leachable Cr(VI), especially when alkaline media are of concern. Afterwards, dissolved Cr(VI) can be reduced to Cr(III) in the aqueous media by organic matter such as humic substances (Saputro et al. 2014).

Conclusion

Mine waters and village waters contain high Cr contents as Cr(VI) but also as Cr(III). Batch experiments demonstrated that mining sediments are an important reservoir of easily leachable Cr(VI), and Cr(VI) leaching depends on pH and on sediments texture. Cr(III) leaching is negligible, and no significant Cr(III) desorption or Cr(III) precipitates

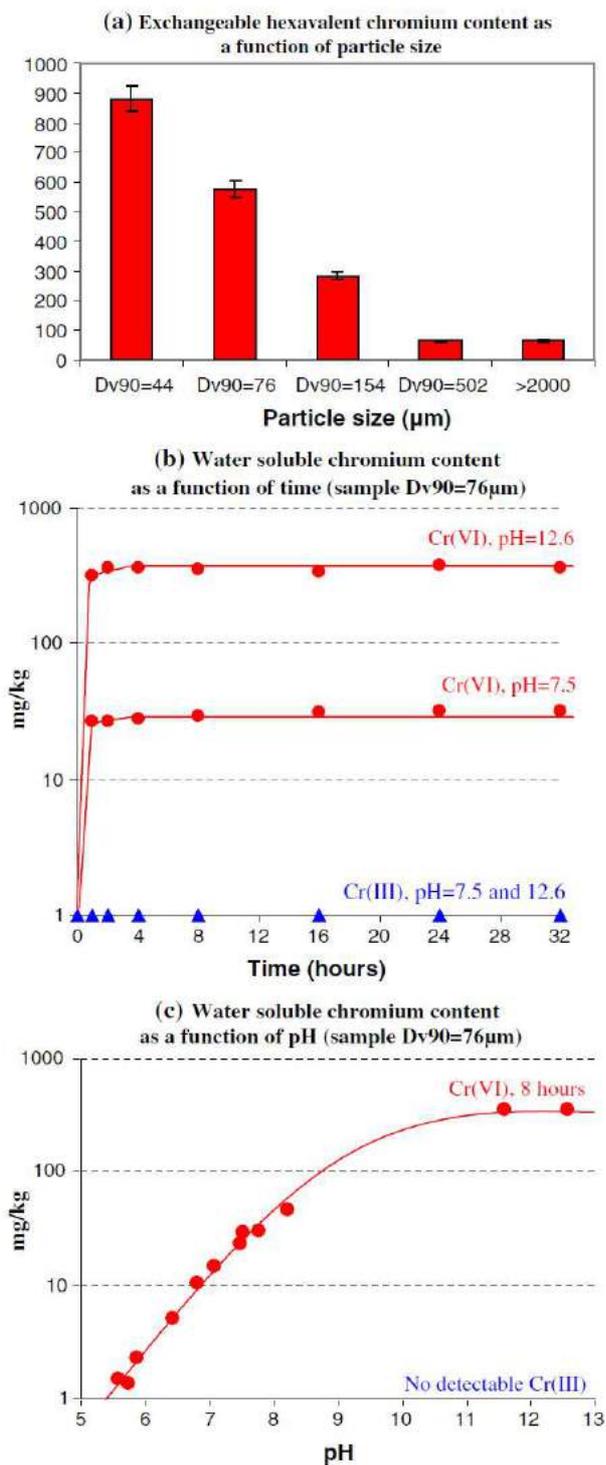


Fig. 3 Chromium leaching behaviour in mining sediments. Mining sediments release chromium only as its hexavalent form

dissolution occurs. Cr circulation in water is then here related to Cr(VI) desorption. Thus, run-off from the mines carries along suspended particulate matters able to easily

and quickly release Cr(VI) when the medium is disturbed and/or when the pH of the media increases such as in the mouth of the river or in the sea water. Afterwards, Cr(VI) can be reduced to Cr(III) in the aqueous media depending on local chemical composition. This study demonstrates, through the example of Poro, that drainage of ultramafic material mobilized from Ni mines is a source of Cr as Cr(VI) for local surface waters. For a sustainable exploitation of mining resource compatible with the conservation of the natural environment of New Caledonia, the authors greatly encourage mining industries to prevent transport of solid matter in mining catchment including the thinnest solid matter.

Acknowledgments This work was supported by the National Centre for Technological Research on “Nickel and its Environment” (Centre National de Recherche Technologique, CNRT “Nickel et son environnement”) within the programme “functioning of small mining catchment areas” (2009–2014).

References

AFNOR (1996) NF EN 1233, Water quality-determination of chromium- Atomic absorption spectrometric methods

Ahmed MK, Kundu GK, Al-Mamun MH, Sarkar SK, Akter MS, Khan MS (2013) Chromium (VI) induced acute toxicity and genotoxicity in freshwater stinging catfish, *Heteropneustes fossilis*. *Ecotoxicol Environ Saf* 92:64–70

Anderson RA (1981) Nutritional role of chromium. *Sci Total Environ* 17:13–29

Becquer T, Quantin C, Sicot M, Boudot JP (2003) Chromium availability in ultramafic soils from New Caledonia. *Sci Total Environ* 301:251–261

Deng Y, Stjernström M, Banwart S (1996) Accumulation and remobilization of aqueous chromium (VI) at iron oxides surfaces: application of a thin-film continuous flow-trough reactor. *J Contam Hydrol* 21:141–151

Fandeur D, Juillot F, Morin G, Olivi L, Cognigni A, Webb SM, Ambrosi JP, Frisch E, Guyot F, Gordon E, Brown JR (2009) XANES Evidence for Oxidation of Cr(III) to Cr(VI) by Mn-Oxides in a Lateritic Regolith developed on Serpentinized Ultramafic Rocks of New Caledonia. *Environ Sci Technol* 43:7384–7390

Gäbler H-E (1997) Mobility of heavy metals as a function of pH of samples from an overbank sediment profile contaminated by mining activities. *J Geochem Explor* 58:185–194

Garnier J, Quantin C, Martins ES, Becquer T (2006) Solid speciation and availability of chromium in ultramafic soils from Niquelândia, Brazil. *J Geochem Explor* 88:206–209

International Agency for Research on Cancer (1990) World Health Organization, Chromium, Nickel and Welding. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 49, IARRC, WHO, Lyon, 1990

Marouani N, Tebourbi O, Mahjoub S, Yacoubi MT, Sakly M, Benkhalifa M, Rhouma KB (2012) Effects of hexavalent chromium on reproductive functions of male adult rats. *Reprod Biol* 12(2):119–133

Meibian Z, Zhijian C, Qing C, Hua Z, Jianlin L, Jiliang H (2008) Investigating DNA damage in tannery workers occupationally exposed to trivalent chromium using comet assay. *Mut Res* 654:45–51

- Mishra AK, Mohanty B (2008) Acute toxicity impacts of hexavalent chromium on behaviour and histopathology of gill, kidney and liver of the freshwater fish *Channa punctatus* (Bloch). *Environ Toxicol Pharmacol* 26:136–141
- Raous S, Echevarria G, Sterckeman T, Hanna K, Thomas F, Martins ES, Becquer T (2013) Potentially toxic metals in ultramafic mining materials: identification of the main bearing and reactive phases. *Geoderma* 192:111–119
- Richard FC, Bourg ACM (1991) Aqueous geochemistry of chromium: a review. *Water Res* 25(7):807–816
- Rodríguez E, Santos C, Azevedo R, Moutinho-Pereira J, Correia C, Dias MC (2012) Chromium (VI) induces toxicity at different photosynthetic levels in pea. *Plant Physiol Biochem* 53:94–100
- Saputro S, Yoshimura K, Matsuoka S, Takehara K, Narsito, Aizawa J, Tennichi Y (2014) Speciation of dissolved chromium and the mechanisms controlling its concentration in natural water. *Chem Geol* 364:33–44
- Superville P-J, Prygiel E, Magnier A, Lesven L, Gao Y, Bæyens W, Ouddane B, Dumoulin D, Billon G (2014) Daily variations of Zn and Pb concentrations in the Deûle River in relation to the resuspension of heavily polluted sediments. *Sci Total Environ* 470–471:600–607

8. Conclusions et perspectives

Dans le cadre de ce programme, il était prévu de déployer *in situ* des capteurs DGT pour la mesure des concentrations en espèces métalliques libres et labiles (mesures de spéciation en solution) et de réaliser au laboratoire les mesures de concentrations en nickel libre grâce aux méthodes IET (Ion Exchange Techniques). Ces mesures auraient permis de confirmer pour le nickel les calculs de spéciation. Ces analyses n'ont pas été réalisées car nous avons jugé prioritaire de comprendre le mécanisme de circulation du chrome dans les eaux superficielles influencées par les bassins versants miniers.

Cette première étude a été réalisée avec un nombre qui reste limité de mesures (19 échantillons d'eau) car le but était de dégager les grandes tendances d'évolution de la composition chimique des eaux de ruissellement de la mine au lagon et ceci a nécessité l'analyse de nombreux paramètres. Les résultats, qui sont donc à manipuler avec précaution car il faudrait réaliser une étude de plus grande ampleur pour une statistique plus robuste ont cependant permis de dégager les observations utiles suivantes :

- une quantité significative de particules sédimentaires quittent le site minier lors des fortes pluies. Des quantités importantes de matières en suspension ont été mesurées dans la rivière du village de Poro influencée par le bassin versant minier et donc également à son embouchure. Les MES ont un rôle dans l'évolution de la chimie des eaux de la mine au lagon, elles sont des sources de chrome (VI) mobilisable dans les eaux de surface. Les MES sont également des sources potentielles de nickel, d'aluminium, de manganèse et de fer.

- la composition chimique des eaux de ruissellement des bassins versants miniers évolue avec la pluviométrie. Malgré la dilution des eaux de surface par la pluie, confirmée grâce à la diminution de concentration du chlore avec la pluviométrie, les concentrations en solutés peuvent augmenter avec la pluviométrie. Les concentrations en nickel augmentent fortement dans la rivière et à l'embouchure lorsqu'il pleut. L'aluminium n'est pas fortement mobilisé mais juste suffisamment pour compenser la dilution, le manganèse est très fortement mobilisé à l'embouchure, et le fer est également fortement mobilisé à l'embouchure. Ces éléments pourtant plutôt peu solubles sont alors très probablement libérés à partir des matières en suspensions.

- Avec la pluviométrie, la concentration en ion magnésium, calcium, sodium et potassium baisse ce qui souligne que la réaction de solubilisation des éléments tels que nickel, aluminium, fer et manganèse par compétition pour des sites d'adsorption de ces éléments sur les matières en suspension n'est pas une réaction prépondérante dans les eaux douces. Par contre une fraction de ces éléments peut être libérée via ce mécanisme lorsque les matières en suspension arrivent à l'embouchure. Et la quantité de MES, importante pour les fortes pluies, peut induire une forte mobilisation de ces éléments à l'embouchure via ce mécanisme. Des réactions complémentaires au laboratoire sont nécessaires pour confirmer que l'augmentation de la force ionique peut induire une libération à partir des sédiments miniers de nickel, fer, manganèse et aluminium.

-la composition chimique des eaux de ruissellement des bassins versants miniers évolue finalement assez peu le long du parcours de la mina au lagon, sauf pour l'ion chromate dont la concentration sur site minier est très supérieures à la concentration dans le village. Il faut également noter que la composition en soluté est très différente à l'embouchure de la rivière avec de fortes augmentations en cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) pouvant justement induire des réactions de désorption à partir des MES des éléments métalliques Fe^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} et Ni^{2+} . Les concentrations en anions (Cl^- et SO_4^{2-}) sont également très supérieures au niveau de l'embouchure, mais le pouvoir de complexation de ces anions pour favoriser le transfert du fer, du nickel, du manganèse, du chrome(III) ou de l'aluminium de la phase solide vers phase liquide est assez faible.

-dans ce contexte minier, les concentrations en carbone organique dissous sont le plus souvent très faibles. Seuls le nickel et le chrome (III) sont significativement liés à la matière organique dissoute d'après calculs. Si le nickel se lie à la matière organique dans ce contexte physico-chimique cela implique que la matière organique peut favoriser des réactions de solubilisation du nickel et donc dans des réactions de transfert du nickel de la phase solide (MES) vers la phase liquide. Il serait nécessaire d'étudier le transfert du nickel à partir des MES d'origine minière en présence de carbone organique dissous pour confirmer cette hypothèse. Par contre, la matière organique dissoute ne participe pas à la solubilisation du chrome car nous avons montré que le chrome est solubilisé uniquement sous sa forme hexavalente. Par contre la présence de matière organique peut favoriser le maintien de Cr(III), peu soluble, en solution.

-L'ion cyanure peut également contribuer à des réactions de transfert du nickel de la phase solide vers la phase liquide car il est fortement lié au nickel dans ce contexte.

-l'aluminium et le fer sont liés uniquement à l'ion hydroxyde dans ce contexte, ce qui peut expliquer que l'aluminium est peu mobilisé. Le fer l'est plus que l'aluminium mais parce que sa proportion dans les MES est également très largement supérieure à celle du fer. Mais le fer n'est pas dans un contexte physico-chimique particulièrement favorable à un transfert vers la phase aqueuse.

-des études complémentaires sont nécessaires pour déterminer la réactivité des matières en suspension et plus précisément leur potentiel de libération d'éléments métalliques dans diverses conditions pour confirmer les paramètres clés des réactions de solubilisation de ces éléments à partir des matières en suspension et confirmer les affirmations précédentes. Ces questions seront abordées dans la réponse à l'appel à projet de la programmation 2013 du CNRT dans le projet Dynamine qui traite entre autre de la réactivité des sédiments miniers et permettra de compléter ces premiers résultats. Ce projet traitera également de l'évolution de la réactivité des sédiments miniers en conditions anoxiques, ce qui n'a pas du tout été abordé ici.

-L'étude des concentrations en chrome dans les eaux superficielles et de la réactivité des sédiments miniers prélevés sur le site de Poro a permis de montrer que les sédiments miniers sont des vecteurs de chrome hexavalent facilement disponible car adsorbé à la surface des particules sous sa forme hexavalente exclusivement. Le chrome hexavalent est toxique et est classé avec le plomb, le mercure, le cadmium, les polybromobiphényle (PBB) et les polybromodiphényléthers (PBDE) comme l'une

des six substances dangereuses dont il faut limiter l'utilisation. Pour une exploitation minière durable, compatible avec la préservation des écosystèmes en aval, nous recommandons donc de prévenir le transport de matière en suspension y compris les plus petites particules dont la concentration massique en chrome hexavalent peut être très élevée (jusqu'à 900mg/kg). De nombreux articles sont disponibles dans la littérature, principalement pour présenter des résultats d'études sur le traitement des effluents de tanneries riches en chrome hexavalent. Ces articles proposent, entre autres solutions, d'utiliser des débris de végétaux pour réduire le chrome hexavalent en ion Cr^{3+} . Après étude de faisabilité et d'efficacité il pourrait par exemple être envisagé de placer à l'exutoire des débris de végétaux traversés par les flux d'eau pour réduire le chrome et limiter au mieux l'impact environnement de la circulation de chrome.

Références bibliographiques

Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martínez-Martínez S. 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, Volume 85, Issue 8, 1318–1324.

Albuquerque J.A., de la Fuente C., Bernal M.P. 2011. Improvement of soil quality after "alperujo" compost application to two contaminated soils characterised by differing heavy metal solubility. *Journal of Environmental Management* 92, 733-741.

Ambatsian P., Fernex F., Bernat M., Parron C. and Lecolle J. (1997) High metal inputs to closed seas: The New Caledonian lagoon. *J. Geochem. Explor.*, 59, 59-74.

Andréfouët S. and Wantiez L. (2010) Characterizing the diversity of coral reef habitats and fish communities found in UNESCO World Heritage Areas: the strategy applied for New Caledonia. *Mar. Pollut. Bull.*, 61, 612–620.

Buffle J. et De Vitre R.R, (1994) Chemical and biological regulation of aquatic systems, chapter "Uptake of trace metals by aquatic organisms". CRC Press.

Costa M. (2003) Potential hazards of hexavalent chromate in our drinking water. *Toxic. Appl. Pharmac.*, 188, 1-5.

Dalto A.G., Gremare A., Dinet A. and Fichet D. (2006) Muddy-bottom meiofauna responses to metal concentrations and organic enrichment in New Caledonia South-West Lagoon. *Est. Coast. Shelf Sc.*, 67, 629-644.

Deng Y., Stjernström M. and Banwart S. (1996), Accumulation and remobilization of aqueous chromium (VI) at iron oxide surfaces: application of a thin-film continuous flow-trough reactor. *Journal of contaminant hydrology*, 21, 141-151.

Dupouy C., Neveux J., Dirberg G., Röttgers R., Ténorio M.M.B., and Ouillon S. (2008) Bio-optical properties of the marine cyanobacteria *Trichodesmium* spp. *J. Appl. Rem. Sens.*, 2:023503.

- Fernandez J.M., Ouillon S., Chevillon C., Douillet P., Fichez R. and Le Gendre R. (2006) A combined modelling and geochemical study of the fate of terrigenous inputs from mixed natural and mining sources in a coral reef lagoon (New Caledonia). *Mar. Poll. Bul.*, 52, 320-331.
- Fuchs R., Dupouy C., Douillet P., Caillaud M., Mangin A. and Pinazo C. (2012) Modelling the impact of a La Nina event on a South West Pacific Lagoon. *Mar. Poll. Bul.*, 64, 1596-1613.
- Gad S.C. (1989) Acute and chronic systemic chromium toxicity. *Sc. Tot. Environ.*, 86, 149-157.
- Gunkel P., Jézéquel K., Fabre B. 2002. Temporal evolution of copper distribution in soil fractions, influence of soil pH and organic carbon level on copper distribution. [Environmental Technology](#), Volume 23, Issue 9, 1001-1008.
- Marchand C., Allenbach M. and Lallier-Verges E. (2011) Relationships between heavy metals distribution and organic matter cycling in mangrove sediments (Conception Bay, New Caledonia). *Geoderma*, 160, 444-456.
- Pérez-Esteban J., Escolástico C., Moliner A., Masaguer A. 2013. Chemical speciation and mobilization of copper and zinc in naturally contaminated mine soils with citric and tartaric acids. *Chemosphere* 90, 276–283.
- Slaveykova, V. I. and Wilkinson J.(2002), Physicochemical Aspects of Lead Bioaccumulation by *Chlorella vulgaris*, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 969-975
- Superville P-J, Prygiel E, Magnier A, Lesven L, Gao Y, Bæyens W, Ouddane B, Dumoulin D, Billon G (2014). Daily variations of Zn and Pb concentrations in the Deûle River in relation to the resuspension of heavily polluted sediments. *The Sci. of the Total Environ.* 470-471, 600-607.
- Worms I., Simon D.F., Hassler C.S., Wilkinson K.J, 2006, Bioavailability of trace metals to aquatic microorganisms: importance of chemical, biological and physical processes on biouptake *Biochimie* 88, 1721–1731
- International Agency for Research on Cancer (1990) World Health Organization, Chromium, Nickel and Welding. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 49, IARRC, WHO, Lyon, 1990.
- Yuan S., Xi Z., Jiang Y., Wan J., Wu C., Zheng Z. and Lu X., 2007. Desorption of copper and cadmium from soils enhanced by organic acids. *Chemosphere* 68, 1289-1297.
- Zeng F., Ali F., Zhang H., Ouyang Y., Qiu B. and Wu F., 2011. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants. *Environmental Pollution*, 159, 84-91.
- Zhao S., Chenghong Feng C., Wang D., Liu Y., Shen Z. 2013; Salinity increases the mobility of Cd, Cu, Mn, and Pb in the sediments of Yangtze Estuary: Relative role of sediments' properties and metal speciation. *Chemosphere* 91, 977–984

1.6 Modélisation de l'érosion des bassins versants à grande échelle

Nazha Selmaoui-Folcher (UNC)





Université de la Nouvelle Calédonie – PPME
CNRT "Nickel & Environnement"

Rapport final du projet CNRT-FPBV

Université de la Nouvelle-Calédonie

Volet IV : Modélisation de l'érosion des
bassins versants à grande échelle

Naha SELMAOUI-FOLCHER

Frédéric FLOUVAT

Table des matières

1	Contexte	3
2	Introduction	3
3	Etat de l'art	4
3.1	Fouille de données : rappel	4
3.2	Analyse de séries temporelles d'images satellites	7
3.2.1	Approche pixel	7
3.2.2	Approche objet	8
3.2.3	Approche classique	9
3.2.4	Détection de changements	9
3.3	Extraction de motifs dans des bases de données spatio-temporelles	10
3.3.1	Suivi de trajectoires d'objets mobiles	10
3.3.2	Dynamique spatio-temporelle de phénomènes en fonction de leur environnement	12
4	Méthode de suivi des évolutions dans une série temporelle d'images	20
4.1	Problème et motivations	20
4.2	Méthode de fouille dans un a-DAG	22
4.2.1	Chemins pondérés : concepts et définitions	23
4.2.2	Algorithme d'extraction de motifs et son implémentation optimisée	24
4.3	Processus complet d'analyse de séries temporelles d'images	28
4.3.1	Processus de fouille	29
4.3.2	Prétraitement des données	29
4.3.3	Segmentation	30
4.3.4	Construction d'un graphe orienté acyclique attribué (a-DAG)	31
4.3.5	Visualisation de motifs	33
4.4	Expérimentations et validation de l'algorithme	33
4.4.1	Application : suivi de l'érosion en Nouvelle-Calédonie	35
4.4.2	Motifs fréquents de la zone de Goro - Nord (zone A)	36
4.4.3	Motifs fréquents de la zone de Goro - Sud (zone B)	37
5	Analyse du site de <i>PORO</i>	38
5.1	Données disponibles sur <i>PORO</i>	39
5.2	Analyse à grande échelle	40
6	Conclusion	41
	Bibliographie	42

1 Contexte

Ce rapport présente les travaux réalisés par l'équipe informatique du PPME relativement au volet IV : "Modélisation de l'érosion des bassins versants à grande échelle" du projet CNRT "Fonctionnement des petits bassins versants miniers". Ce volet a pour objectif de développer de nouvelles méthodes (de fouille de données) automatiques ou semi-automatiques permettant d'étudier et de suivre le phénomène érosion dans les bassins versants. Pour cela, nous proposons de mettre en place des outils d'analyse des données acquises à partir de capteurs telles que les données satellitaires, MNT, données décrivant le milieu (nature du sol, végétation, etc.), ? que nous croisons pour trouver les corrélations ou les effets de certains facteurs sur l'érosion du sol et décrire les tendances. En quelque sorte, nous proposons de développer des modèles de description et de prédiction du phénomène érosif. Ce modèle qui sera testé sur petits bassins versants se veut générique et applicable facilement à des bassins de grandes échelles. Cette étude qui est innovante et nouvelle a été réalisée en deux étapes via deux stages master 2 :

- un stage effectué par Joan Moesch en 2012 qui a débuté le travail de l'étude. Il a commencé par un état des méthodes existantes, définir les étapes de traitements à effectuées. En effet, dans toute étude d'analyse des données, une grande part du travail concerne la compréhension des données et leurs préparations.
- un stage effectué par Chengcheng Mu qui a continué le travail de Moesch en implémentant une nouvelle méthode appropriée au type de problème posé, notamment suivre l'évolution de l'érosion dans le temps à partir d'une série temporelle d'images satellitaires croisée avec d'autres données disponibles (MNT, nature du sol, etc.).

Le travail en amont des stagiaires est conséquent et a été réalisé dans le cadre du projet ANR-FOSTER qui est en appui aux projets CNRT. Ce travail de réflexion et de proposition de méthodes originales et s'adaptant à la problématique de suivi de l'érosion a été TODO

2 Introduction

L'objectif de ce volet est de proposer aux géologues un processus complet permettant de les aider à modéliser et éventuellement prédire les phénomènes érosifs à partir de données satellitaires, de MNT, de données capteurs ou toutes autres sources d'information disponibles sur la zone d'étude. Il suit donc un processus de découverte de connaissances dans des données. Dans ce contexte, un des principaux objectifs du projet est le développement de nouveaux algorithmes de fouille de données spatio-temporelles. Plus généralement, les avancées récentes en observation satellitaire ouvre un grand nombre d'applications : analyse d'écosystèmes profondément affectés par l'activité humaine, évaluation de l'influence d'une sécheresse, d'un feu, d'une inondation, suivi de l'évolution de cultures et de l'occupation des sols. Ainsi, les Séries Temporelles d'Images Satellites (STIS) et les Systèmes d'information Géographique (SIG) sont une mine d'or [64] car ils sont constitués des données à grande échelle temporelle et spatiale contrairement aux données terrain habituellement utilisées. En effet, l'observation régulière de la Terre permet un apprentissage des évolutions et

changements normaux et permet donc, par complémentarité, de détecter les changements anormaux. Les développements techniques permettent de profiter de la croissance continue de la résolution spatiale et de la fréquence de revisite d'un même site. Ainsi, les images satellitaires à très haute résolution (THR) sont plus nombreuses, plus riches en information et très complexes, ce qui rend l'interprétation visuelle laborieuse et requiert des analyses automatiques.

3 Etat de l'art

Dans cette section nous allons recenser les aspects caractéristiques de l'analyse de données (images et/ou bases de données) spatio-temporelles souvent rencontrés dans les travaux des dernières années. Une série d'images satellitaires et les informations adjacentes contenues dans les SIG offrent l'opportunité d'extraire des changements ponctuels ou des évolutions globales au niveau des entités de la scène étudiée et de caractériser les composantes de celle-ci. Différentes approches sont discutées en fonction du niveau de l'entité étudiée (pixel ou objet), de la nature supervisée ou non supervisée des démarches, des méthodes utilisées pour répondre aux diverses tâches (détection de changements, clustering ou classification) et de la nature et complexité de leurs résultats (motifs locaux, modèles globaux). L'analyse de séries temporelles d'images (satellites) est un problème complexe et peu de travaux ont été réalisés dans ce cadre. Les méthodes classiques sont impuissantes face à la taille des images qui a augmenté de plus en plus (grâce aux capteurs de plus en plus précis avec des résolutions hautes à très hautes) et le nombre d'acquisitions dans le temps, puisqu'actuellement la fréquence d'acquisitions a augmenté et qu'on dispose de plus en plus de séries temporelles régulières mensuelles mêmes journalières. Il faudra donc se tourner vers des méthodes de plus en plus robustes et efficaces en terme de calculs puissants et qui passent à l'échelle quand les données sont gigantesques. La fouille de données est un domaine dédié à l'analyse de grosses bases de données (Big Data) et qui s'est largement développé ces dernières années. Il a montré son intérêt pour résoudre des problématiques d'analyse des données en marketing en bio-informatique et actuellement des données scientifiques dans les domaines tels que l'agriculture, l'environnement, l'astronomie etc.

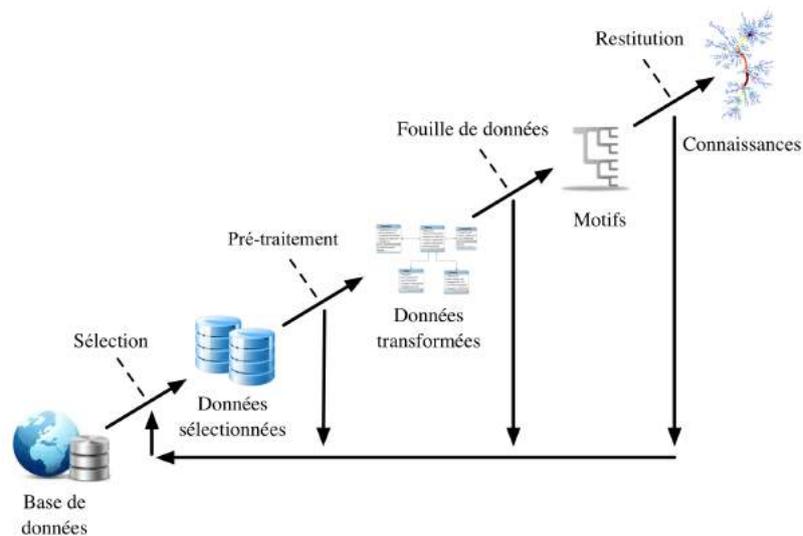
3.1 Fouille de données : rappel

La fouille de données (FD) (ou extraction de connaissances à partir de données (ECD)) est définie comme "le processus non trivial d'extraction d'informations implicites, nouvelles, et potentiellement utiles à partir de (grands volumes de) données". C'est un domaine qui connaît une croissance assez spectaculaire, sous l'impulsion des organisations propriétaires de grands volumes de données et soucieuses d'en extraire de la valeur ajoutée. L'extraction de connaissances consiste à induire des lois générales à partir des données stockées. Ces généralisations sont le plus souvent des énoncés de haut niveau, comme, par exemple, des règles descriptives. Un processus d'extraction de connaissances comprend

trois parties principales (cf. figure 1) :

1. La préparation des données, construction de l'entrepôt des données qui devront être fouillées avec tout ce que cela peut impliquer de modélisation de données multidimensionnelles et de fusion/consolidation de sources de données multiples et hétérogènes.
2. La fouille de données proprement dite, proposition de conjectures observées dans les données qui sont de deux types :
 - (a) Approches descriptives pour fournir des sortes de « résumés » des données ou bien faire ressortir des observations (co-occurrences) remarquables (motifs fréquents, règles d'association, règles d'épisode, partitions et bi-partitions, dépendances, détection de déviations, ?)
 - (b) Approches prédictives pour prédire la valeur d'une variable à partir de celles d'autres attributs ou descripteurs (« apprentissage automatique de concepts », arbre de décision, règle des k plus proches voisins, SVM, carte de Kohonen, modèles de Markov, ?)
3. Interprétation et évaluation des résultats de la fouille : validation de ces résultats par les experts.

FIGURE 1 – Processus d'extraction de connaissances à partir des données (ECD)



Ainsi ce processus est un processus itératif et complexe de découverte (automatique) des connaissances. Il fait intervenir de nombreuses compétences et est fondamentalement interactif avec une forte implication des fournisseurs des données et des experts des contenus. La fouille de données a été particulièrement bien étudiée ces dernières années. Les méthodes et outils développés dans la phase descriptive proposent des moyens efficaces pour traiter ces problématiques dans le cas de données statiques relativement simples. La fouille de données spatio-temporelles (FDS) constitue un domaine de recherche à part entière, sa spécificité

par rapport à la fouille de données classiques est qu'elle doit en plus prendre en compte l'aspect spatial et donc les relations spatiales entre objets et leurs évolutions dans le temps. Néanmoins, les tâches d'un processus de FDS sont définies comme une extension par les critères spatiaux et temporels de celles utilisées dans la FD. Le passage à des données spatiales a motivé de nouveaux travaux (qu'est ce qu'un motif fréquent dans un jeu de données lorsque les objets sont liés par des relations spatiales?). De plus, dans le contexte de l'étude de systèmes dynamiques et phénomènes spatio-temporels, il faut également intégrer des contraintes temporelles. Nous retrouvons là un point commun avec le domaine très récent de la fouille de flots de données ("data stream mining"). De nouvelles méthodes de fouille de données spatio-temporelles sont donc en cours de développement (typiquement pour la fouille de trajectoires de véhicules dans le temps et dans l'espace) mais le contexte décrit ici est bien plus complexe, du fait notamment de la nature et de la diversité des données brutes à pré-traiter (images notamment) avant de pouvoir appliquer une méthode de fouille. Nous pensons donc que le fait de vouloir traiter les séries temporelles THR associées à des données météorologiques et topographiques donnera lieu à des développements originaux de nouvelles méthodes de fouille de données spatio-temporelles. Il est certain que cette adaptation est difficile mais elle devrait être très porteuse de résultats, tant d'un point de vue théorique que pratique.

La découverte de motifs ("Pattern Discovery") dans les données est l'un des problèmes phare en fouille de données. Il a été étudié intensivement avec, par exemple, les efforts en bioinformatique pour l'analyse de données génomiques à large échelle mais aussi dans de nombreux domaines d'applications où des régularités peuvent être porteuses de valeur ajoutée (par exemple, la découverte de règles d'associations dans des données transactionnelles, le calcul de motifs dans des bases de séquences ou des bases de graphes). En général, l'extraction est effectuée sous contraintes et il s'agit alors de ne calculer que les motifs qui satisfont une certaine contrainte dans les données (e.g., des règles d'association fréquentes et valides [?], des motifs séquentiels [?, ?, ?] satisfaisant éventuellement de plus une expression régulière [?], ou encore des graphes [?] et des arbres [?, ?] fréquents). L'une des contraintes les plus étudiées est la contrainte de fréquence minimale mais bien d'autres formes de contraintes plus ou moins complexes ont été étudiées [?, ?, ?, ?]. On sait aujourd'hui comment exploiter efficacement toute combinaison booléenne de contraintes primitives dites monotones ou anti-monotones. On trouve des synthèses sur ce champ d'étude dans les travaux consacrés aux bases de données inductives [?, ?] et notamment dans [?] et [?] ainsi que dans les nombreuses publications produites par les projets européens (cInQ dans FP5, IQ dans FP6) ou ANR (e.g., Bingo2) dédiés à ces questions.

Face à l'explosion de la collecte/utilisation de l'information spatiale et des Systèmes d'Information Géographique (SIG), de nombreux travaux ont été réalisés dans le contexte de l'extraction de motifs spatio-temporels. Néanmoins, une majorité de ces travaux traitent souvent les dimensions spatiale et temporelle séparément. L'extraction de séries temporelles vise à repérer des caractéristiques fréquentes dans le temps [?, ?, ?, ?, ?] sans prendre en compte l'espace. La recherche de co-localisations [?, ?, ?, ?, ?, ?] extrait un ensemble de caractéristiques apparaissant fréquemment dans des objets voisins sans prendre en compte le temps. Plus récemment, ces travaux ont été étendus pour intégrer simultanément les

dimensions spatiale et temporelle. Une synthèse récente vient d'être éditée par le consortium GeoPKDD [?]. Cependant, dans ces travaux, les domaines de motifs utilisés et donc les motifs extraits ne sont pas à la hauteur de la complexité spatiale des objets à étudier dans des images satellitaires. De même, les contraintes primitives généralement étudiées (typiquement des fréquences minimales) restent insuffisantes pour caractériser les critères d'intérêt des experts comme les géologues.

De manière générale, nous pouvons distinguer deux types de travaux : ceux étudiant l'évolution spatio-temporelle d'objets mobiles, souvent assimilés au suivi de trajectoires, et ceux étudiant l'évolution spatio-temporelle des propriétés (ou caractéristiques) associées aux objets.

3.2 Analyse de séries temporelles d'images satellites

Deux façons de traiter une série temporelle d'images satellites, comme mentionné ci-dessus, l'approche pixel et l'approche objet. Les facteurs qui influencent le choix de l'analyse sont la résolution (la taille du pixel est elle suffisante pour représenter les objets à étudier), le niveau de bruit des données (l'approche pixel est très sensible aux bruits) et le niveau de traitement qui peut être global (classification générale) ou local (détail aux niveaux des évolutions).

3.2.1 Approche pixel

L'approche pixel est l'approche la plus utilisée dans les méthodes existantes et classiques. Dans cette approche on considère le pixel appartenant à une seule classe d'objets et que les pixels de valeurs proches capturent la même classe. Cette hypothèse ne peut être valable que si la taille du pixel est assez petite par rapport à la variabilité des objets à étudier.

L'*analyse au niveau pixel*, est une analyse locale qui permet de caractériser le détail des structures étudiées. C'est une méthode qui est indépendante de l'application en question et qui est bien adapté à la gestion des évolutions des objets ([?, ?]). On peut distinguer les modifications à l'intérieur des entités de la scène surveillée (intra-objets) et on peut offrir des informations détaillées en vue d'une aide à la décision. Par exemple, d'une scène agricole peuvent être extraites des informations agronomiques sur les cultures (rendement potentiel, risques de maladie, besoins en eau ou en azote, maturité) qui sont nécessaires pour la conduite optimale des cultures, pour estimer les productions et évaluer la qualité de l'environnement. L'approche pixel est très sensible à la résolution spatiale et aux bruits. [?] donne un exemple d'analyse de type approche pixel en présentant un ensemble de traitement via un ensemble de logiciel permettant de regrouper pixel par pixel ceux qui sont similaires avec une stratégie non supervisé et chaque pixel est présenté par une série temporelle de valeurs. Le résultat final est une image classifiée, où tous les pixels d'une même classe ont la même étiquette. L'analyste interagit à l'écran pour afficher l'évolution des pixels choisis.

Dans [?, ?, ?, ?], pour la première fois, les auteurs utilisent des méthodes de fouille de données qu'ils adaptent au série temporelle d'images pour détecter l'évolution des valeurs des pixels. Dans leur approche [?, ?], ils introduisent l'extraction des motifs fréquents d'évolution à partir de données des séries temporelles d'images en mono et multi-bandes optiques et radar. Ces motifs séquentiels fréquents, *MSF*, sont extraits sous la contrainte de support, c'est-à-dire que le nombre de pixels couverts par un motif dépasse un seuil établi par l'utilisateur.

Une autre approche d'extraction de motifs d'évolution de séries temporelles d'images satellites avec plusieurs bandes est présentée dans [?] et [?]. Reposant sur l'extraction de motifs séquentiels, la méthode a été spécifiquement conçue afin d'extraire des motifs d'évolutions non-majoritaires qui décrivent des changements. Les auteurs introduisent un seuil maximal de fréquence d'apparition, les motifs découverts ayant donc leur support compris dans un intervalle. Pendant le processus de découverte des motifs, ils éliminent les motifs contenant deux valeurs successives identiques sur une bande, étant intéressés surtout par les changements.

3.2.2 Approche objet

L'approche objet permet effectivement de pallier aux difficultés associées à l'analyse basée sur les pixels et fonctionne à l'échelle spatiale des objets d'intérêt. Un objet est défini comme une entité caractérisée par un ensemble de paramètres dont les valeurs de pixels qui appartiennent à l'entité considérée sont similaires (homogénéité des pixels du même objet). Plus simplement, on peut dire que l'objet a la propriété d'uniformité des paramètres. Les paramètres les plus simples et les plus utilisés sont les valeurs radiométriques.

Par exemple, une approche basée sur l'objet diminue la possibilité de classer incorrectement les pixels individuels [?, ?, ?]. En effet, l'analyse au niveau objet est moins influencée par le bruit. Par la focalisation sur les objets, les cartes produites de cette façon peuvent être plus directement utilisables par les analystes. Par contre, l'analyse basée objets d'une séquence d'images exige la segmentation et la classification des images au préalable, le problème qui est complexe c'est la mise en correspondance des objets individuels dans le temps.

[?] présente une méthode de fouille de séquences d'images satellitaires. Dans cette méthode, une détection d'objets à est opérée en utilisant une méthode de clustering (segmentation). Les objets sont examinés et étiquetés sémantiquement par l'expert et la série temporelle d'images est transformée en une base de données de séquences d'identificateurs d'objets. Ces séquences sont analysées en utilisant des fenêtres glissantes temporelles (maximum de temps écoulé entre les signatures) et de fréquence d'apparition pour déterminer des dépendances temporelles fortes de type épisodes comme $A \rightarrow B$. Ceci peut être lu comme "si on observe la signature A une ou plusieurs fois, alors, plus tard, on observe une ou plusieurs fois la signature B". En effet, il y a une condensation de la séquence (par exemple $A \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow B = A \rightarrow B$) qui conserve seulement les changements, le rythme étant perdu [?].

C'est ce type d'approche que nous proposerons de développer. Nous exposerons une

méthode originale avec des résultats sur différents images et celles fournies par le CNRT sur la zone de PORO.

3.2.3 Approche classique

La plus part des techniques classiques développées pour analyser des séries temporelles d'images, sont de type analyse globale. Ces techniques sont de deux types, descriptives et prédictives.

Les techniques descriptives sont en fait les méthodes de classifications non supervisées (ou clustering). Elles consistent à caractériser les objets globalement en les regroupant selon une mesure de similitude. Les objets de même groupes sont homogènes et les objets de groupes différents sont très différents. Différentes méthodes de clustering existent ([?, ?]), elles diffèrent sur la façon de regrouper les objets et la mesure de similarité utilisée.

Contrairement au techniques de classification non supervisée, les méthodes de classification supervisée considère déjà des groupes de pixels déjà identifiés en leur attribuant des noms de classes. L'objectif c'est pour des pixels non encore classés on cherche leur groupe d'appartenance (i.e. le groupe de pixels qui leur sont similaires). Dans le cas des images temporelles les groupes de pixels se font en fonction de leurs séquences de valeurs (radiométriques ou indices calculés etc.).

3.2.4 Détection de changements

Ce type de méthodes se focalisent sur la détection de changements entre deux images consécutives ou entre deux images à deux dates différentes. Les changements sont importants dans des applications telles que la surveillance de l'environnement et des êtres, le contrôle et la gestion de l'agriculture et de l'extension des zones urbaines. Ce type de méthodes rentre plutôt dans les méthodes supervisées. En effet, le processus de détection de changements est lié à la discrimination entre deux zones et nécessite d'être précis sur le type de changement (qui doit être connu) et se limite en général à l'analyse de la zone entre deux dates particulières. Par exemple, on peut vouloir chercher des changements brusques, comme les inondations, les tremblements de terre, ou les catastrophes anthropiques (e.g., [?]), ou on peut être intéressé par des changements progressifs tels que l'accumulation de la biomasse (e.g., [?]).

Toutes ces méthodes sont limitées par la dimension temporelle et ne permettent pas une extraction d'information pour la gestion d'une base de séquences multitemporelles d'images. En outre, ces méthodes sont appropriées pour les changements abrupts mais sont peu performantes en cas de changements progressifs qui s'opèrent sur plusieurs images. Elles n'extraient pas l'information d'évolution disséminée au long d'une série temporelle. Pour la fouille de données, les intérêts sont plus vastes. Dans ce cas, on peut exploiter la totalité des données fournies par les images, sans une sélection a priori, et on peut obtenir une caractérisation totale des évolutions observées.

Les méthodes d'extraction de motifs séquentiels [?, ?, ?, ?] permettent d'identifier les ensembles de séquences ayant suivi la même évolution. De plus, elles permettent de

caractériser cette évolution, en fournissant le motif partagé par cet ensemble de séquences. L'extraction de motifs d'évolution fréquents à partir des séries temporelles, introduite dans [?, ?, ?, ?] utilise des données mono et multi-bande optiques et radar pour la météorologie et l'agriculture.

3.3 Extraction de motifs dans des bases de données spatio-temporelles

3.3.1 Suivi de trajectoires d'objets mobiles

L'émergence des nouvelles technologies mobiles (démocratisation des GPS et des téléphones mobiles) a entraîné la collecte de grandes quantités de données spatio-temporelles, permettant ainsi d'entrevoir de nouvelles applications. Par exemple, le projet GeoPKDD [?] a étudié l'aménagement du plan de circulation de grandes agglomérations en fonction des déplacements des véhicules. L'analyse des objets en mouvement a également comme domaines d'applications la géographie socio-économique, le sport (par exemple, les joueurs de football), l'analyse et le contrôle de la pêche, les prévisions météorologiques et l'analyse du mouvement (suivi des ouragans). Ces données relatives aux déplacements, et à la mobilité en général (mobility data), se présentent généralement sous la forme de bases de données de trajectoires. Dans [?, ?, ?, ?, ?], les auteurs définissent les trajectoires comme des objets en mouvement représentés par des séquences de tuples (l, t) , où l est la localisation de l'objet au temps t . Autrement dit, une trajectoire est une collection d'arrêts d'un même objet se déplaçant à différentes localisations spatiales. La figure 2 représente schématiquement une base de données de trajectoires.

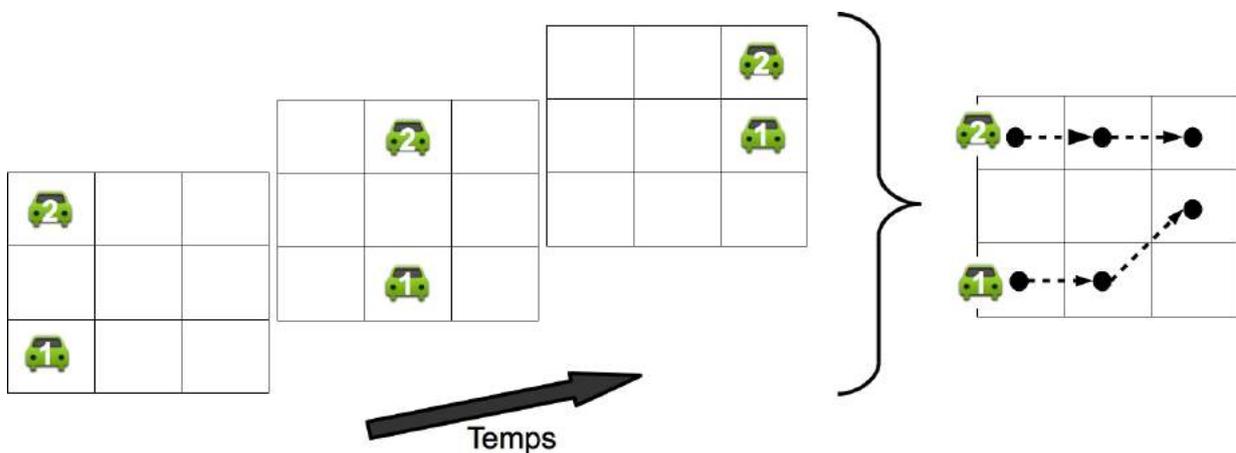


FIGURE 2 – Exemple de base de données de trajectoires de véhicules

Le nombre de trajectoires étant important, l'un des objectifs des méthodes d'extraction est de trouver les séquences les plus pertinentes (p.ex. les plus fréquentes). Face à cette problématique, plusieurs approches ont été proposées dans la littérature.

Par exemple, [?, ?, ?] se sont intéressés à l'extraction de motifs périodiques dans une base de données de trajectoires. Les objets étudiés (p.ex. des bus) ont la particularité de

suivre approximativement la même route à intervalles de temps réguliers. Dans un premier temps, cette approche consiste à résumer l'ensemble des trajectoires d'un même objet par une seule séquence de segments. Les segments de trajectoires similaires sont regroupés en utilisant une fonction de similarité qui tient compte de la proximité spatiale, basée sur l'angle et la longueur spatiale des segments. Cette approche donne une meilleure abstraction des trajectoires et diminue la taille des données pour l'extraction. Contrairement à d'autres travaux, ces motifs intègrent aussi une notion de flou au niveau des localisations, ce qui permet d'extraire un motif même s'il ne se répète pas exactement au même endroit. Dans un second temps, un algorithme par niveaux est utilisé pour extraire les motifs fréquents. Cet algorithme dérivé d'*Apriori* a été optimisé grâce à l'utilisation d'une nouvelle structure de données (substring tree). Ce travail a été validé sur une base de données de trajectoires de bus, où chaque séquence correspondait aux déplacements d'un bus dans une journée.

Dans [?], les motifs étudiés sont des groupes d'objets partageant un type de mouvement (direction, vitesse) à une date donnée dans une certaine région de l'espace. Cinq types de motifs de trajectoire basée sur le mouvement, la direction et la localisation sont proposés (convergence, rencontre, troupeau, leadership et récurrence). Les travaux présentés dans [?] permettent de détecter les 4 premiers types de motifs définis dans [?] en utilisant des algorithmes de calcul approximatif. Les motifs spatio-temporels identifiés sont des sous-groupes d'objets ponctuels mobiles, avec des nombreux éléments localisés dans une région assez petite et présentant un mouvement similaire de point de vue de la direction, du but visé et/ou de la proximité.

Les auteurs présentent dans [?] une adaptation d'un algorithme de clustering basé sur la densité pour les trajectoires d'objets en mouvement. Ils s'appuient pour faire cela sur une notion de distance entre trajectoires. Ils mettent l'accent sur la dimension temporelle - essentiellement en élargissant l'espace de recherche des groupes intéressants en tenant compte des restrictions des trajectoires sources sur des sous-intervalles de temps. L'algorithme proposé vise à chercher les intervalles de temps les plus significatifs qui permettent d'isoler les groupes de qualité supérieure.

Dans [?], les auteurs proposent une extension du paradigme d'extraction de motifs séquentiels à l'analyse des trajectoires d'objets en mouvement. Ils introduisent les motifs de trajectoires comme des descriptions concises de comportements fréquents, en termes d'espace (les régions de l'espace visitées lors des déplacements) et de temps (la durée des déplacements). Ce travail est davantage axé sur des concepts de niveau supérieur (au lieu de découvrir un motif impliquant un endroit spatial précis, une localisation générale est trouvée). Ces localisations générales sont appelées régions d'intérêt (Regions-of-Interest ou RoI). Les motifs fréquents de déplacement entre ces régions sont découverts par la suite.

Les auteurs présentent dans [?] une approche automatique de haut-niveau pour la modélisation des connaissances spatio-temporelles à partir d'images satellitaires. Ils proposent d'utiliser une segmentation multi-approche comportant plusieurs méthodes de segmentation pour améliorer la modélisation et l'interprétation des images. Les expériences, sur deux scènes LANDSAT, montrent que leur approche surpasse les méthodes classiques de segmentation d'image et sont en mesure de prédire des changements spatio-temporels de couverture du sol.

3.3.2 Dynamique spatio-temporelle de phénomènes en fonction de leur environnement

Dans un certain nombre de travaux [?, ?, ?, ?, ?, ?], l'objectif est différent de la fouille de trajectoires. En effet, il ne s'agit pas de suivre le déplacement d'objets précis en mouvement, mais d'étudier l'évolution et les interactions globales, dans l'espace et dans le temps, d'ensembles d'évènements en fonction de leur environnement. Un exemple d'application est l'étude de l'évolution des quartiers d'une ville en fonction de différents facteurs tels que le nombre de touristes, le type d'évènements socio-culturels, ou le type d'attractions à visiter à proximité. Dans cet exemple, il est évident que les quartiers ne se déplacent pas. Il ne s'agit donc pas d'étudier des trajectoires mais d'étudier comment évolue l'ensemble des quartiers en fonction de leurs caractéristiques et des évènements qu'il s'y produit. Afin d'illustrer un peu plus cette différence avec la fouille de trajectoires, nous allons prendre un autre exemple : celui de la propagation d'une virus tropical (p.ex. dengue ou chikungunya) dans les différents quartiers d'une ville. Le virus ne peut être associé à une trajectoire car il peut se propager à plusieurs endroits à la fois, tout en restant présent dans le quartier d'origine. Dans ce contexte, l'objectif est plutôt de rechercher comment se propage le virus de quartiers en quartiers en fonction de caractéristiques environnementales statiques (p.ex. le nombre de piscines ou le nombre d'espaces verts) ou dynamiques (p.ex. la météo).

Dans cette catégorie de méthodes, [?, ?] ont généralisé le concept de co-localisations à des données spatio-temporelles. Initialement, les co-localisations (colocation) se focalisaient uniquement sur la dimension spatiale. Cette notion a été étudiée dans un grand nombre de travaux [?, ?, ?, ?, ?]. Ces motifs spatiaux sont des ensembles de propriétés (ou types d'évènements) fréquemment associés à des objets spatiaux voisins (cad leurs instances forment des cliques). Le motif $\{mine, erosion, vegetation_faible\}$ pourrait être un exemple de co-localisation associé à des zones où l'érosion serait étudiée. Il représenterait le fait que les propriétés mine, érosion, et végétation_faible sont souvent dans des zones voisines. Autrement dit, il y aurait une corrélation spatiale entre ces éléments. Les co-localisations spatio-temporelles ont été définies comme une extension des co-localisations classiques afin de représenter des ensembles de propriétés associées à des objets voisins dans l'espace et dans le temps. Plus précisément, ces motifs sont tels que leurs instances sont spatialement proches pendant une fraction significative de temps. Ces contraintes ont été intégrées par l'intermédiaire d'une mesure d'intérêt monotone combinant prévalence spatiale et prévalence temporelle. Pour simplifier, seul les motifs apparaissant un grand nombre de fois dans un grand nombre de temps sont conservés. Par exemple, dans la figure 3, les motifs $\{erosion, piste\}$ et $\{feux, vent, aireRepos\}$ sont des co-localisations spatio-temporelles (les traits en pointillés représentent la relation de voisinage). Toutefois, $\{feux, vent, aireRepos\}$ aura une mesure d'intérêt plus forte que $\{erosion, piste\}$ car il apparaît fréquemment dans un nombre de temps plus important ($\{erosion, piste\}$ n'apparaît qu'une seule fois à chaque temps). Pour extraire ces motifs, les auteurs ont notamment proposés une stratégie générer-tester et un parcours par niveaux de type *Apriori*.

Le concept de co-localisations a aussi été étudié dans d'autres travaux. Par exemple, les travaux de Qian et al. dans [?] se sont intéressés à l'extraction des SPCOZ (Spread patterns

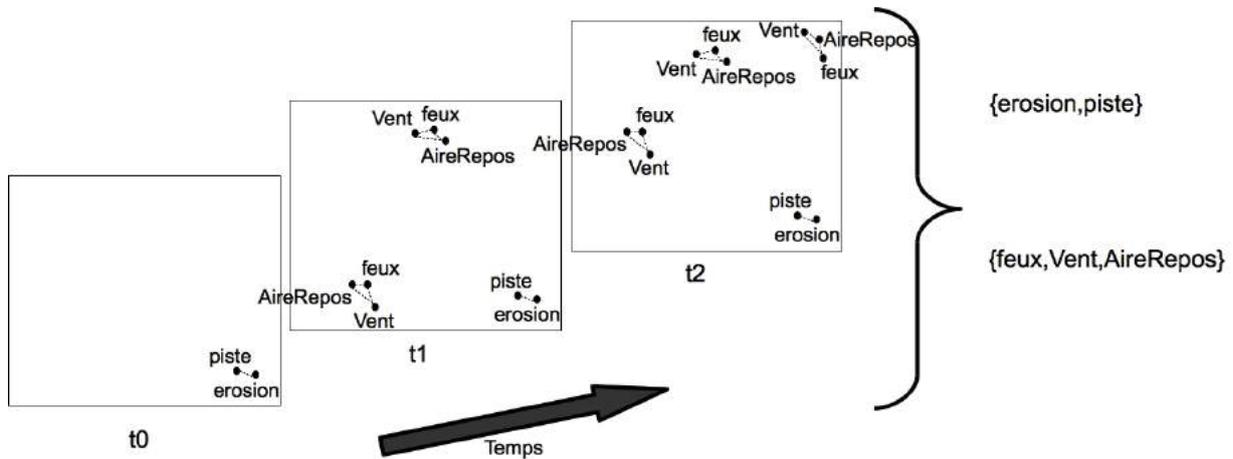


FIGURE 3 – Exemple de co-localisations spatio-temporelles

of spatio-temporal co-occurrences over zones). Ces motifs représentent la propagation (la "trajectoire") de co-localisations spatiales. Qian et al. ont ainsi étendu les travaux sur les co-localisations afin d'intégrer une nouvelle dimension temporelle. Plus précisément, ils suivent le déplacement d'éléments de propagation (spread element). Un élément de propagation est une co-localisation "fréquente" localisée et associée à une fenêtre temporelle. Dans la figure 4, la co-localisation fréquente $\{erosion, piste\}$ associée à l'intervalle $[t_0, t_1]$ est un élément de propagation. Les éléments de propagations combinés deux à deux constituent des arbres représentant la propagation d'un motif (SP-Tree ou Spread Pattern Tree). La figure 4 illustre deux exemples de motifs SPCOZ : le SP-tree de $\{erosion, piste\}$ et celui de $\{feux, vent, aireRepos\}$. L'algorithme d'extraction commence par rechercher toutes les co-localisations fréquentes de taille 2 (par une méthode de type *Apriori*), les utilise pour construire les éléments de propagation pour tous les temps, et génère les SP-Tree correspondants. A cette étape, les motifs construits sont donc des arbres de propagation composés de co-localisations de taille 2. Les autres arbres de propagation (ceux ayant des co-localisations de taille supérieure à 2) sont obtenus par une approche par niveaux de type Apriori, ie les arbres ayant des co-localisations de taille k sont obtenus à partir des sous-arbres composés des co-localisations de taille $k-1$.

Dans [?], Yang et al. proposent un "framework" pour l'extraction de motifs spatiaux apparaissant fréquemment à différents temps, et une extension permettant de visualiser certaines évolutions. Ils ont validé leur approche sur un jeu de données étudiant l'évolution de molécules et de vortex. Les motifs étudiés, appelés SOAP (Spatial Object Association Pattern), peuvent être représentés sous la forme de graphes. Dans de tels graphes, chaque noeud correspond à une propriété, et chaque arête représente une relation de voisinage. Comme précisé par les auteurs, ce travail partage des similitudes avec les co-localisations car cette approche permet aussi d'extraire des ensembles de propriétés associées à des objets voisins, cad formant des cliques. Toutefois, à la différence de ces dernières, les auteurs considèrent des objets géométriques plutôt que des points pour les calculs de distances

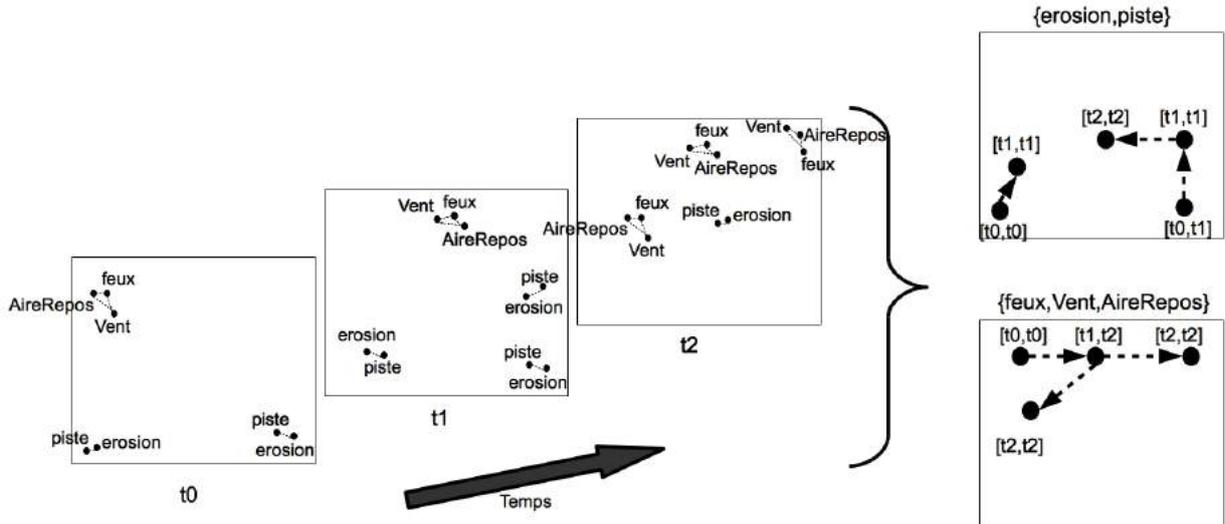


FIGURE 4 – Exemple de SPCOZ

et de voisinage. De plus, ils permettent d'extraire trois autres types de configuration (cf exemples de la figure 5) : étoile, séquence et *minLink*. Ce dernier type permet de définir des SOAP plus généraux où seul le nombre minimum d'arêtes (*minLink*) associées à chaque noeud est fixé (cad le degré minimum des noeuds). Par exemple, si *minLink* = 1, tous les SOAP de type étoile, clique ou séquence sont générés. A noter que pour les séquences, les arêtes représentent une relation de voisinage et de direction. Par exemple, une arête (x, y) représente "x est voisin et au dessus de y". Finalement, les auteurs montrent aussi comment utiliser (en post-traitement) les SOAP fréquents pour visualiser l'évolution d'un même ensemble de propriétés F . Pour cela, ils définissent la notion d'épisodes comme un ensemble d'instances associées à un intervalle de temps où le motif est apparu puis disparu. Les épisodes de tous les SOAP fréquents associé à F sont recherchés (tous types confondus), puis ordonnés en fonction de leur date d'apparition. La séquence ainsi générée permet de visualiser l'évolution spatiale (étoile, clique, ...) de l'ensemble de propriétés étudiés. Toutefois, ce post-traitement ne permet pas de prendre en compte les évolutions de forme des objets étudiés, ainsi que les éventuelles relations de cause à effet. En effet, seul les changements globaux de "configuration" peuvent être observés. De plus, le nombre d'épisodes peut être important pour un même ensemble de propriétés, ce qui rend très difficile l'analyse de la séquence (comme le montre la figure 5). L'intégration d'informations supplémentaires telle que la météorologie est également délicate.

De la même manière, les travaux sur l'extraction des séquences, utilisés initialement pour rechercher des régularités temporelles, ont été appliqués et étendus au spatio-temporel. Par exemple, Tsoukatos et al. dans [?] ont étendu les travaux sur les séquences d'itemsets afin d'extraire des séquences représentant l'évolution dans le temps de zones d'études (p.ex. des quartiers). La base de données considérée est constituée de séquences d'itemsets (ensembles de caractéristiques environnementales) représentant l'évolution temporelle des différentes zones. Un algorithme effectuant un parcours en profondeur de l'espace de

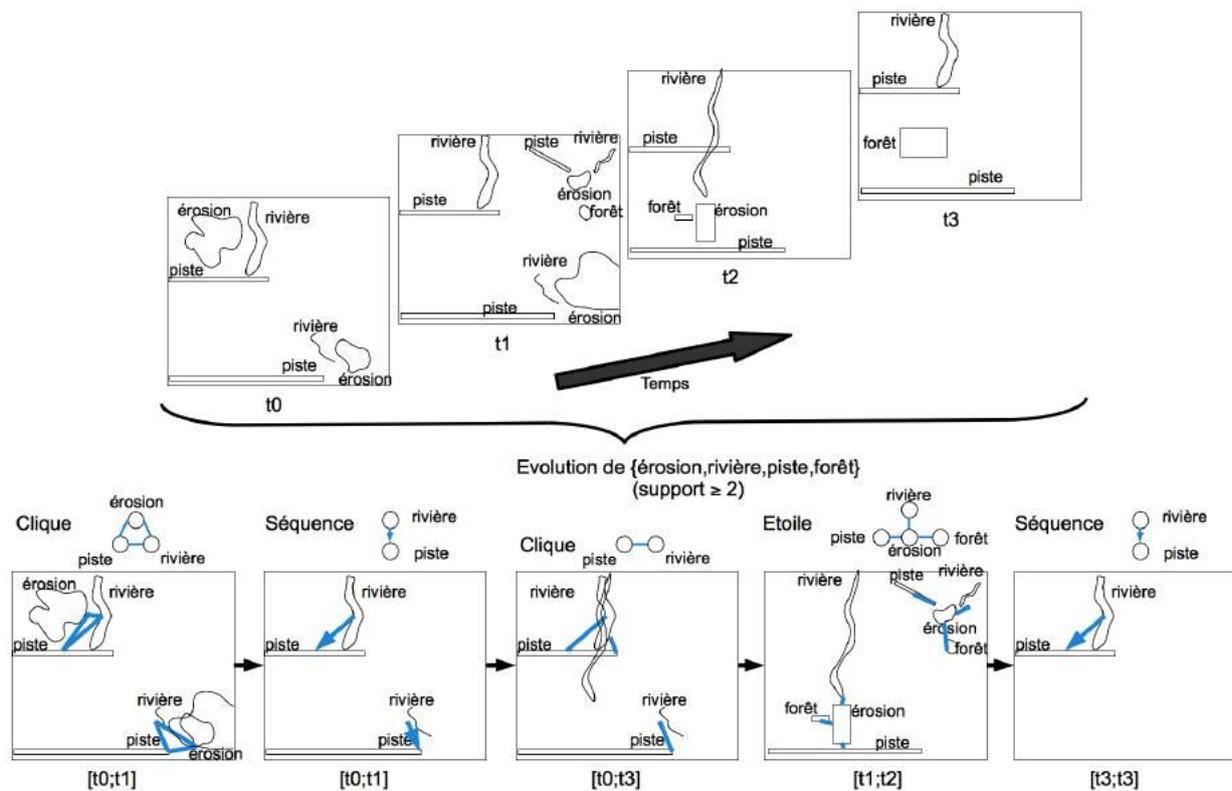


FIGURE 5 – Exemple de SOAP fréquents et visualisation de l'évolution d'un ensemble de propriétés grâce à ces SOAP

recherche est ensuite appliqué pour extraire les séquences les plus fréquentes (ie celles apparaissant dans le plus de zones). La figure 6 illustre un exemple de séquences pouvant être extraites. Les auteurs ont également proposé une approche pour extraire les séquences fréquentes à une granularité spatiale plus élevée (p.ex. région) en exploitant les séquences fréquentes trouvées à une granularité plus faible (p.ex. ville). Ils exploitent pour cela le fait que les séquences extraites à un niveau plus faible resteront fréquentes à un niveau de granularité plus élevé. La méthode recherche alors uniquement de nouvelles séquences fréquentes issues de l'agrégation spatiale.

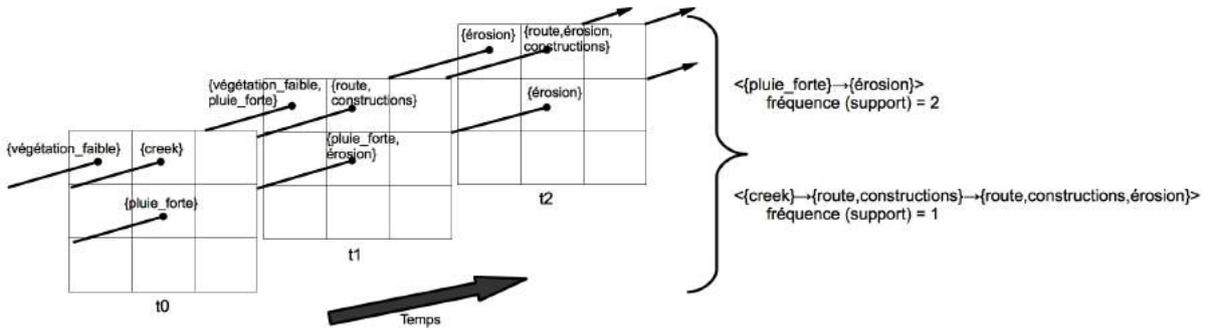


FIGURE 6 – Exemple de séquences représentant l'évolution des zones

Les séquences, et plus généralement les graphes, ont aussi été utilisés pour représenter la *propagation* de phénomènes dans l'espace et dans le temps [?, ?, ?, ?].

Dans [?], les auteurs se focalisent sur l'extraction de séquences représentant la propagation spatio-temporelle d'événements dans des fenêtres temporelles prédéfinies. Dans cet objectif, ils découpent la dimension temporelle en fenêtres d'une taille donnée (p.ex. 4 jours), divisent l'espace sous la forme d'une grille, et introduisent le concept de flow pattern. Un flow pattern est une séquence d'ensembles d'évènements de la forme $\langle E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow \dots \rightarrow E_k \rangle$ où E_i est un ensemble d'évènements de la forme $e(\text{localisation})$, avec e un type d'évènements (p.ex. pluie, vent). Chaque ensemble d'évènements est composé d'évènements spatialement voisins apparaissant au même temps. Deux ensembles d'évènements E_p et E_q sont consécutifs dans la séquence, si leurs évènements appartiennent à la même fenêtre temporelle, s'ils sont tous voisins et qu'ils apparaissent à deux temps consécutifs. L'objectif de ce travail est de trouver les séquences d'évènements apparaissant fréquemment, cad celles apparaissant un grand nombre de fois suivant les mêmes localisations. La figure 7 montre un exemple de jeu de données et quelques flow patterns avec leur support (dans cet exemple, deux évènements sont voisins si leur distance euclidienne est inférieure ou égale à 1). Les évènements sont localisés par des coordonnées (X,Y) tel que l'évènement $\text{pluie}(0,1)$ au temps t_0 . A titre d'exemple, le flow pattern $\langle \{\text{piste}(0,0)\} \rightarrow \{\text{erosion}(1,0)\} \rangle$ apparaît 3 fois. A l'opposé, le motif $\langle \{\text{piste}(0,0), \text{pluie}(0,1)\} \rightarrow \{\text{AirRepos}(1,2), \text{feux}(1,2)\} \rangle$ à un support de 0 car les évènements $\{\text{AirRepos}(1,2), \text{feux}(1,2)\}$ ne sont pas voisins de tous les évènements de $\{\text{piste}(0,0), \text{pluie}(0,1)\}$ (AirRepos et feux du temps t_1 ne sont pas voisins de piste du temps t_0). Il est aussi intéressant de noter que les motifs $\langle \{\text{piste}(0,0), \text{pluie}(0,1)\} \rightarrow \{\text{erosion}(1,0)\} \rangle$ et $\langle \{\text{piste}(0,0), \text{pluie}(1,1)\} \rightarrow \{\text{erosion}(1,0)\} \rangle$

sont considérés comme deux motifs différents bien que représentant des phénomènes similaires (seule la localisation de l'événement pluie est légèrement différente). Autre point important, le support du motif $\langle \{AirRepos(1,2)\} \rightarrow \{AirRepos(1,2), feux(1,2)\} \rightarrow \{feux(2,2)\} \rightarrow \{vegetation_faible(1,2)\} \rangle$ est égal à 0 car il n'est pas inclus dans une unique fenêtre temporelle. Pour extraire ces motifs, les auteurs adaptent des techniques d'extraction de motifs séquentiels classiques. Plus précisément, leur algorithme applique une stratégie par niveaux pour trouver les séquences de taille 1 et 2, puis utilisent les motifs fréquents trouvés comme point de départ à un parcours en profondeur de l'espace de recherche.

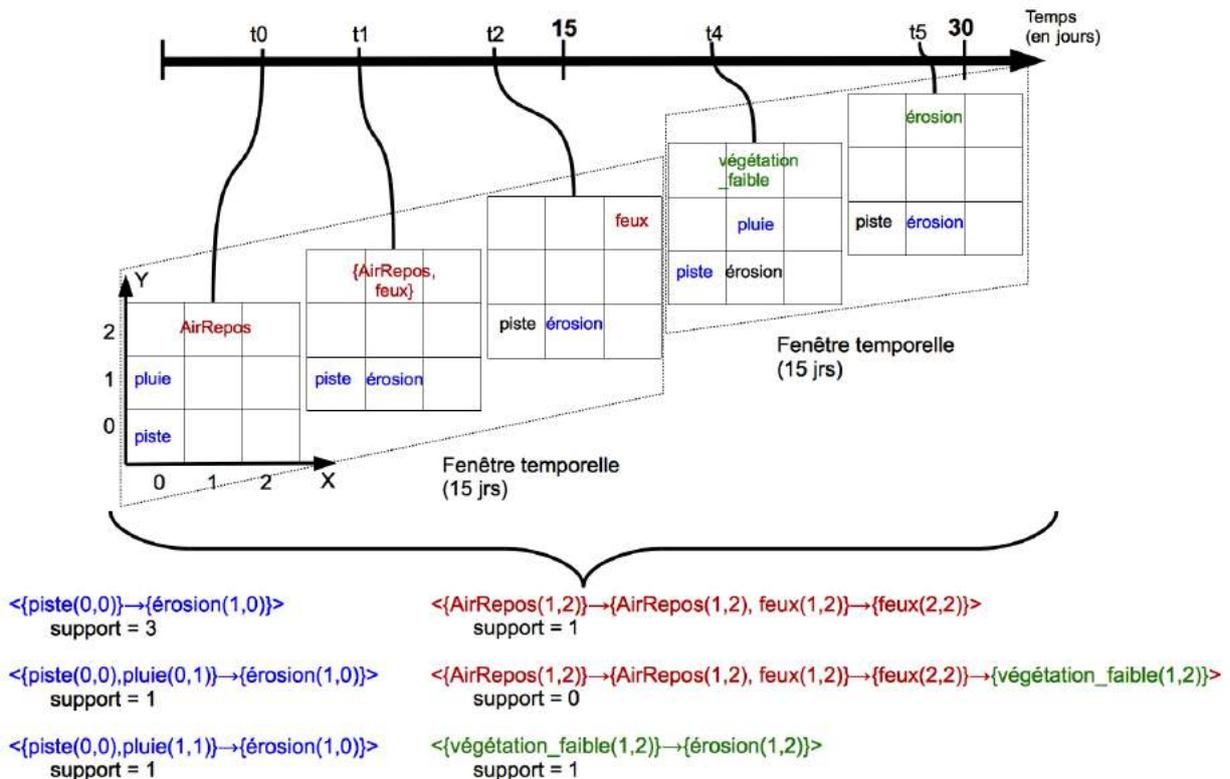


FIGURE 7 – Exemple de flow patterns

Dans un deuxième temps, Wang et al. [?], étendent cette notion et définissent les motifs spatio-temporels généralisés (Generalized spatio-temporal pattern) comme des séquences de relative eventsets. Un relative eventset est un ensemble d'évènements dont la localisation est remplacée par un positionnement relatif à une localisation de référence. Un motif spatio-temporel généralisé est fréquent s'il a au moins t -minsup (support temporel) occurrences dans le temps et qu'il a au moins s -minsup (support spatial) occurrences dans l'espace (les localisations peuvent être différentes mais la localisation relative doit être identique). Pour extraire ces motifs, les auteurs proposent un nouvel algorithme appelé GenSTMiner qui utilise une approche dérivée de Prefispan [?].

Huang et al., dans [?], se sont concentrés sur le problème d'extraction de séquences

de propriétés représentant la propagation de certains types d'évènements. Ces séquences sont de la forme $\langle f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow \dots \rightarrow f_k \rangle$, où f_i est un type d'évènements (cf exemple de la figure 8). Cette approche permet donc d'étudier la propagation des évènements pris individuellement (sans prendre en compte leur environnement). Ce modèle considère deux évènements consécutifs s'ils sont spatialement proches (distance euclidienne inférieure à un seuil donné) et apparaissent dans la même fenêtre temporelle. Les auteurs ont également étudié d'autres relations de voisinage dépendant du temps. Ces relations permettent de représenter un rétrécissement de la zone d'influence d'un évènement (son voisinage) au fur et à mesure que le temps passe (c'est ce qui passe lors de la propagation d'une maladie infectieuse). Les auteurs proposent aussi une nouvelle mesure d'intérêt pour ces séquences car pour eux les mesures basées sur le support ne reflètent pas nécessairement un lien de cause à effet entre les évènements. Leur mesure, appelée *sequence index*, s'appuie sur des travaux antérieurs [?] exploitant des statistiques spatiales pour étudier l'indépendance de phénomènes. Ainsi, une séquence est intéressante si le ratio de densité spatial entre deux éléments consécutifs de cette séquence est supérieur à un seuil. Ce ratio de densité est proche de 1 si les deux types d'évènements sont distribués de manière indépendante. Plus la mesure est inférieure à 1, plus les types d'évènements se "repoussent". Au contraire, plus ce ratio est au dessus de 1, plus les chances d'avoir un lien de cause à effet entre ceux-ci sont élevées. La principale limite de cette mesure est de ne pas être anti-monotone. Or, ce type de propriétés est un aspect important pour le passage à l'échelle d'une grande partie des algorithmes d'extraction de motifs. Pour extraire ces séquences, les auteurs proposent donc un nouvel algorithme *Slicing - STS - Miner* basé sur un traitement incrémental des différentes fenêtres temporelles et une extension des séquences à chaque étape. Au lieu de s'appuyer sur l'anti-monotonie, ils exploitent une autre propriété du *sequence index* : si une séquence est intéressante, toutes les sous-séquences ayant le même préfixe sont intéressantes.

Mohan et al. dans [?] étendent ces travaux en étudiant des graphes orientés acycliques de types d'évènements. Tout comme précédemment, leurs motifs, appelés motifs spatio-temporels en cascade, ne permettent pas de prendre en compte l'environnement proche d'un évènement. Dans l'exemple de la figure 8, le voisinage entre *feux* et *piste* n'est donc pas considéré. Par contre, la première et la dernière séquences se retrouvent fusionnées, montrant ainsi que $\langle pluie \rightarrow erosion \rangle$ est précédée par *piste* et *feux* (mais ils ne sont pas nécessairement voisins). Ils introduisent aussi une nouvelle mesure de intérêt appelée cascade participation index construite à partir de la mesure proposée dans [?]. Cette mesure est anti-monotone. Cette propriété est utilisée dans un algorithme par niveaux de type *Apriori* pour extraire les motifs les plus intéressants.

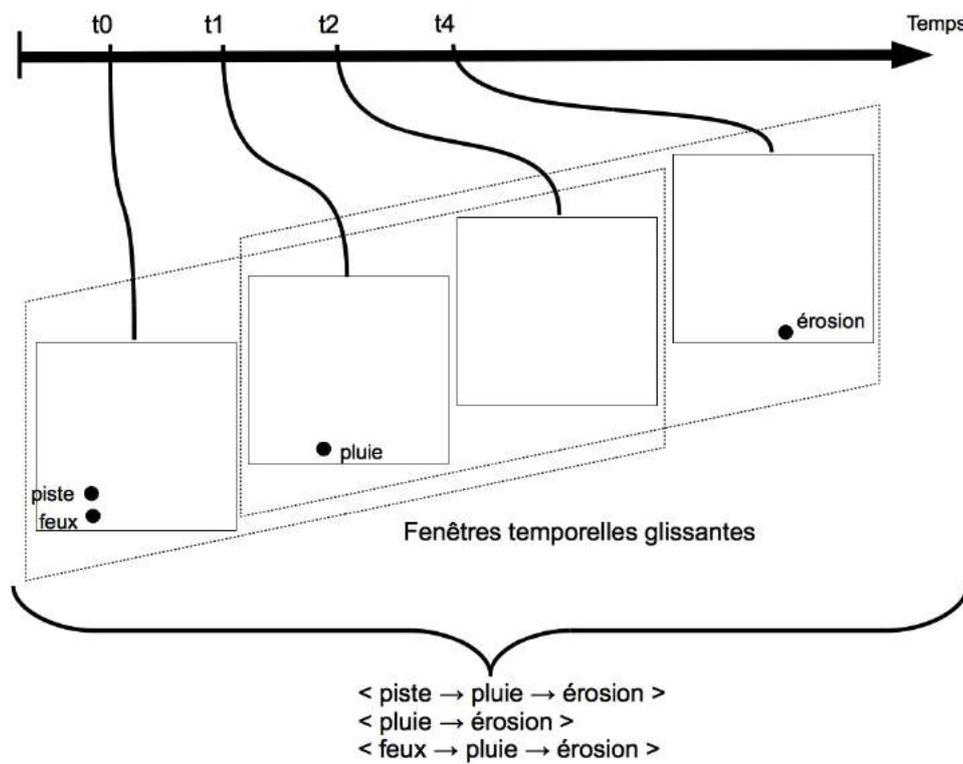


FIGURE 8 – Exemple de séquences représentant la propagation de type d'évènements (sans prendre en compte leur environnement)

4 Méthode de suivi des évolutions dans une série temporelle d'images

4.1 Problème et motivations

Le potentiel informatif des données a incité plus les entreprises, les organisations, les scientifiques, etc. à accorder d'avantage de temps et d'énergie à leur collecte et leur analyse afin d'en exploiter les connaissances qui sont des mines d'or. C'est le cas, par exemple, des données dites « spatio-temporelles » (cf. figure 9, à savoir des données référencées géographiquement et qui évoluent dans le temps. Ce sont des bases de données enrichie d'une information spatiale et temporelle. De même, le développement plus poussé des *SIG* et le recours de plus en plus fréquents aux images satellites incitent au développement de méthodes spécifiques à des applications spatiales évoluant dans le temps. Par exemple, agriculteurs et urbanistes peuvent s'intéresser à l'évolution de parcelles agricoles ou immobilières.

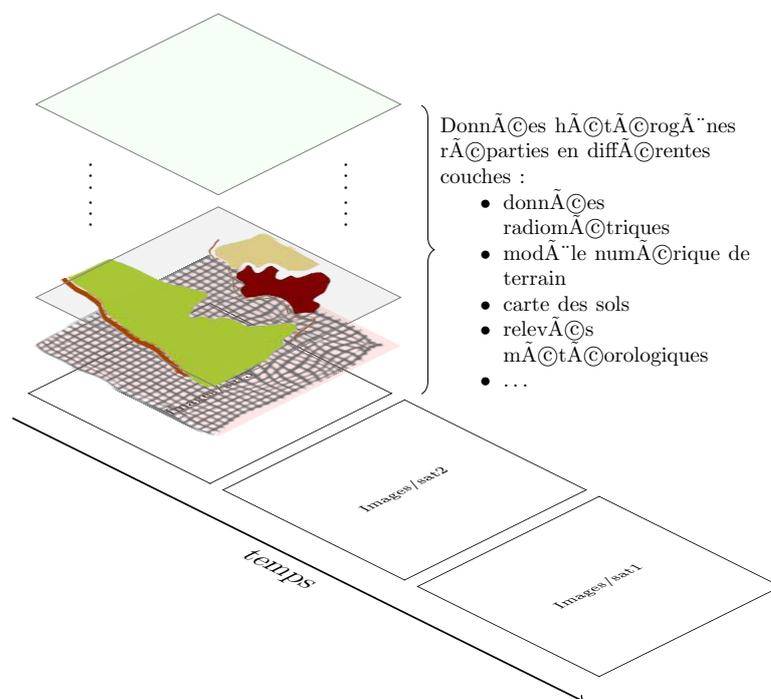


FIGURE 9 – Exemple de données spatio-temporelles : les données étudiées sont spatiales, et peuvent varier à chaque pas de temps.

Cependant, les méthodes sont souvent développées (cf. sec ??) spécifiquement pour une application précise, et ne couvrent en général qu'une facette du domaine spatio-temporel. En effet, d'autres besoins d'analyse existent, pour lesquels certaines modélisations proposées ne sont pas adaptées. En effet, les objets d'études peuvent, par exemple :

1. s'influencer les uns sur les autres, selon la première loi de géographie de [?] qui dit ””.

2. être caractérisés par divers attributs. Ces caractéristiques sont des propriétés des objets, ou de leur environnement proche.

Ces objets sont dynamiques par définition, i.e. qu'ils évoluent dans le temps. Le dynamisme peut porter à la fois sur :

1. les attributs de l'objet. Par exemple, si la couleur est l'une des propriétés d'un objet, celle-ci peut varier d'un temps à un autre.
2. l'emplacement de l'objet, modifiant sa position par rapport aux autres objets et donc modifiant l'influence qu'il peut avoir sur eux.
3. l'existence de l'objet. Dans certains cas, les objets d'étude peuvent apparaître ou disparaître entre deux temps consécutifs.
4. leur structure. Certains objets peuvent évoluer structurellement, à savoir fusionner pour ne former plus qu'un seul objet ou se scinder en plusieurs autres objets.

Toutes ces considérations ne sont pas toutes prises en compte à la fois. Par exemple, certains travaux se positionnent dans le cas où les objets d'étude sont spatialement statiques, dans le cas où ils ne sont composés que d'un seul attribut, et/ou le cas où ils sont constamment présents (aucune disparition, réapparition, fusion ou division) sur la fourchette temporelle choisie.

Nous nous intéressons dans notre étude à l'évolution des objets (zones géographiques) spatialement (diminution ou augmentation de la taille de l'objet ainsi que sa position), l'évolution de leurs propriétés (zone nue, zone végétalisée, etc.), ainsi que leurs relations, à l'existence (apparition disparition) ou à leur structures (fusion ou division de zones).

Les structures de graphes orientés ont montrées leur intérêt et leur efficacités à modéliser le type de base de données spatio-temporelles considérées dans notre cas d'étude pour prendre en compte les considérations citées ci-dessus. Nous nous sommes donc intéressés à l'étude des graphes orientés acycliques où le temps peut être naturellement traduit par des arcs (orientés) ; l'acyclisme découle du caractère "causal" intrinsèque du temps. la figure 10 montre la structure que nous avons crée pour représenter la base de données spatio-temporelles pour l'étude de l'érosion. Les sommets de ce graphe représentent les objets (ou zones) et sont décrits par plusieurs caractéristiques (type de sol, couleur, pente, etc.). Les arcs caractérisent les évolutions temporelles et spatiales, puisqu'une zone peut se diviser, fusionner avec d'autres zones, s'agrandir ou se réduire. Par exemple, dans la figure 10 au temps t_1 la zone orange portant les caractéristiques $\{e, f\}$ évolue au temps t_2 en se divisant en deux zones ; la zone bleue portant la caractéristique a et la zone orange portant la caractéristique $\{d, f, h\}$. De même la zone blue au temps t_2 portant la caractéristique $\{a\}$ évolue au temps t_3 en une zone qui a changé de caractéristiques, elle porte désormais la caractéristique $\{b\}$. Dans le cas d'étude de l'érosion, ces caractéristiques peuvent être par exemple des valeurs de l'indice $NDVI$, indice de brillance, pente en %, etc. Le grand avantage de cette représentation par un graphe attribué est que l'on peut mettre en entrée plusieurs couches d'informations par date. Ce qui est très intéressant dans la mesure où on va pouvoir croiser toutes ces informations et pouvoir analyser à chaque évolution la cause et l'effet de chaque caractéristique sur l'autre. Par exemple, on pourra

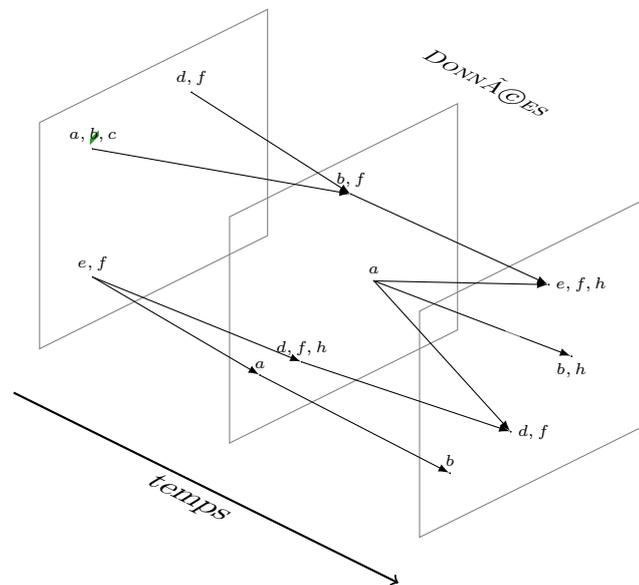


FIGURE 10 – Exemple de DAG attribué construit à partir d'images temporelles. Ici, les objets d'étude ne portent aucune sémantique, mais sont caractérisés par plusieurs attributs symbolisés par des lettres.

A partir de ce graphe orienté attribué (a-DAG), pour analyser les évolutions fréquentes, il suffit de chercher des séquences de caractéristiques apparaissant souvent sur les zones étudiées dans les images temporelles enrichies par les couches SIG d'une même région. Par exemple, nous pouvons remarquer qu'on a un motif répétitif $P = a \rightarrow b$ cela veut dire qu'il existe des objets (zones) ayant la caractéristique a évoluent souvent en objet ayant la caractéristique b . Cette information peut être enrichi, par exemple le motif $P = d, f \rightarrow d$ traduit le fait qu'il existe des zones de caractéristiques $\{d, f\}$ évoluant vers une zone de caractéristiques $\{d\}$. cette dernière peut être traduit par le fait qu'une zone de caractéristique $\{d\}$ ne change pas de valeurs sous l'influence de la caractéristique $\{f\}$.

D'autre part, l'analyste peut interagir et contraindre les résultats par rapport à ces attentes. Par exemple, il pourra demander à ce qu'on lui affiche que les motifs traduisant des évolutions à priori attendues par l'expert. Par exemple, l'analyste peut demander à ce qu'on affiche que les motifs dans lesquels la caractéristique C augmente (par exemple le *NDVI* : revégétalisation, ou le *Redness* qui traduit une érosion).

4.2 Méthode de fouille dans un a-DAG

Dans cette section très technique, nous présenterons un nouvel algorithme original que nous avons développé pour analyser une série temporelle d'images enrichi par des couches d'informations SIG. Cet algorithme a été implémenté

4.2.1 Chemins pondérés : concepts et définitions

Dans cette section, nous donnerons les concepts et définitions nécessaires à la compréhension de notre méthode. Ces définitions seront illustrés sur un exemple de graphe (cf. figure 11).

Items et itemsets On appelle **item** une propriété ou une caractéristique catégorielle mesurée sur un objet ou un individu. par exemple, la couleur de l'objet (rouge foncé) ou le type de sol (Latérite). Un **itemset** est un ensemble d'items.

Graphe et chemins Un **DAG**¹ **attribué** (aussi appelé **a-DAG**) $G = (V, E, \lambda)$ sur un ensemble d'items \mathcal{I} consiste en un ensemble de sommets V , un ensemble d'arêtes orientées ou arcs $E \subseteq V \times V$ et une fonction d'attribution $\lambda : V \rightarrow \mathcal{P}(\mathcal{I})$ qui fait correspondre à chaque sommet du DAG G un sous-ensemble de \mathcal{I} .

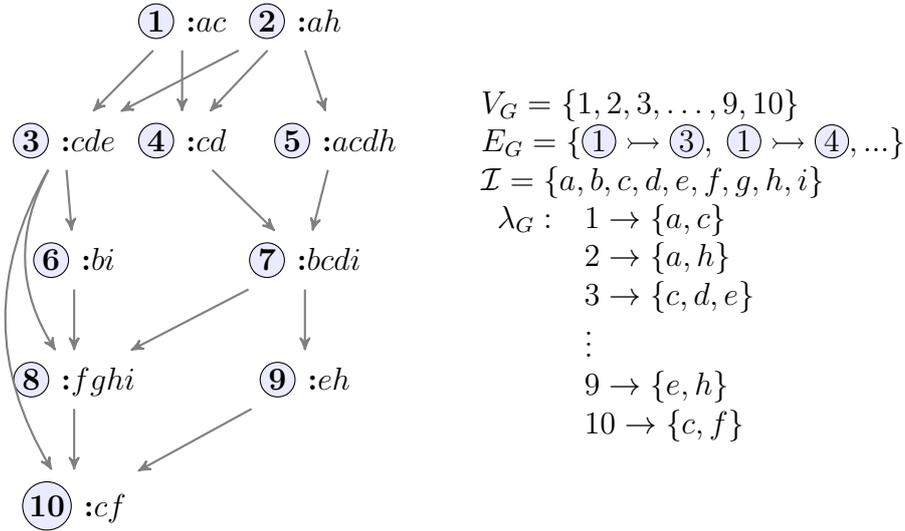


FIGURE 11 – Exemple de a-DAG.

Un **chemin** P est une séquence d'itemsets $P = P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow \dots \rightarrow P_n$ tel qu'il existe un chemin $O = v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots \rightarrow v_n$ dans le graphe où P_i est inclus dans l'ensemble des items de v_i (notion à différentier de la définition classique d'un chemin dans un graphe). On dit que alors que O est une **occurrence** du chemin P et l'ensemble des occurrences de P est noté $occu_G(P)$.

Par exemple les occurrences du chemin de taille 3 $ah \rightarrow cd \rightarrow i$ sont $\textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{6}$, $\textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{8}$, $\textcircled{2} \rightarrow \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{7}$, $\textcircled{2} \rightarrow \textcircled{5} \rightarrow \textcircled{7}$, et $\textcircled{5} \rightarrow \textcircled{7} \rightarrow \textcircled{8}$.

Un **chemin pondéré** P est un chemin où un poids est associé à chaque arc $P_i \rightarrow P_{i+1}$ constituant P . Ce poids correspond au nombre d'occurrences distinctes de $P_i \rightarrow P_{i+1}$ dans

1. Directed Acyclic Graph

le graphe. Par exemple dans le graphe 11 les chemins $(2) \rightarrow (3) \rightarrow (6)$, $(2) \rightarrow (3) \rightarrow (8)$, $(2) \rightarrow (4) \rightarrow (7)$, $(2) \rightarrow (5) \rightarrow (7)$, $(5) \rightarrow (7) \rightarrow (8)$ permettent d'obtenir le motif pondéré :

$$ah \xrightarrow{4} cd \xrightarrow{5} i$$

En effet, les différentes occurrences de $ah \rightarrow cd$ dans $occur_G(P)$ sont au nombre de 4, et les différentes occurrences de $cd \rightarrow i$ dans $occur_G(P)$ sont au nombre de 5. Une telle représentation permet de voir que l'itemset ah apparaît 4 fois avant l'apparition du chemin $cd \rightarrow i$, et que l'itemset i apparaît 5 fois après l'apparition du chemin $ah \rightarrow cd$. Dorénavant, $\omega_G(P_i \rightarrow P_{i+1})$ désignera le poids de l'arc entre les itemsets P_i et P_{i+1} .

Relation d'inclusion L'opérateur d'inclusion \sqsubseteq sur un couple de chemins pondérés est défini de la manière suivante : $P \sqsubseteq P'$ si et seulement si $|P| \leq |P'|$ et $\exists k \in [0, |P'| - |P|]$ tel que :

$$\begin{cases} \forall i \in [1, |P|], & P_i \subseteq P'_{k+i} & \text{(inclusion d'itemsets)} \\ \forall j \in [1, |P|[, & \omega_G(P_j \rightarrow P_{j+1}) = \omega_G(P'_{k+j} \rightarrow P'_{k+j+1}) & \text{(égalité des poids)} \end{cases}$$

Autrement dit, P est inclus dans P' s'il existe une sous-séquence Q de P' tel que les itemsets de P sont inclus un à un dans ceux de Q avec les mêmes poids au niveau des arcs. On dit que P' est un **sur-chemin** ou **super-chemin** pondéré de P .

A partir de la mesure proposée par [?], nous définissons le **support** d'un chemin pondéré P , noté $\sigma(P)$, comme étant le poids minimal de ses arcs.

Chemin pondéré condensé Un chemin pondéré P est un **condensé** s'il n'admet aucun sur-chemin pondéré.

Pour simplifier, nous appellerons motif un chemin pondéré et les occurrences d'un motif seront tout simplement des chemins.

Motif Etant donnée un seuil minimum γ qui peut être fixé par l'analyste. On appelle **motif** ou **motif intéressant** P un chemin pondéré condensé tel que $\sigma(P) > \gamma$.

4.2.2 Algorithme d'extraction de motifs et son implémentation optimisée

Pour implémenter l'algorithme que nous avons développé de manière optimisée, nous allons définir une structure de graphe permettant le stockage des motifs trouvés au fur et à mesure du parcours de l'espace de recherche. Cette structure de graphe nous l'appelons **graphe de motifs**.

Structure de données pour les chemins pondérés condensés Soit \mathcal{I} un itemset, soit $G = (V, E, \lambda)$ un graphe attribué sur \mathcal{I} . Nous modélisons l'ensemble des motifs condensés par un graphe des motifs défini par $G_m = (V_m, E_m, \lambda_m)$ où :

- $V_m \subseteq \mathcal{P}(V)$ est l'ensemble des sommets
- $E_m \subseteq \mathcal{P}(V) \times \mathcal{P}(V)$ est l'ensemble des arcs
- λ_m : la fonction d'attributs définie par :
 $V_m \rightarrow \mathcal{P}(I)$
 $V \mapsto X = \bigcap_{u \in V} \lambda(u)$ où X représente l'itemset maximal caractérisant les sommets de V .

De manière réciproque, on associe à un itemset X d'un motif condensé l'ensemble des sommets noté V_X supportant l'itemset X .

Un sommet du graphe G_m est identifié par un ensemble de sommets du graphe G . Un motif condensé est un chemin $c = V_1 \rightarrow \dots \rightarrow V_n$ de G_m de longueur maximale dans le graphe des motifs (cf. figure 12), i.e. V_1 est une source (il n'a pas d'arc incident) et V_n est un puits (il n'a pas d'arc sortant).

Pour retrouver les motifs condensés à partir du graphe des motifs, il suffit de faire un parcours en partant des sommets sources jusqu'aux sommets puits (cf. figure 12).

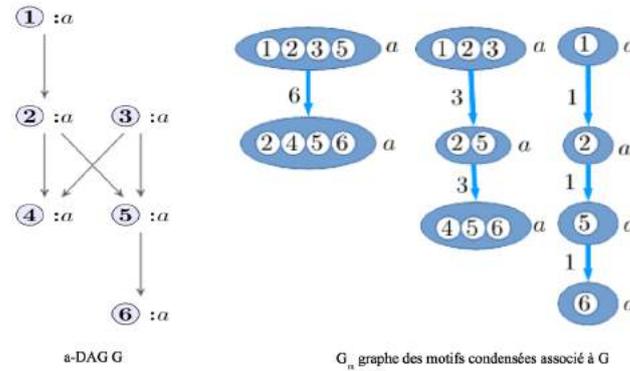


FIGURE 12 – Exemple de graphe de motifs (chemins pondérés condensés) du a-DAG G :
 $a \xrightarrow{6} a$, $a \xrightarrow{3} a \xrightarrow{3} a$ et $\xrightarrow{1} a \xrightarrow{1} a \xrightarrow{1} a$

Avec cette structure de graphe de motifs, nous éviterons tous les tests de comparaisons et d'inclusions entre les motifs trouvés. En effet, prenant un motif condensé $P = I_1 \xrightarrow{\sigma_1} \dots \xrightarrow{\sigma_{n-1}} I_n$, c'est une séquence d'itemsets et chaque itemsets I_i du motif P représente un sommet dans le graphe des motifs qui n'est autre que V_{I_i} ensemble des sommets du graphe a-DAG contenant l'itemsets I . Le motif P est alors identifié de manière unique par la séquence $V_{I_1} \rightarrow \dots \rightarrow V_{I_n}$ dans le graphe des motifs. Au moment de la construction du graphe des motifs et à l'insertion d'un nouveau sommet V_i dans le graphe des motifs, il suffit de vérifier s'il est déjà présent dans le graphe des motif alors il a déjà été parcouru sinon il est inséré et le parcours de l'espace de recherche continue.

Principe de l'algorithme final complet et optimisé L'algorithme final se déroule en 2 grandes étapes suivantes :

1. Recherche des motifs condensés par un parcours en profondeur de l'espace de recherche (procédure `chercheCondensesRec`). Les motifs sont stockés dans le graphe des motifs. Pendant la recherche, les sommets pour lesquels il y a eu extension avec perte d'occurrences sont marqués pour être traités par la phase de **backtracking**.
2. Phase de **backtracking** sur les sommets marqués (pour lesquels il y a eu extension avec perte d'occurrences) pour mettre à jour les occurrences des motifs (cf. procédure `backtrackRec`).

Algorithme 1: Recherche des chemins pondérés condensés

Entrées : $G = (V_G, E_G, \lambda_G)$ un a-DAG
 $min_support$ le support minimal
Sorties : $G_m = (V_m, E_m, \lambda_m)$ le graphe des motifs
// $BdT(V_G)$ est une base de transactions avec les sommets de V_G comme tid et les itemsets associés comme valeur

- 1 **pour chaque** itemset X fermé et fréquent dans $BdT(V_G)$ **faire**
- 2 Soit V_X les sommets supportant X
- 3 `chercheCondensesRec($X, V_X, min_support$)`
- // Etape de Backtracking*
- 4 **pour chaque** $(V_{X_{utile}}, V_X) \in sommets_a_remonter$ **faire**
- 5 `backtrackRec($V_{X_{utile}}, V_X$)` *// backtrack chaque couple de sommets enregistrés dans l'étape précédente*
- 6 Retourner le graphe des motifs G_m

Points clés de l'algorithme La première étape de l'algorithme fait appel à la procédure récursive

`chercheCondensesRec($X : itemset, V_X : ens. de sommets, min_support : entier$)` qui effectue un parcours en profondeur de l'espace de recherche. Cette procédure étend récursivement les motifs condensés au fur et à mesure de leur construction dans le graphe des motifs.

A une étape de la construction du motif P , soit V_X le sommet à étendre dans le graphe des motifs G_m supportant l'itemset X , on calcule tous les sommets ayant au moins un arc sortant de V_X , soit $V_{X_{utile}}$ l'ensemble de ses sommets. On calcule tous les items accessibles par X , on obtient une base de données transactionnelles dont les transactions sont les arcs sortants et les items sont les items accessibles par X (ligne 3 et 4 de la procédure `chercheCondensesRec`).

Pour chaque itemset maximal Y dans cette nouvelle bases transactionnelles, on va étendre V_X par V_Y . Deux cas se présentent :

- $V_X = V_{X_{utile}}$ alors tous les sommets de V_X sont utilisés pour l'extension, nous sommes dans un cas d'extension sans perte. Il suffit alors de créer le sommet V_Y et relier V_X à V_Y par un arc dans le graphe des motifs.
- $V_X \neq V_{X_{utile}}$ alors nous sommes dans un cas d'extension avec perte d'occurrences, on duplique le motif P en remplaçant le sommet V_X par $V_{X_{utile}}$ (que l'on marque pour être traité dans la phase 2 de **Backtracking**). On insère un nouveau sommet V_Y et on crée un arc entre $V_{X_{utile}}$ et V_Y .

Procédure `chercheCondensesRec`(X : itemset, V_X : ens. de sommets, $min_support$: entier)

```

1 sommets_a_remonter : var. globale contenant les sommets à backtracker
  // min_support est le seuil minimal de support pour considérer
  // qu'un itemset est fréquent
2 si  $V_X \neq \emptyset$  alors
3   Soit  $E^+(V_X)$  les arcs sortants de  $V_X$  Soit  $V^+(V_X)$  les sommets sortants de  $V_X$ 
   Soit  $BdT(E^+(V_X))$  la base de données transactionnelles locale construites à
   partir de  $E^+(V_X)$ 
   // On associe une transaction à chaque arc de  $E^+(V_X)$ . L'arc est le
   // tid, l'ensemble des items du sommet destination de l'arc est la
   // valeur de la transaction
4   pour chaque itemset  $Y$  fermé et fréquent dans  $BdT(E^+(V_X))$  faire
5     Soit  $V_Y$  les sommets supportant  $Y$  dans cette base locale
6     Soit  $V_{X_{utile}}$  les sommets de  $V_X$  ayant au moins un arc vers  $V_Y$ 
7     si  $V_X == V_{X_{utile}}$  alors
8       // Extension sans perte d'occurrences
8       Insérer  $(V_{X_{utile}}, X) \rightarrow (V_Y, Y)$  dans le graphe des motifs  $G_m$ 
9     sinon
10      // Extension avec perte d'occurrences.
10      Insérer  $V_{X_{utile}} \rightarrow V_Y$  dans le graphe des motifs  $G_m$ 
11      si le sommet  $V_X$  existe dans le graphe des motifs  $G_m$  alors
12        ajouter  $V_{X_{utile}}, V_X$  dans sommets_a_remonter
13      si le sommet  $V_{X_{utile}}$  n'est pas présent dans  $G_m$  alors
14        chercheCondensesRec( $Y, V_Y$ )
  // Recherche en profondeur

```

L'étape de backtracking décrite par la procédure récursive `backtrackRec`($V_{X_{utile}}$: sommet du graphe des motifs, $V_{toBacktrack}$: sommet du graphe des motifs, $min_support$: entier) retrace chaque sommet marqué en visitant la branche du motif dans le sens inverse pour mettre à jour les occurrences des motifs et les informations tels que les poids et les itemsets.

Procédure `backtrackRec`($V_{X_{utile}}$: sommet du graphe des motifs, $V_{toBacktrack}$: sommet du graphe des motifs, $min_support$: entier)

```

// min_support est le seuil minimal de support pour considérer qu'un
// itemset est fréquent
1 si sommets_a_remonter contient ( $V_{toBacktrack}$ ,  $V_{direction}$ ) alors
2   // i.e.  $V_{toBacktrack}$  doit être backtracké en suivant  $V_{direction}$ 
   backtrackRec( $V_{toBacktrack}$ ,  $V_{direction}$ )
3 pour chaque  $V_i$  sommet incident à  $V_{direction}$  dans le graphe des motifs  $G_m$  faire
4   Soit  $V_{i_{utile}}$  l'ensemble des sommets de  $V_i$  ayant au moins un arc sortant vers
    $v_{X_{utile}}$ .
5   Insérer  $V_{i_{utile}} \rightarrow V_{X_{utile}}$  dans le graphe des motifs  $G_m$ 
   // Lors de l'insertion, nous mettons également à jour les attributs
   // par la formule  $X = \bigcap_{u \in V_{i_{utile}}} \lambda_G(u)$ 
6   backtrackRec( $V_{i_{utile}}$ ,  $V_i$ ) // Continue le backtracking vers le haut

```

La figure 13 montre le déroulement de l'algorithme sur l'exemple du graphe de la figure 12. Les arcs du graphe de motifs sont en bleu. Les arcs en rouge définissent le cas d'extension avec perte d'occurrences, les arcs en vert montrent la phase de **backtracking** avec la mise à jour des poids et des itemsets.

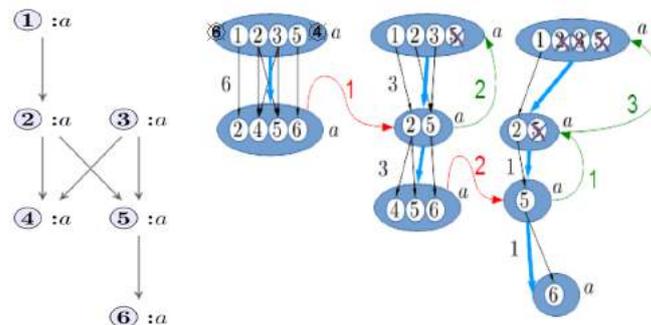


FIGURE 13 – Etapes de onstruction du graphe de motifs du a-DAG à gauche

4.3 Processus complet d'analyse de séries temporelles d'images

Nous décrivons ici la chaîne complète de traitement de la série temporelle d'images enrichie par des couches SIG.

4.3.1 Processus de fouille

Le processus de fouille est présenté d'une manière générale dans la figure 1. Ici nous allons détailler le processus de fouille spécifique à notre méthode et à nos données spatio-temporelles issues d'images satellite, montré en figure 14.

Nous disposons d'une série temporelle d'images satellites à laquelle nous ajoutons toutes couches d'informations disponibles de la zone étudiée. Ces images vont subir une chaîne de prétraitement avant la phase d'extraction de motifs que nous avons défini ci-dessus. Après la phase d'extraction de motifs, nous devons filtrer et sélectionner les motifs les plus pertinents : il s'agit de la phase de post-traitement. Et enfin nous affichons les motifs sur les images satellites afin de les analyser et les interpréter. Pour cela nous avons développé un prototype de visualisation interactif permettant à l'analyste de choisir les motifs et de visualiser les zones correspondantes sur les images datées que nous présenterons en section ??.

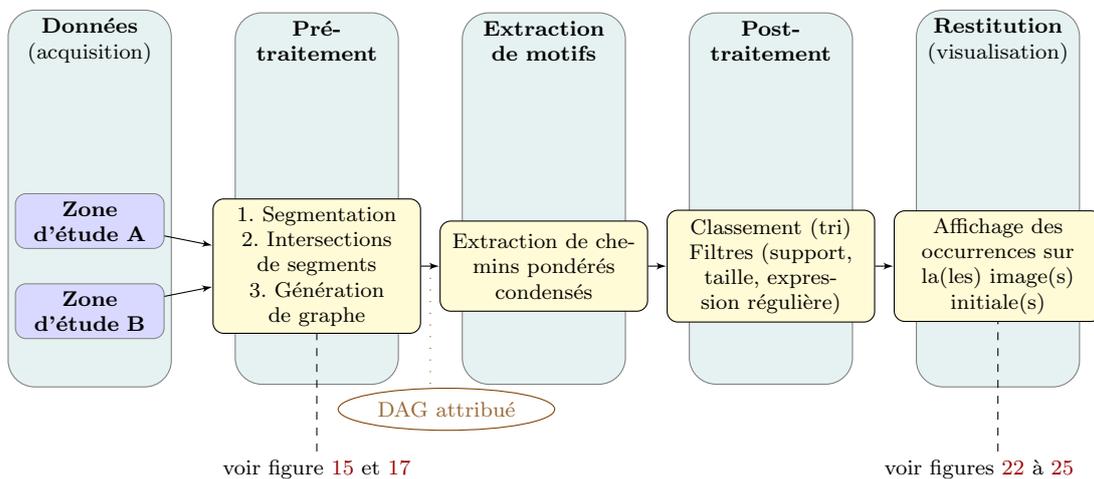


FIGURE 14 – Description de notre processus de fouille de données.

4.3.2 Prétraitement des données

Les images satellites, en général, contiennent les valeurs radiométriques Rouge, Vert, NIR (near-infrared), MIR (mid-infrared). À partir de ces valeurs, les indices NDVI (Normalized Density of Vegetation Index), Redness, Brightness sont calculés. Le NDVI calculé selon la formule $NDVI = \frac{NIR - Rouge}{NIR + Rouge}$ est un indice normalisé largement utilisé en télédétection pour caractériser les zones de végétations : plus la valeur est grande, plus la zone est supposée correspondre à une végétation dense et verte. Le Redness est un indicateur de rougeur ($Redness = \frac{Vert^3}{Rouge^2}$) pour repérer les zones érodées en Nouvelle-Calédonie. En effet le sol néo-calédonien contient des hématites composées d'oxyde de fer qui lui confère la couleur rouge. Le Brightness (la moyenne du Rouge et du Vert) peut indiquer un sol brillant, nu ou des zones nuageuses.

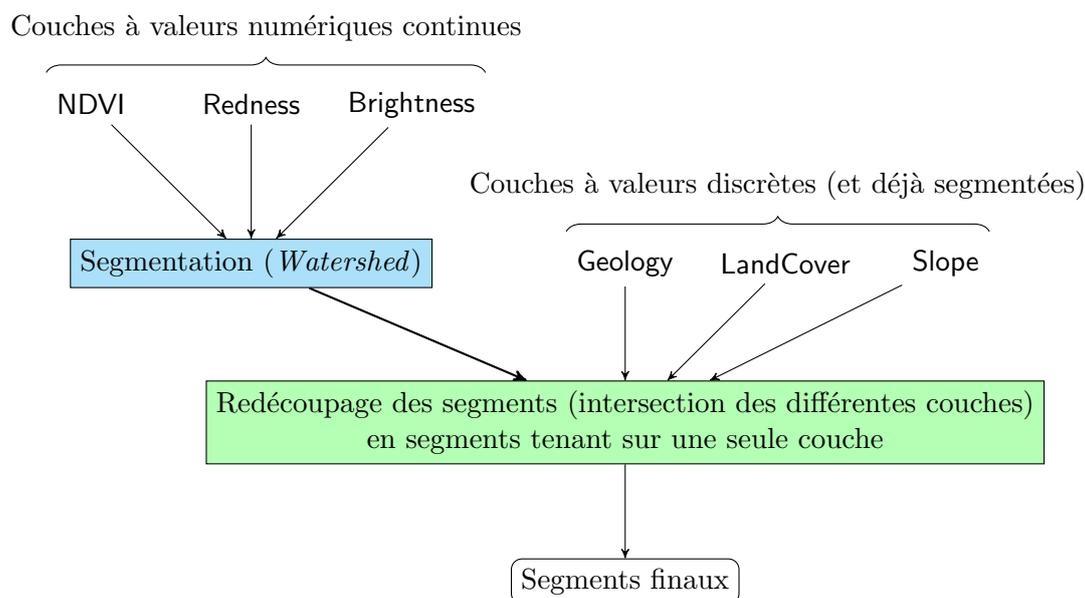


FIGURE 15 – Séquence de traitement des diverses couches de données pour la segmentation. (Geology : lithologie, LandCover : occupation du sol, Slope : pente)

Ces attributs seront utilisés lors de la fouille et sont également utilisés pour segmenter les images.

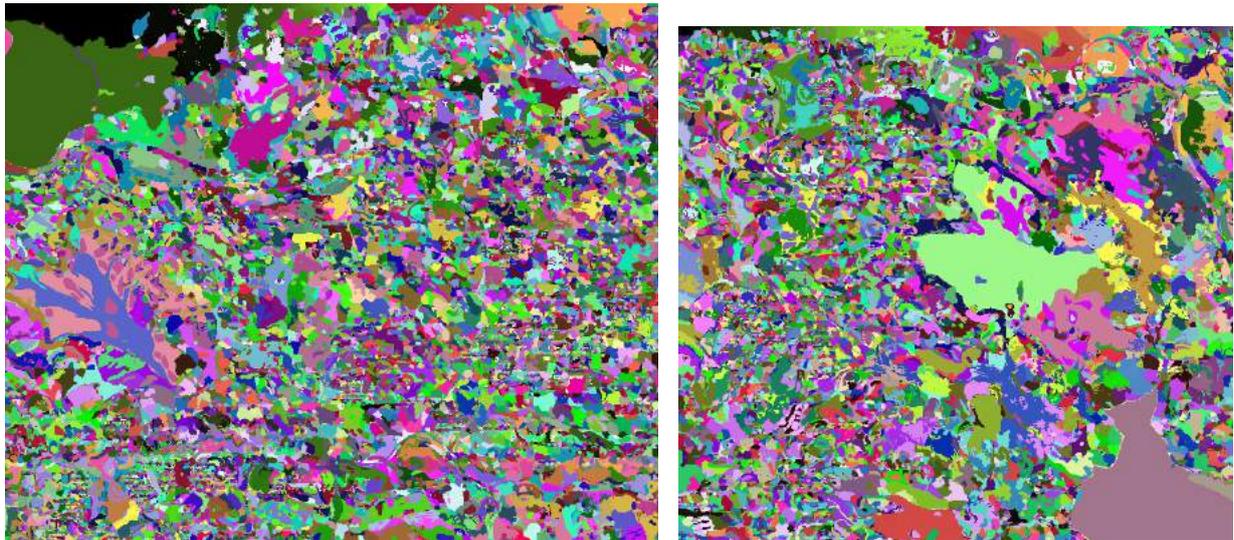
À noter que notre processus est générique et qu'on pourra avoir en entrée un nombre indéterminé d'attributs.

4.3.3 Segmentation

Choix de la méthode de segmentation du watershed Afin de détecter les objets d'études, nous appliquons une méthode de segmentation pour trouver des zones (objets) homogènes en terme de valeurs radiométriques. La méthode de segmentation utilisée — K-means — fournissait trop peu de segments ou des segments (objets ou zones) d'une forme géométrique particulière à la distance choisie. Nous souhaitons obtenir une segmentation avec beaucoup plus de segments de manière à avoir des zones les plus homogènes possible. Nous avons alors choisi la méthode de watershed, ou segmentation par ligne de partage des eaux réputée pour sa sur-segmentation.

Développement d'outil Nous avons développé un outil de pré-traitement en C++ en utilisant Orfeo-Toolbox (OTB)². OTB est une bibliothèque regroupant des outils et algorithmes de traitement d'images optimisée sous forme de pipeline. Dans cette chaîne de traitement, nous utilisons une segmentation watershed sur chacune des couches Brightness/Redness/NDVI. Pour avoir des segments finaux dont les pixels ont des attributs similaires, nous avons réalisé des intersections des différentes couches segmentées (les couches

2. <http://orfeo-toolbox.org/otb/>



(a) Segments de la zone A

(b) Segments de la zone B

FIGURE 16 – Segments des zones d'étude A et B, situées au Sud de la Nouvelle-Calédonie. Les couleurs servent simplement à identifier les différents segments.

segmentées par watershed et les couches SIG : nature géologique du sol, Landcover et Slope). Chaque intersection de segment forme un nouveau segment. Le processus de segmentation est illustré par la figure 15. Les images segmentées finales des 2 zones d'études sont montrées dans les figures 16a et 16b.

4.3.4 Construction d'un graphe orienté acyclique attribué (a-DAG)

Une fois la segmentation faite, nous construisons un graphe orienté attribué acyclique (a-DAG) dont les sommets sont étiquetés par un ensemble d'attributs, pour modéliser les dépendances spatio-temporelles de nos objets d'études.

L'exemple de la figure 17 illustre comment la structure d'a-DAG découle naturellement des données observées : à un temps t_1 , un ensemble d'objets d'étude sont délimités. Aux temps suivants t_2 et t_3 , on identifie d'autres objets, sans pour autant être capable de dire s'ils sont nouveaux ou si ce sont les mêmes objets du temps précédents qui ont évolué. Leur apparition ou modification sont toutefois sûrement conditionnées par la présence d'objets voisins. Ainsi, on peut voir que du temps t_1 au temps t_2 , une forêt et une zone de champs ont fusionné pour ne faire qu'un seul champs, qui ensuite a été transformé en prairie alors qu'il était à proximité d'habitats. On peut alors supposer que la proximité de ces habitats peut expliquer l'apparition d'une prairie là où se tenait auparavant un champs. C'est donc une information qu'il est important d'exprimer, et qui est contenue dans la structure de l'a-DAG nouvellement créée.

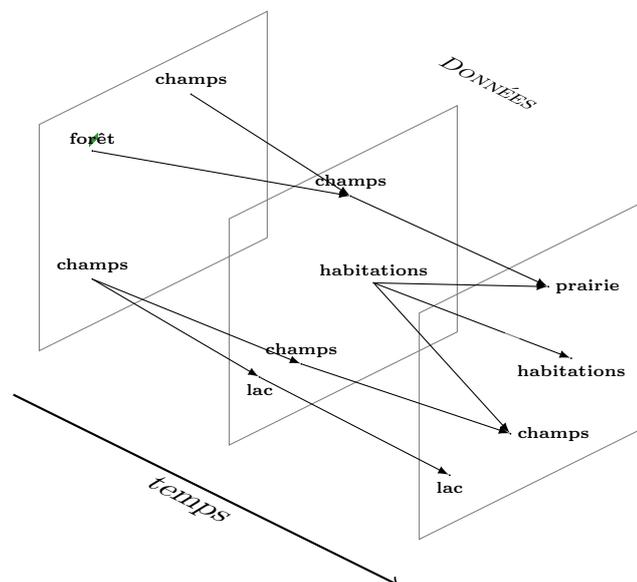


FIGURE 17 – Exemple de a-DAG construit à partir de diverses images temporelles d'une même zone d'étude. Un arc représente la proximité spatio-temporelle d'objets entre deux temps consécutifs.

Attribution des sommets Pour chaque segment, nous faisons correspondre un ensemble d'attributs en fonction des valeurs des pixels du segment. Lorsque ces attributs sont catégoriels, la correspondance est directe : il ne peut y avoir qu'une seule valeur de ces attributs par segment. Ce n'est pas le cas pour les attributs radiométriques à valeur continue (NDVI, Redness, Brightness) : un segment regroupe un ensemble de pixels dont les attributs radiométriques sont proches mais pas nécessairement identiques. En prenant la valeur moyenne nous risquons d'avoir une valeur d'attribut distincte par segment et se trouver avec autant de valeurs d'attributs que de segments. Par conséquent il est nécessaire de normaliser ces ensembles de valeurs pour les rendre comparables.

Pour régler ces problèmes, nous discrétisons les attributs radiométriques. Pour chaque image et pour chaque attribut/bande radiométrique nous créons 5 intervalles de valeurs d'attributs à fréquence égale, i.e. le même nombre de pixels est présent dans chaque intervalle. Ainsi d'une image à l'autre, même si les valeurs radiométriques varient, nous aurons une discrétisation similaire pour chaque image.

Finalement, pour un attribut donné, la valeur qui doit être assignée à un segment est l'intervalle contenant la valeur moyenne des pixels de ce segment. Nous noterons les intervalles de 0 à 4 de manière croissante suivant les valeurs : par exemple NDVI0 est l'intervalle de plus faible valeur pour l'attribut NDVI et NDVI4 est l'intervalle de plus forte valeur.

Création des arêtes Un segment S au temps t_i est considéré proche d'un autre segment S' au temps t_{i+1} s'ils ont une intersection supérieure à $\tau\%$ de leurs surfaces respectives. Le

paramètre τ est arbitraire et nous avons utilisé une valeur de $\tau = 10\%$

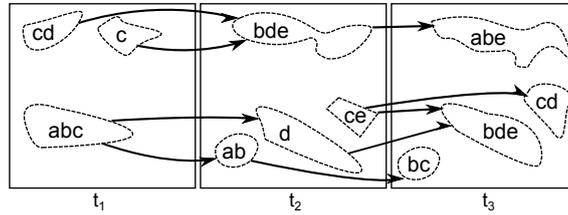


FIGURE 18 – Représentation d'une série temporelle d'images sous forme de graphe orienté acyclique

La génération du graphe est illustrée par la figure 18.

4.3.5 Visualisation de motifs

Un prototype de visualisation implémenté en Scala permet de remettre les différents motifs trouvés dans leur contexte, c'est-à-dire faire la correspondance entre un motif et les zones (ou objets) utilisés dans ses occurrences. La figure 19 est une capture d'écran de ce prototype de visualisation de chemins pondérés. Afin de visualiser les occurrences des chemins pondérés au cours du temps, les occurrences des chemins sont coloriées en fonction de leur position temporelle. Ainsi pour un motif $I_1 \xrightarrow{\text{poids}} I_2 \xrightarrow{\text{poids}} I_3 \xrightarrow{\text{poids}} I_4 \xrightarrow{\text{poids}} I_5$, tous les sommets des occurrences du motif qui contiennent l'itemset I_1 seront coloriés en rouge (peu importe si ces sommets appartiennent aux images t_0, t_1, \dots ou t_{n-1}). De la même manière les sommets contenant I_2 seront coloriés en bleu. Les couleurs utilisées sont respectivement rouge, bleu, vert, orange, violet et cyan. L'utilisation du code couleur permet d'identifier le début des occurrences par la couleur rouge. L'image satellite a été transformée en niveau de gris afin de mieux mettre en évidence les occurrences.

Le prototype permet également de charger les images et les images segmentées, et de générer les a-DAGs. Le visualiseur permet quelques opérations de post-traitement sur les motifs : tri en fonction du support, tri en fonction de la taille, support maximum, recherche de motif par expression régulière. Ainsi, l'analyste ou l'expert pourra utiliser le prototype et interpréter ces résultats en ne prenant que les motifs qui correspondent à ses attentes ou même définir lui-même des contraintes sur les motifs qui l'intéresse. Par exemple, il pourra n'afficher que les motifs traduisant une nette augmentation du Redness. Il pourra également choisir analyser les motifs traduisant une évolution d'un indice que pour les régions avec une forte pente.

4.4 Expérimentations et validation de l'algorithme

Manque de données sur *PORO*, nous disposons

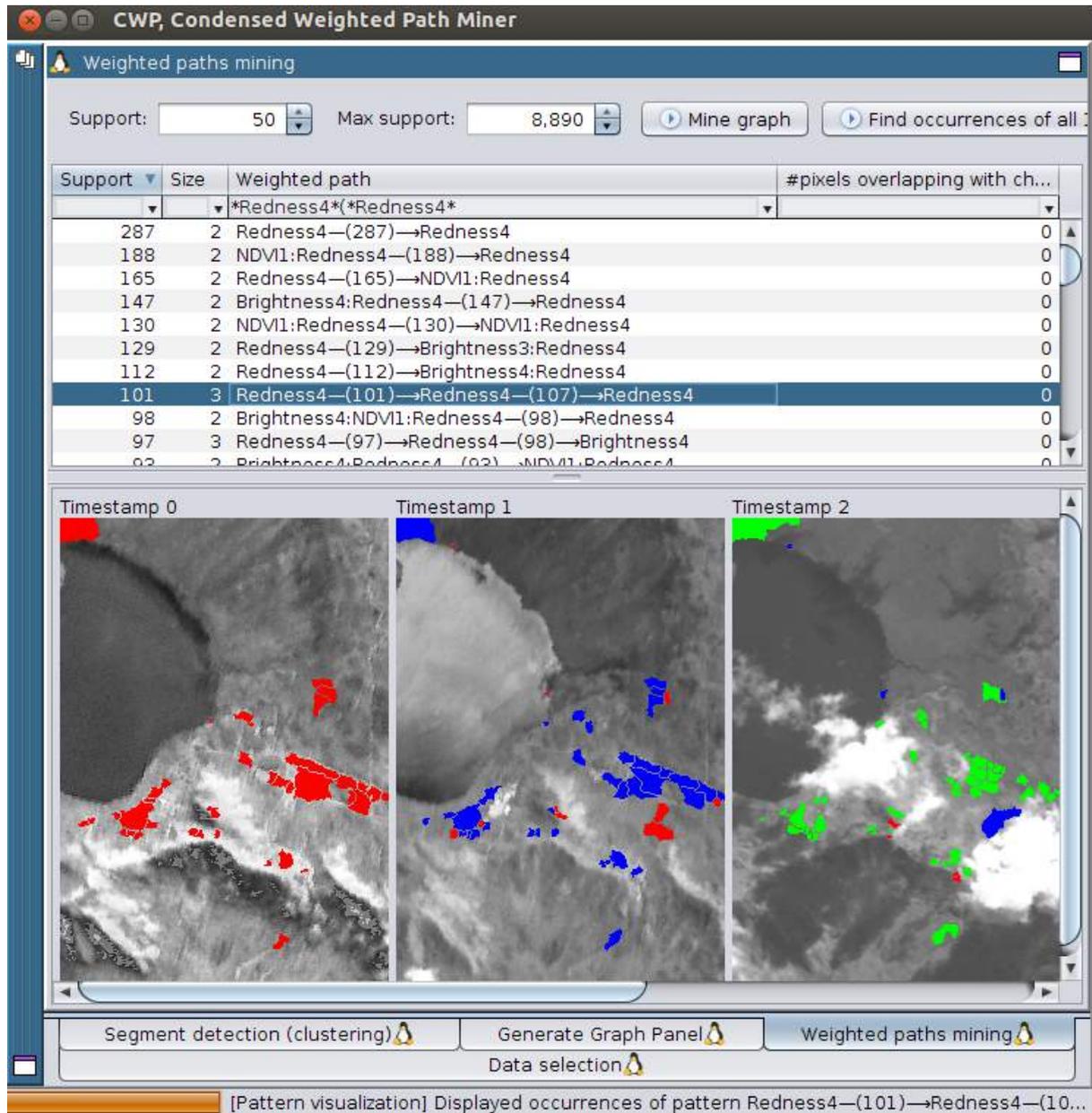
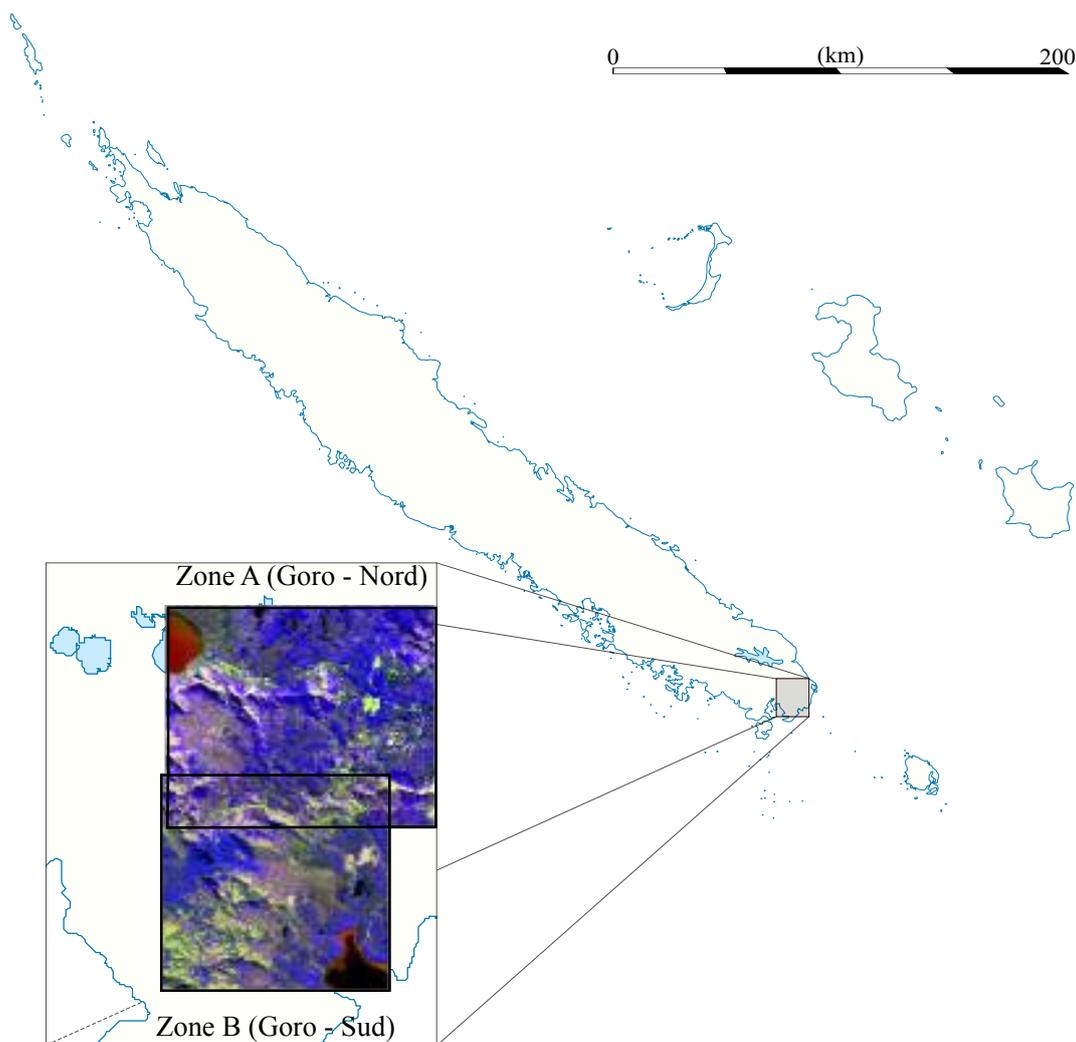


FIGURE 19 – Capture d'écran du prototype de visualisation

4.4.1 Application : suivi de l'érosion en Nouvelle-Calédonie

Sur plusieurs pas de temps, il est intéressant de découvrir les évolutions d'objets. L'étude portant sur l'érosion, nous nous attarderons sur les zones supposées érodées. Le processus de fouille est celui détaillé dans la sous-section 4.3.1.

FIGURE 20 – Zones d'étude



Zones A et B Nous disposons de plusieurs images satellites *APOT4* et *SPOT5* de résolution 10 mètres datant de 1999, 2001 (résolution 20m, i.e. chaque pixel correspond à un carré de 20m de large), 2002, 2005, 2006, 2008 et 2009. Nous avons focalisé notre étude sur deux zones, respectivement de taille 794×660 pixels ($\approx 52,5 \text{ km}^2$) appelée « zone A », et 669×626 pixels ($\approx 41,9 \text{ km}^2$) appelée « zone B » représentées en figure 20. La chaîne de prétraitement a été détaillée dans le chapitre précédent. Les deux zones « A » et

« B » couvrent des variétés de régions observables dans le sud de la Nouvelle-Calédonie : points d'eau douce ou marine, activité anthropiques (mines, usines et pistes), relief, bassins versants, plaines, marécages, forêts. La zone A se trouve au Nord, légèrement à l'est de la zone B. Ces deux zones englobent l'usine et la mine de nickel dites « de Goro ». De plus, les précipitations y sont fortes et régulières.

Segmentation Les paramètres de segmentation choisies sont présentés dans le tableau de la figure 21 pour nos jeux de données. Ils ont été choisies au cas par cas visuellement pour obtenir une segmentation de même finesse sur toutes les images de la même série temporelle.

FIGURE 21 – Paramètres utilisés pour la segmentation watershed

Zone	Année	1999	2001	2005	2008	2009
A	Level	1.60	1.54	1.42	1.42	1.20
A	Threshold	0.0160	0.0154	0.0142	0.0109	0.012
B	Level	1.72	1.60	1.42	1.48	1.72
B	Threshold	0.0172	0.016	0.0151	0.0148	0.0172

Génération de graphes et attributs Pour ces expérimentations, un taux d'intersection de 10% a été utilisé.

Pour rappel les attributs radiométriques à valeur continue sont discrétisés par intervalle à fréquence égale :

Pour l'attribut *Redness*, les valeurs discrétisées sont *Redness0*, *Redness1*, ..., *Redness4*. *Redness0* correspondant à la valeur la plus faible et *Redness4* la valeur la plus forte.

Filtrage et analyse des motifs Notre méthode de fouille fournit un grand nombre de motifs selon la valeur de support minimum. Les résultats ci-dessous ont été réalisés avec un support minimum égal à 10.

Notre prototype permet de filtrer les motifs par expression régulière, et c'est ainsi que nous avons pu sélectionner des motifs intéressants et de composer une sélection réduite et ciblée par l'expert

En fonction de l'analyse, nous pouvons revenir aux étapes d'avant pour réajuster les paramètres comme le taux d'intersection, le nombre d'intervalle par discrétisation, la méthode de discrétisation, la finesse de la segmentation, le support minimum etc.

Nous allons présenter les résultats qualitatifs en sélectionnant quelques motifs sur les zones d'études « A » et B.

4.4.2 Motifs fréquents de la zone de Goro - Nord (zone A)

Parmi les motifs trouvés, nous sommes focalisés sur ceux exprimant éventuellement un phénomène d'érosion ; ces motifs présentent donc une augmentation ou forte valeur de

l'indice Redness.

La figure 22 illustre le motif $\text{Redness1} \xrightarrow{20} \text{Redness1} \xrightarrow{21} \text{Redness2, Slope} = [3,6 ; 30] \xrightarrow{23} \text{Redness3}$: nous remarquons une augmentation progressive du Redness qui témoigne d'une érosion naturelle. La valeur $\text{Slope}=[3,6 ; 30]$ indique que ces zones possèdent des pentes entre 3,6% et 30%. En effet ces zones correspondent aux versants en bas des crêtes de massifs ou à des bords de pistes (risque d'érosion fort).

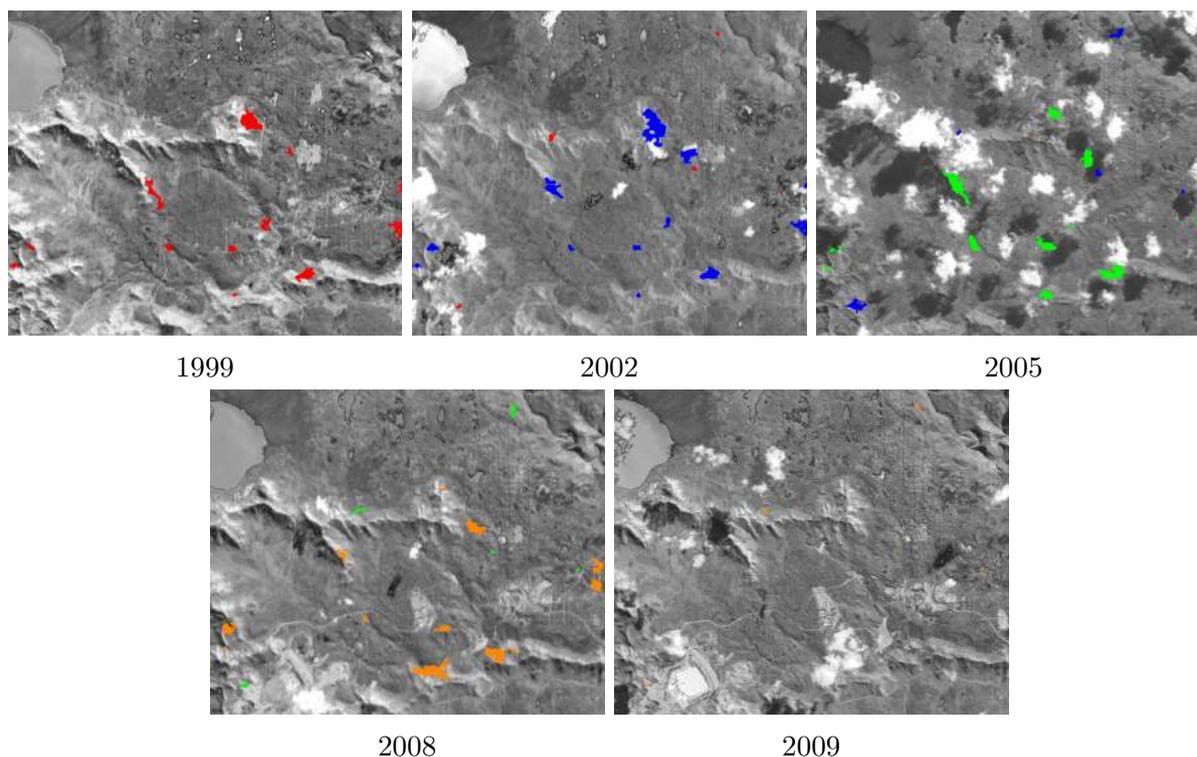


FIGURE 22 – Zone A, $\text{Redness1} \xrightarrow{20} \text{Redness1} \xrightarrow{21} \text{Redness2, Slope} = [3,6 ; 30] \xrightarrow{23} \text{Redness3}$ Suivi de l'évolution de zones d'érosions progressives / naturelles depuis 1999.

Parmi les régions pouvant indiquer une revégétalisation (i.e. processus inverse de l'érosion) illustrées sur la figure 23, nous pouvons nous apercevoir que seuls des endroits très ponctuels sont concernés (peu de segments, faible surface). La zone α mise en évidence sur la dernière date correspondant à une région forestière. L'augmentation de NDVI observée peut être due par exemple à la densification de nouvelles pousses ou à l'augmentation d'envergure des arbres.

4.4.3 Motifs fréquents de la zone de Goro - Sud (zone B)

Dans la partie sud de la mine de Goro, on peut déjà observer que les régions initialement (en 1999) érodées ont tendance à rester stables, c'est-à-dire toujours autant érodées (figure 24, motif $\text{Redness4} \xrightarrow{258} \text{Redness4} \xrightarrow{246} \text{Redness4} \xrightarrow{217} \text{Redness4} \xrightarrow{219} \text{Redness4}$). Cela n'a rien

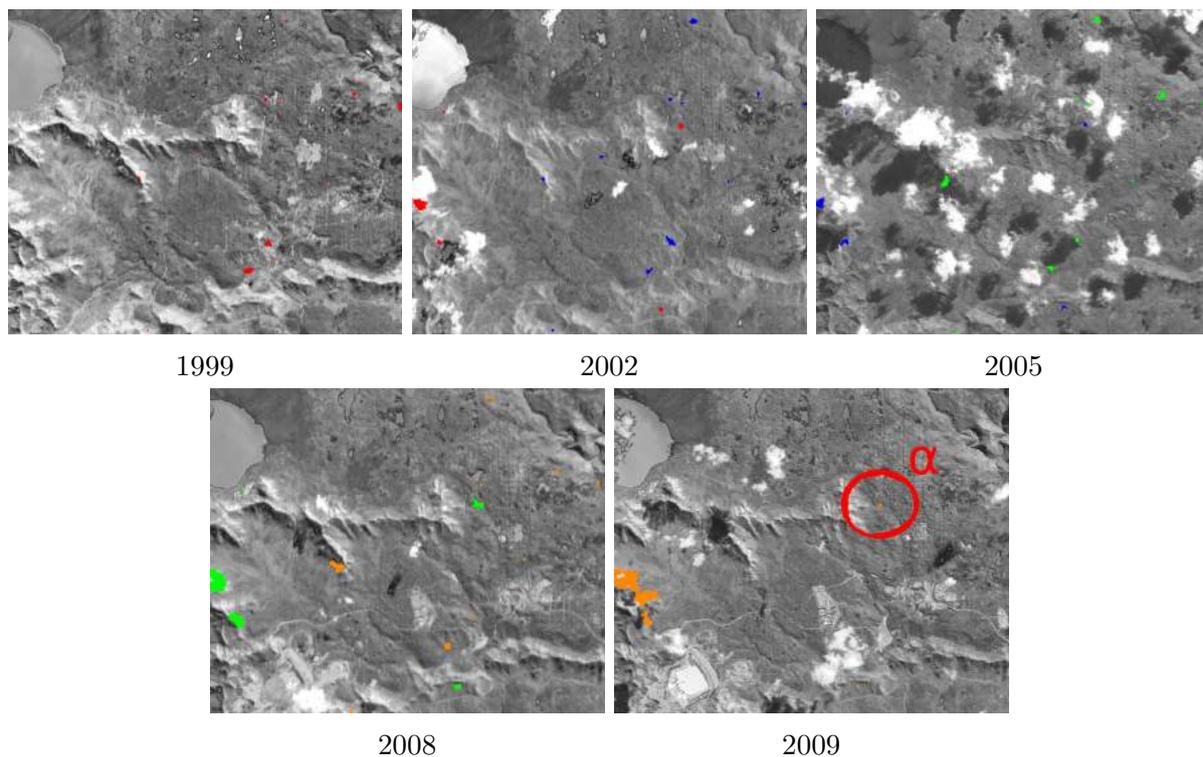


FIGURE 23 – Zone A, $\text{NDVI1} \xrightarrow{18} \text{NDVI2} \xrightarrow{16} \text{NDVI2} \xrightarrow{17} \text{NDVI3}$ Suivi de l'évolution de zones subissant d'éventuelles revégétalisations.

de surprenant, d'autant plus que les régions concernées se concentrent sur et autour de la mine (au Sud Ouest) et du bassin de rétention visible à partir de 2008 (au Nord Ouest). Cependant, il est à noter que certaines régions gagnent en surface dans le temps. Parmi ces régions, on peut distinguer les crêtes des reliefs entourant la mine (région milieu et milieu sud-ouest) ainsi que les routes et chemins (région nord-est).

Le motif $\text{NDVI3, Redness2} \xrightarrow{9} \text{Brightness3} \xrightarrow{10} \text{Redness4} \xrightarrow{10} \text{NDVI0, Redness4} \xrightarrow{\quad}$ de la figure 25 montre une augmentation de Redness brutale entre 2 pas de temps puis une stabilisation de la valeur. Pendant toute la période où la valeur de Redness est stable, nous pouvons observer un agrandissement de la zone, notamment entre 2002 et 2005. Cette augmentation de Redness est corrélée avec la diminution de NDVI qui montre l'évolution de zones bien végétalisées (NDVI3) vers des zones sans végétal (NDVI0). Cette évolution très radicale est liée à l'activité humaine aux alentours du bassin de rétention dans le Nord-Ouest.

5 Analyse du site de *PORO*

Dans cette section, nous allons appliquer notre modèle de suivi de l'érosion sur le site de *PORO* qui est le site choisi pour le projet CNRT-FPBV. Le modèle que nous avons

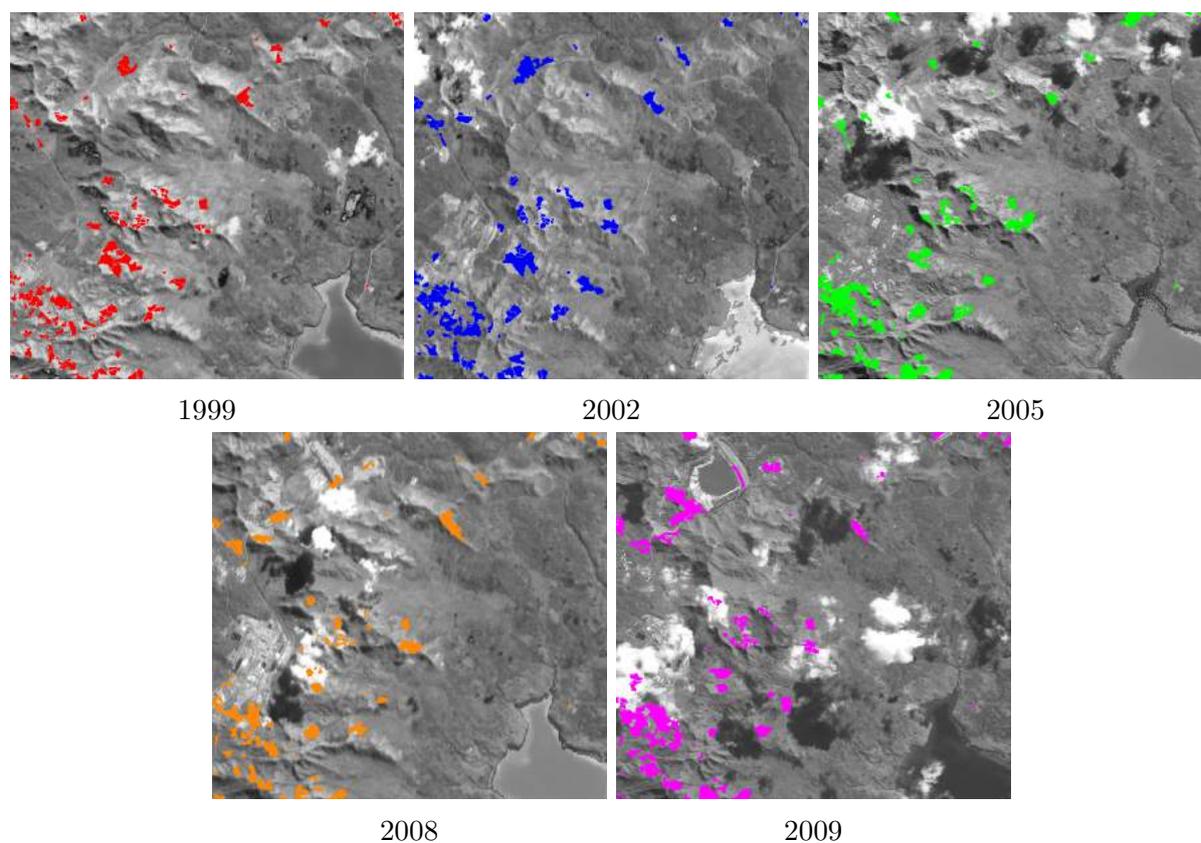


FIGURE 24 – Zone B, Redness4 $\xrightarrow{159}$ Redness4 $\xrightarrow{116}$ Redness4 $\xrightarrow{112}$ Redness4 $\xrightarrow{110}$ Redness4 .
Suivi de l'évolution des zones qui étaient érodées en 1999.

développé est un modèle générique qui s'adapte à tout problème de suivi de phénomène spatio-temporel. Nous pouvons reprendre le même processus en figure 14 dont lequel on modifie simplement l'entrée des données en mettant les données disponibles sur *PORO*. Le choix des paramètres qui concernent les propriétés des données : images, couches SIG disponibles. Les autres étapes du processus restent les mêmes.

5.1 Données disponibles sur *PORO*

Les données disponibles pour le site de *PORO* sont deux images satellites *RapidEye* à grande échelle datée de 2011 et 2012 (cf. figure 26). Sur ces deux images une petite zone autour de la mine a été choisi comme site d'expérimentation. L'image 2012 contient quelques nuages, les régions nuageuses ont été masqués d'où les régions noirs qui correspondent à aucune information. Cela veut dire qu'on ne pourra pas avoir d'évolution de ces régions.

A ces images, nous avons uniquement la couche occupation (fournie par UMR Espace-Dev de l'IRD) du sol correspondante à grande échelle.

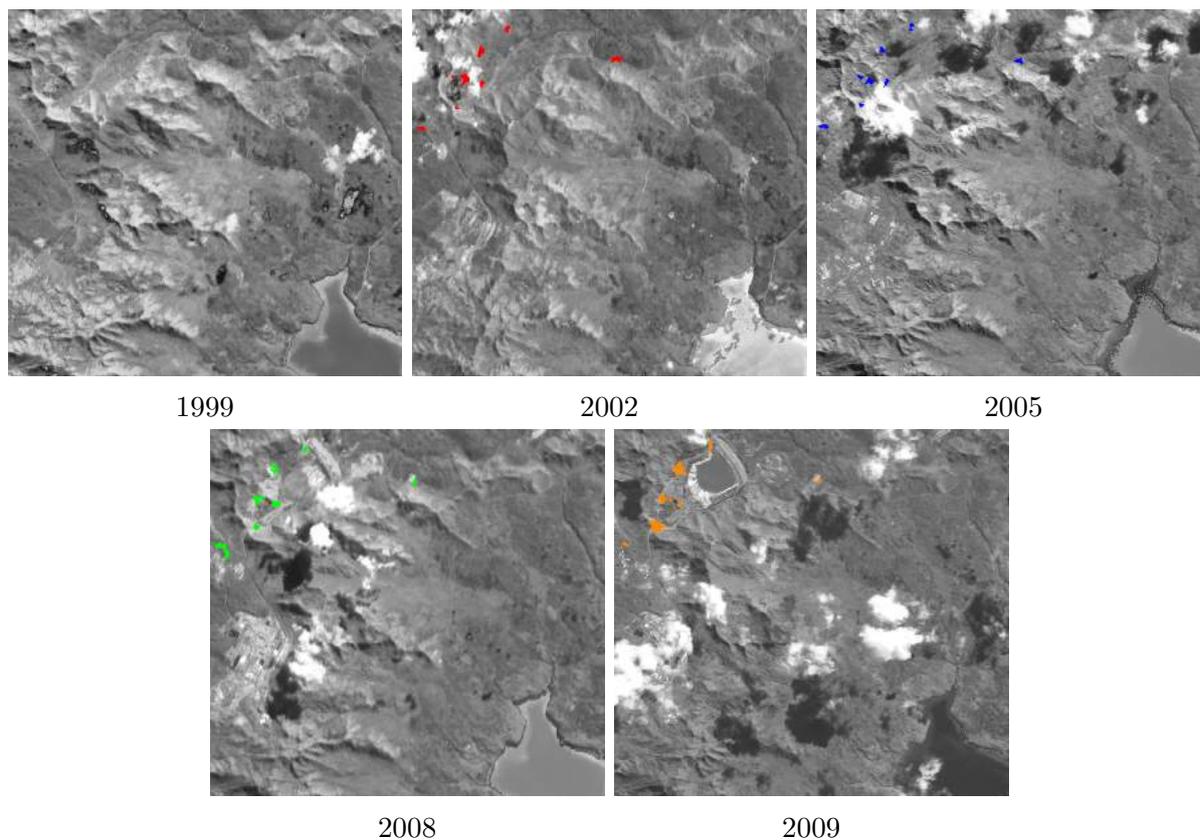


FIGURE 25 – Zone B, $NDVI3, Redness2 \xrightarrow{9} Brightness3 \xrightarrow{10} Redness4 \xrightarrow{10} NDVI0, Redness4$

5.2 Analyse à grande échelle

Nous avons appliqué notre modèle de suivi de l'érosion aux données à grande échelle. Les indices suivants ont été calculés sur les images *RapidEye* : indice de végétation *NDVI*, indice de brillance *Brightness* et l'indice de rougeur *Redness*. En entrée du modèle, nous considérons les 3 indices auxquels on a rajouté les informations sur l'occupation du sol.

Dans la phase de segmentation, nous avons voulu avoir des régions les plus homogènes possibles, d'où des régions plus petites et nombreuses. Ceci n'affecte en rien les résultats du modèle, au contraire, cela va nous permettre d'avoir plus de régions qui ont des tendances similaires et donc fréquentes. Notre algorithme d'extraction détectera ces tendances grâce aux motifs qui sont les chemins pondérés condensés.

Après segmentation très fine sur chaque indice et consolidation de ces régions, nous avons à peu près 65000 régions homogènes qui ont été trouvées à chaque date. Dans les autres étapes du processus complet, certains seuils de paramètres sont à fixer par l'utilisateur. Nous avons testé un nombre de valeurs de seuils et nous avons choisi de ne garder que les résultats intéressants. Après avoir exécuté le processus complet d'extraction, nous avons obtenu 23 motifs. Nous n'avons choisi de montrer que quelques exemples dans ce

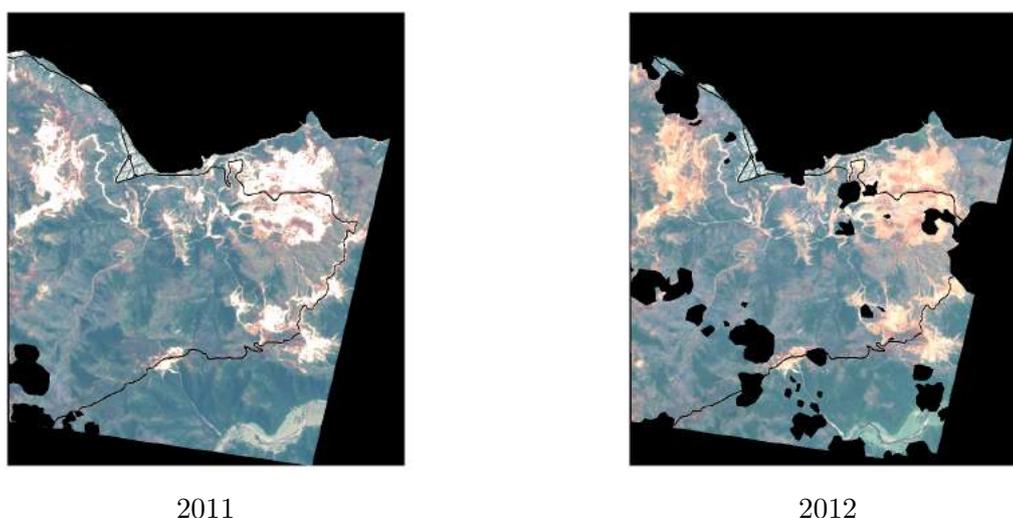


FIGURE 26 – Images RapidEye

rapport.

La figure 27, montre le motif $\text{Redness4} \xrightarrow{113} \text{Redness2}$ qui correspond aux régions qui sont passées d'une rougeur forte du sol à une rougeur relativement faible.

Parmi les régions de la figure 27, il y en a qui ont un NDVI très fort comme le montre la figure 28 qui recense les régions vérifiant les évolutions suivant le motif $\text{Redness4} \xrightarrow{43} \text{Redness2}, \text{NDVI4}$. Ces zones ont probablement subies une revégétalisation.

La figure 29 montre un autre exemple d'évolution $\text{Redness0} \xrightarrow{64} \text{Redness2}$ contenant une augmentation du Redness ce qui signifie un début d'érosion.

La figure 30 montre des régions suivant l'évolution du motif $\text{LanCoverForetPeuDense} \xrightarrow{350} \text{LandCoverForetDense}, \text{NDVI4}$. Ces régions passe d'une forêt peu dense à une forêt dense avec un indice de végétation très fort. On reterouve cette forte corrélation entre un indice de végétation très fort avec une forêt dense.

6 Conclusion

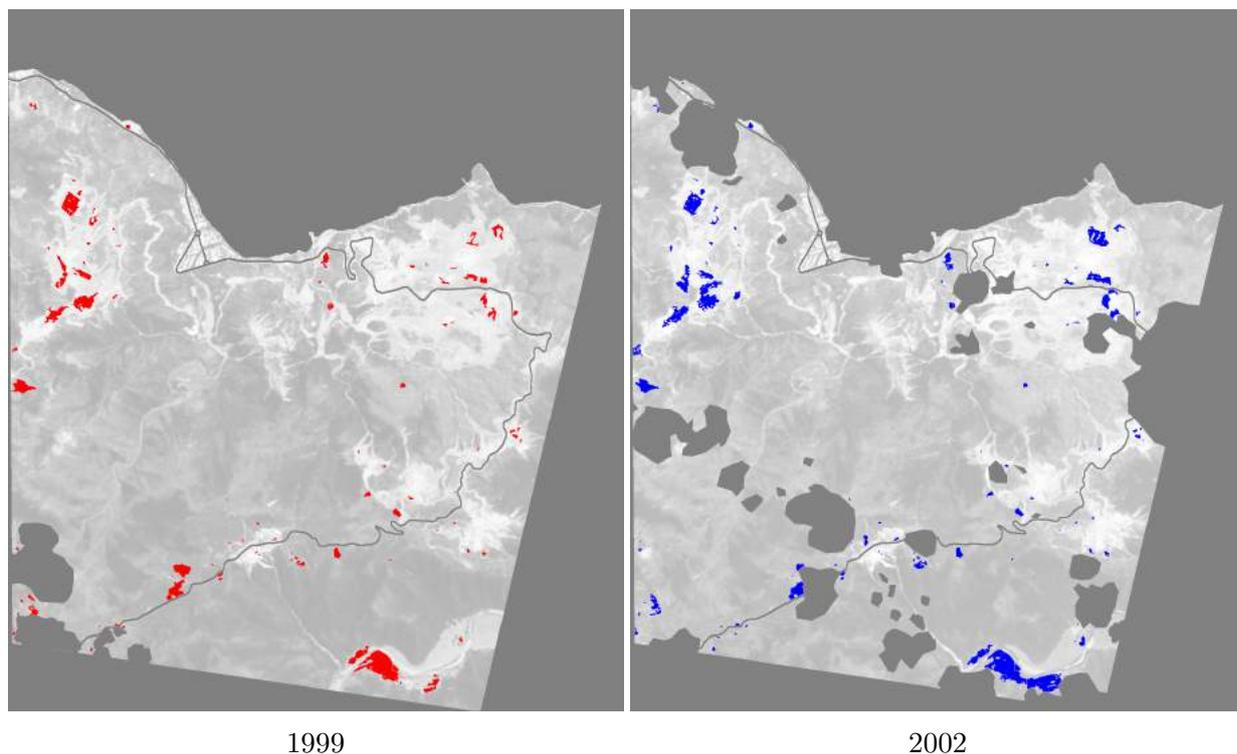


FIGURE 27 – Redness4 $\xrightarrow{113}$ Redness2 .

Bibliographie

- [AAC97] P. Aplin, P.M. Atkinson, and P.J. Curran. Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade. *International Journal of Remote Sensing*, 18 :1387–1381, 1997.
- [AAG03] N. Andrienko, G. Andrienko, and P. Gatalsky. Exploratory spatio-temporal visualization : an analytical review. *Journal of Visual Languages and Computing*, 14(6) :503–541, December 2003. Special Issue on Visual Data Mining.
- [AAJ+07] G. Andrienko, N. Andrienko, P. Jankowski, D.A. Keim, M.-J. Kraak, A.M. MacEachren, and S. Wrobel. Geovisual analytics for spatial decision support : Setting the research agenda. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(8) :839–857, 2007.
- [AFGY02] J. Ayres, J. Flannick, J. Gehrke, and T. Yiu. Sequential Pattern Mining Using Bitmap Representation. In *Proc. of the 8th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 429–435, Edmonton, Alberta, Canada, July 2002.
- [AGB+99] F. Amelung, D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and P. J. Laczniaik. Sensing the ups and downs of Las Vegas : InSAR reveals structural control

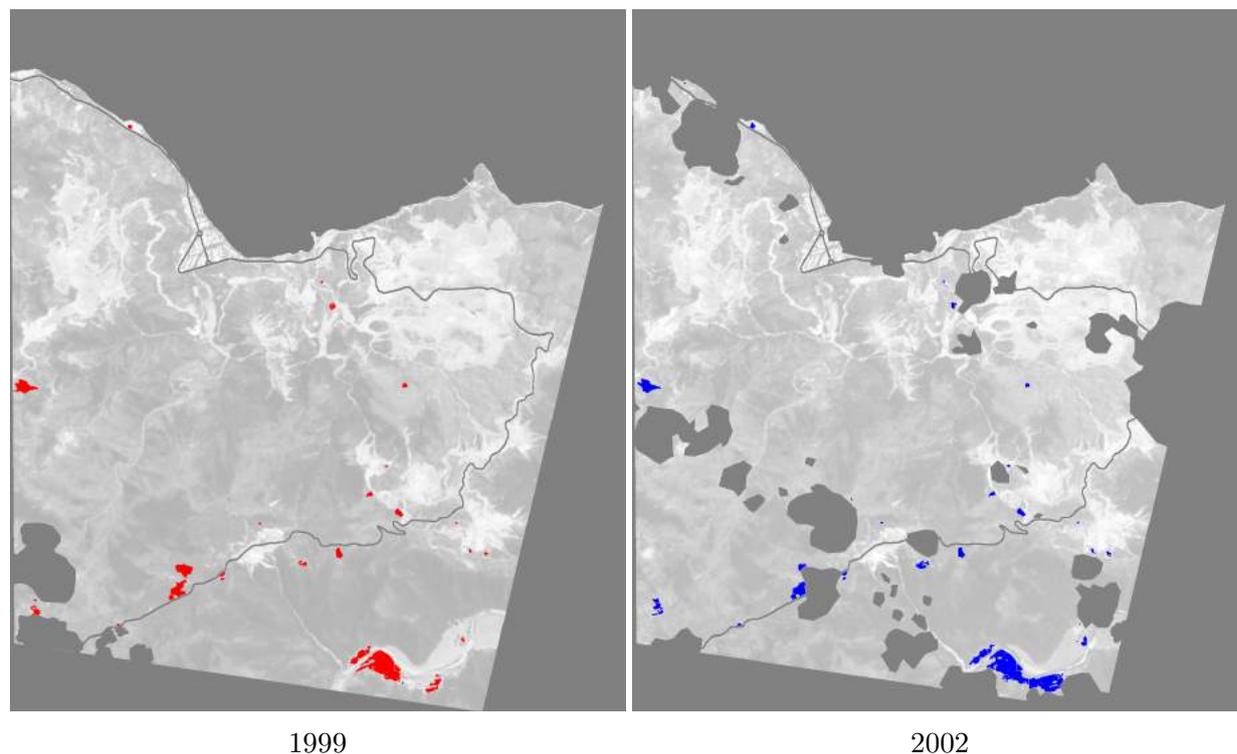


FIGURE 28 – Redness4 $\xrightarrow{43}$ Redness2, NDVI4 .

of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27(6) :483–486, 1999.

- [AIS93] R. Agrawal, T. Imielinski, and A. Swami. Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases. In P. Buneman and S. Jajodia, editors, *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management Data*, pages 207–216, Washington, DC, USA, 1993. ACM Press.
- [AIS02] R. Agrawal, T. Imielinski, and A. Swami. Sequential Pattern Mining Using Bitmap Representation. In *Proceedings of the 8th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Alberta, Canada, 2002.
- [Ant04] Antunes, C. and Oliveira, A. L. Mining Patterns Using Relaxations of User Defined Constraints. In *Workshop in Knowledge Discovery in Inductive Databases (KDID - ECML\PKDD 2004)*, Pisa, Italy, September 2004.
- [Ant05a] C. Antunes. *Pattern Mining over Nominal Event Sequences using Constraint Relaxations*. PhD thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, January 2005.
- [Ant05b] Antunes, C. and Oliveira, A. L. Constraint relaxations for discovering unknown sequential patterns. In B. Goethals and A. Siebes, editors, *Proceedings of the Third International Workshop on Knowledge Discovery in Inductive Databases, (KDID 2004)*, pages 11–32. Springer, 2005.

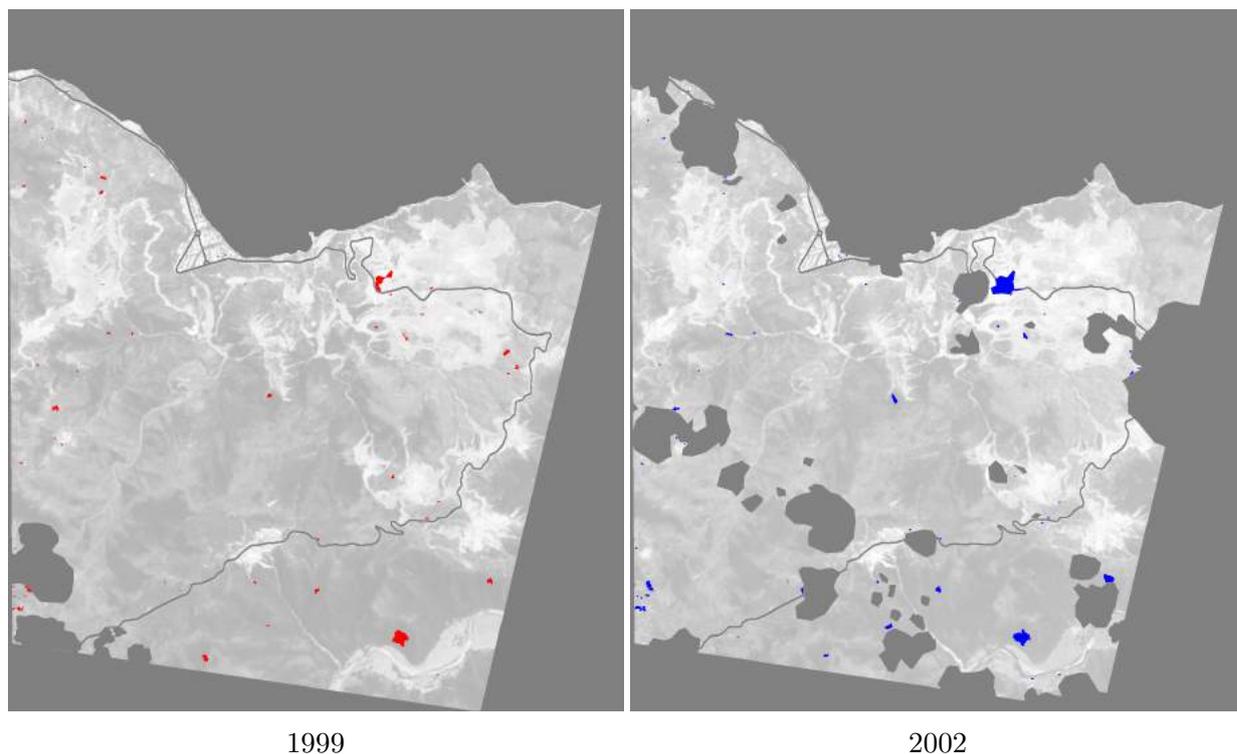


FIGURE 29 – Redness0 $\xrightarrow{64}$ Redness2 .

- [APWZ95] Rakesh Agrawal, Giuseppe Psaila, Edward L. Wimmers, and Mohamed Zaït. Querying shapes of histories. In *Proceedings of the 21st International Conference on Very Large Data Bases (VLDB '95)*, pages 502–514, San Francisco, CA, USA, 1995. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [AS94] R. Agrawal and R. Srikant. Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases. In J. B. Bocca, M. Jarke, and C. Zaniolo, editors, *VLDB'94, Proceedings of 20th International Conference on Very Large Data Bases, September 12-15, 1994, Santiago de Chile, Chile*, pages 487–499. Morgan Kaufmann, 1994.
- [AS95a] R. Agrawal and R. Srikant. Mining sequential patterns. In Philip S. Yu and Arbee S. P. Chen, editors, *Proc. of the 11th International Conference on Data Engineering (ICDE'95)*, pages 3–14, Taipei, Taiwan, 1995. IEEE Computer Society Press.
- [AS95b] Rakesh Agrawal and Ramakrishnan Srikant. Mining sequential patterns. In *ICDE*, pages 3–14, 1995.
- [AS08] P. Aplin and G.M. Smith. Advances in object-based image classification. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, 2008. Part B7.

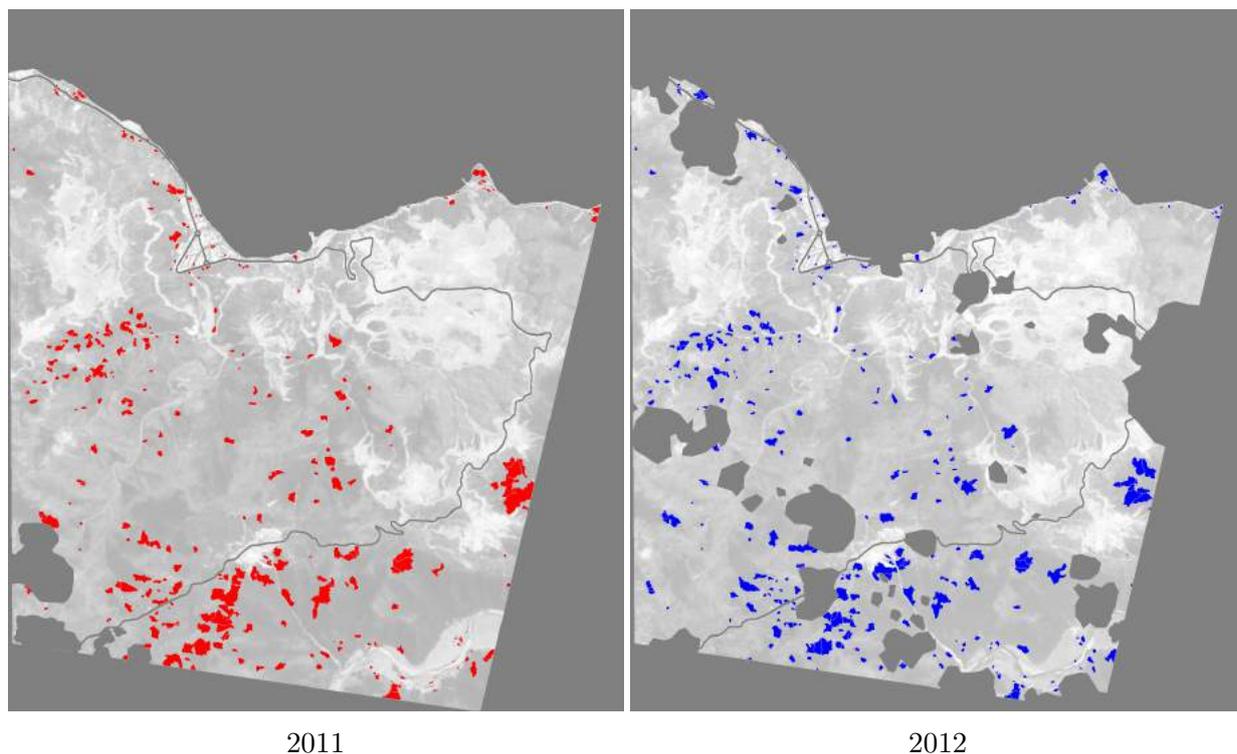


FIGURE 30 – *LanCoverForetPeuDense* $\xrightarrow{350}$ *LandCoverForetDense, NDVI4* .

- [ATF09] R. Athauda, M. Tissera, and C. Fernando. Data Mining Applications : Promise and Challenges. In J. Ponce and A. Karahoca, editors, *Data Mining and Knowledge Discovery in Real Life Applications*, pages 201–214. InTech, Vienna, Austria, 2009.
- [BA96] R. J. Brachman and T. Anand. The process of knowledge discovery in databases : A human centered approach. In U. M. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, P. Smyth, and R. Uthurusamy, editors, *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 37–57. AAAI/MIT Press, 1996.
- [Bay02] R.J. Bayardo. The Many Roles of Constraints in Data Mining (Letter from the guest editor). *ACM SIGKDD Explorations*, 4(1) :i – ii, June 2002.
- [Bay04] R. J. Bayardo. The Hows, Whys, and Whens of Constraints in Itemset and Rule Discovery. In *Proceedings of the European Workshop on Inductive Databases and Constraint Based Mining*, pages 1–13, 2004.
- [BB00] J.-F. Boulicaut and A. Bykowski. Frequent closures as a concise representation for binary data mining. In *Proceedings of the Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD'00)*, volume 1805 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 62–73, Kyoto, Japan, 2000. Springer-Verlag.

- [BB05] S. Bistarelli and F. Bonchi. Interestingness is Not a Dichotomy : Introducing Softness in Constrained Pattern Mining. In A. Jorge, L. Torgo, P. Brazdil, R. Camacho, and J. Gama, editors, *Proceedings of the 9th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (PKDD '05)*, volume 3721 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 22–33. Springer, 2005.
- [BBR00] J.-F. Boulicaut, A. Bykowski, and C. Rigotti. Approximation of frequency queries by mean of free-sets. In *Proceedings of the European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (PKDD '00)*, volume 1910 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 75–85, Lyon, France, September 2000. Springer-Verlag.
- [BBR03] J.-F. Boulicaut, A. Bykowski, and C. Rigotti. Free-sets : a condensed representation of boolean data for the approximation of frequency queries. *Data Mining and Knowledge Discovery Journal*, 7(1) :5–22, 2003.
- [BBTD08] S. Bontemps, P. Bogaert, N. Titeux, and P. Defourny. An object-based change detection method accounting for temporal dependences in time series with medium to coarse spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 112 :3181–3191, 2008.
- [BDMFK07] M. Bertolotto, S. Di Martino, F. Ferrucci, and M-T. Kechadi. Visualization system for collaborative spatio-temporal data mining. *Journal of Geographical Information Science*, 21(7), 2007.
- [Bel91] A. S. Belward. Spectral Characteristics of Vegetation, Soil and Water in the Visible, Near-Infrared Wavelength. In A. S. Belward and C. R. Valenzuela, editors, *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries*, pages 31–53. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [BF00] L. Bruzzone and D. Fernández Prieto. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3) :1171–1182, May 2000.
- [BFE⁺10] Wadii Boulila, Imed Riadh Farah, Karim Saheb Ettabaa, Basel Solaiman, and Henda Ben Ghézala. Spatio-temporal modeling for knowledge discovery in satellite image databases. In *Proceedings of the 7th French Information Retrieval Conference, Conférence en Recherche d’Informations et Applications - CORIA 2010, Sousse, Tunisia, March 18-20, 2010*, pages 35–49. Centre de Publication Universitaire, 2010.
- [BG05] F. Bonchi and F. Giannotti. Pushing Constraints to Detect Local Patterns. In K. Morik, J.-F. Boulicaut, and A. Siebes, editors, *Local Pattern Detection, International Seminar, Dagstuhl Castle, Germany, April 12-16, 2004, Revised Selected Papers*, volume 3539 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–19. Springer, 2005.

- [BGMY01] B. Battenfield, M. Gahegan, H. Miller, and M. Yuan. Geospatial data mining and knowledge discovery. UCGIS white paper on Emergent Research Themes, 2001.
- [BKM99] Jean-François Boulicaut, Mika Klemettinen, and Heikki Mannila. Modeling kdd processes within the inductive database framework. In *DaWaK*, pages 293–302, 1999.
- [BKS⁺08] S. Boriah, V. Kumar, M. Steinbach, C. Potter, and S. Klooster. Land cover change detection : a case study. In *Proceeding of the 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'08)*, pages 857–865, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [BL05] Francesco Bonchi and Claudio Lucchese. Pushing tougher constraints in frequent pattern mining. In Tu Bao Ho, David Wai-Lok Cheung, and Huan Liu, editors, *Proceedings of the 9th Pacific-Asia Conference on Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, PAKDD'05, Hanoi, Vietnam, May 18-20, 2005*, volume 3518 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 114–124. Springer, 2005.
- [BL07] Francesco Bonchi and Claudio Lucchese. Extending the state-of-the-art of constraint-based pattern discovery. *Data Knowl. Eng.*, 60 :377–399, February 2007.
- [BML⁺98] W.-M. Boerner, H. Mott, E. Lunenburg, C. Livingstone, B. Brisco, R. J. Brown, and J. S. Patterson. Polarimetry in Radar Remote Sensing : Basic and Applied Concepts - Chapter 5. In F. M. Henderson and A. J. Lewis, editors, *Principles and Applications of Imaging Radar*, volume 2 of *Manual of Remote Sensing*, pages 271–358. John Wiley and Sons, New York, USA, third edition, 1998.
- [BR01] A. Bykowski and C. Rigotti. A condensed representation to find frequent patterns. In *Proceedings of the ACM Symposium on Principles of Database Systems (PODS'01)*, pages 267–273, Santa Barbara, CA, USA, May 2001. ACM Press.
- [BR03] A. Bykowski and C. Rigotti. DBC : A condensed representation of frequent patterns for efficient mining. *Information Systems*, 28(8) :949–977, 2003.
- [BRM05] Jean-François Boulicaut, Luc De Raedt, and Heikki Mannila, editors. *Constraint-Based Mining and Inductive Databases, European Workshop on Inductive Databases and Constraint Based Mining, Hintertzen, Germany, March 11-13, 2004, Revised Selected Papers*, volume 3848 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2005.
- [BSJ06] A. Boucher, K.C. Seto, and A.G. Journel. A Novel Method for Mapping Land Cover Changes : Incorporating Time and Space With Geostatistics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11) :3427–3435, November 2006.

- [BTV⁺04a] F. Bujor, E. Trouvé, E. Valet, J.-M. Nicolas, and J.P. Rudant. Application of log-cumulants to the detection of spatiotemporal discontinuities in multitemporal SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10) :2073–2084, 2004.
- [BTV⁺04b] F. Bujor, E. Trouvé, L. Valet, J.-M. Nicolas, and J.-P Rudant. Application of log-cumulants to the detection of spatiotemporal discontinuities in multitemporal SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10) :2073–2084, 2004.
- [BVL⁺02] F. Baret, R. Vintilă, C. Lazăr, N. Rochdi, L. Prévot, J. C. Favard, H. Debois-sezon, C. Lauvernet, P. Voicu, E. Petcu, G. Petcu, J.-P. Denux, O. Marloie, C. Radnea, D. Turnea, C. Simota, V. Poenaru, F. Cabot, and P. Henry. Preliminary results of the ADAM Project : investigating high temporal revisit frequency at high spatial satellite resolution for crop monitoring. In A. Canarache and R. Enache, editors, *Proc. Int. Conf. Soils under Global Change - a Challenge for the 21st Century*, volume 1, pages 63–78, 2002.
- [Cam02] J. B. Campbell. *Introduction to Remote Sensing*. The Guilford Press, New York, USA, third edition, 2002.
- [CB02] B. Crémilleux and J.-F. Boulicaut. Simplest rules characterizing classes generated by delta-free sets. In *Proceedings of the International Conference on Knowledge Based Systems and Applied Artificial Intelligence*, pages 33–46, Cambridge, UK, 2002. Springer-Verlag.
- [CBRB08] Loic Cerf, Jérémy Besson, Céline Robardet, and Jean-François Boulicaut. Data peeler : Constraint-based closed pattern mining in n-ary relations. In *SDM*, pages 37–48, 2008.
- [CC84] E. P. Crist and R. C. Cicone. A Physically Based Transformation of Thematic Mapper Data : the TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22 :256–263, 1984.
- [CC01] T.F. Cox and M.A.A. Cox, editors. *Multidimensional Scaling*. Monographs on statistics and applied probability. Chapman & Hall/CRC, 2001.
- [CCP⁺04] Y. Cai, D. Clutter, G. Pape, J. Han, M. Welge, and L. Auvil. MAIDS : Mining Alarming Incidents from Data Streams. In *Proceedings of the 8th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Paris, France, 2004.
- [CDLB07] O. Cavalié, M.-P. Doin, C. Lasserre, and P. Briole. Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series analysis : Probing the lithosphere rheological structure. *Journal of Geophysical Research*, 112, 2007.
- [Cen] Centre National d’Etudes Spatiales. Database for the Data Assimilation for Agro-Modeling (ADAM) project. online. <http://kalideos.cnes.fr/index.php?id=accueil-adam>.

- [CG02] T. Calders and B. Goethals. Mining all non derivable frequent itemsets. In *Proceedings of the European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (PKDD'02)*, volume 2431 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 74–85, Helsinki, Finland, August 2002. Springer-Verlag.
- [CG03] T. Calders and B. Goethals. Minimal k-free representations of frequent sets. In *Proceedings of the European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (PKDD'03)*, volume 2838 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 71–82, Cavtat-Dubrovnik, Croatia, September 2003. Springer-Verlag.
- [CGC10] H. Carrao, P. Gonsalves, and M. Caetano. A nonlinear harmonic model for fitting satellite image time series : Analysis and prediction of land cover dynamics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(4) :1919–1930, April 2010.
- [CJN+04] P. Coppin, I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, and E. Lambin. Digital change detection methods in ecosystem monitoring : a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9) :1565–1596, May 2004.
- [CMC05a] Huiping Cao, Nikos Mamoulis, and David W. Cheung. Mining frequent spatio-temporal sequential patterns. In *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM '05)*, pages 82–89, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [CMC05b] Huiping Cao, Nikos Mamoulis, and David W. Cheung. Mining frequent spatio-temporal sequential patterns. In *ICDM*, pages 82–89, 2005.
- [CMC07] Huiping Cao, Nikos Mamoulis, and David W. Cheung. Discovery of Periodic Patterns in Spatiotemporal Sequences. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 19(4) :453–467, 2007.
- [Con70] H. R. Condit. The spectral reflectance of american soils. *Photogrammetric Engineering*, 36(9) :955–966, 1970.
- [CP96] S.R. Cloude and E. Pottier. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2) :498–518, March 1996.
- [CP97] S.R. Cloude and E. Pottier. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1) :68–78, January 1997.
- [Cra84] P.F. Crapper. An estimate of the number of boundary cells in a mapped landscape coded to grid cells. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50 :1497–1503, 1984.
- [CRB05] T. Calders, C. Rigotti, and J.-F. Boulicaut. A survey on condensed representation for frequent sets. In J.-F. Boulicaut, L.D. Raedt, and H. Mannila, editors, *Proceedings of Constraint-Based Mining and Inductive Databases 2004*,

- volume 3848 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 64–80. Springer-Verlag, 2005.
- [Cre93] Noel A. C. Cressie. *Statistics for Spatial Data (Wiley Series in Probability and Statistics)*. Wiley-Interscience, rev sub edition, January 1993.
- [CS77] D. Comer and .R Sethi. The complexity of trie index construction. *J. ACM*, 24(3) :428–440, 1977.
- [CS09] Bruno Crémilleux and Arnaud Soulet. Discovering knowledge from local patterns with global constraints. In *From Local Patterns to Global Models (LeGo-09), ECMLPKDD’09 Workshop, Bled, Slovenia, 7 September 2009*, 2009.
- [CSRS06] Mete Celik, Shashi Shekhar, James P. Rogers, and James A. Shine. Sustained emerging spatio-temporal co-occurrence pattern mining : A summary of results. In *ICTAI*, pages 106–115, 2006.
- [CSRS08] Mete Celik, Shashi Shekhar, James P. Rogers, and James A. Shine. Mixed-drove spatiotemporal co-occurrence pattern mining. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 20(10) :1322–1335, 2008.
- [DC02] N. Durand and B. Crémilleux. ECCLAT : a New Approach of Clusters Discovery in Categorical Data. In *In the 22nd Int. Conf. on Knowledge Based Systems and Applied Artificial Intelligence (ES’02)*, pages 177–190, Cambridge, UK, 2002. Springer.
- [DDP⁺03] M. Datcu, H. Daschiel, A. Pelizzari, A. G. M. Quartulli, A. Colapicchioni, M. Pastori, K. Seidel, P. Marchetti, and S. D’Elia. Information mining in remote sensing image archives : System concepts. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 :2923–2936, 2003.
- [Del09] Deliverable of the EFIDIR project [?]. SPATPAM : a SPAtio-TemPorAl Mining tool. online, July 2009. <http://www.efidir.fr>.
- [DGM97] G. Das, D. Gunopulos, and H. Mannila. Finding similar time series. In J. Komorowski and J. Zytkow, editors, *Principles of Data Mining and Knowledge Discovery, Proc. First European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (PKDD’97)*, volume 1263 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 88–100. Springer Berlin / Heidelberg, 1997.
- [dJPvdM06] S. M. de Jong, E. J. Pebesma, and F. D. van der Meer. Spatial variability, mapping methods, image analysis and pixels. In S. M. de Jong and F. D. van der Meer, editors, *Remote Sensing Image Analysis : Including the Spatial Domain*, chapter 2. Springer, The Netherlands, 2006.
- [dJvdM06] S. M. de Jong and F. D. van der Meer, editors. *Remote Sensing Image Analysis : Including the Spatial Domain*. Springer, The Netherlands, 2006.
- [dJvdMC06] S. M. de Jong, F. D. van der Meer, and J. G. P. W. Clevers. Basics of remote sensing. In S. M. de Jong and F. D. van der Meer, editors, *Remote Sensing Image Analysis : Including the Spatial Domain*, chapter 1. Springer, The Netherlands, 2006.

- [DLB59] R. De La Briandais. File searching using variable length keys. In *Proc. of the Western Joint Computer Conference*, pages 295–298, New York, 1959.
- [DLM⁺98] G Das, K. Lin, H. Mannila, G Renganathan, and P. Smyth. Rule discovery from time series. In *Proc. of the 4th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'98)*, pages 16–22. ACM Press, 1998.
- [DP07] G. Dong and J. Pei, editors. *Sequence Data Mining*, volume 33 of *Advances in Database Systems*. Springer, 2007.
- [DSW98] M. Datcu, K. Seidel, and M. Walessa. Spatial information retrieval from remote-sensing images. i. information theoretical perspectives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 :1431–1445, 1998.
- [DZW99] G. Dong, X. Zhang, and L. Wong. CAEP : Classification by Aggregating Emerging Patterns. In S. Arikawa and K. Furukawa, editors, *Discovery Science*, volume 1721 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 30–42. Springer, 1999.
- [EFKS98] Martin Ester, Alexander Frommelt, Hans-Peter Kriegel, and Jörg Sander. Algorithms for characterization and trend detection in spatial databases. In *Proceedings of the 4th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'98), New York, USA*, pages 44–50, 1998.
- [EG01] W. J. Ewens and G. R. Grant, editors. *Statistical methods in bioinformatics : An introduction*. Springer-Verlag, 2001.
- [EHS63] Jr. Edward H. Sussenguth. Use of tree structures for processing files. *Commun. ACM*, 6(5) :272–279, 1963.
- [EKS97] Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, and Jörg Sander. Spatial data mining : A database approach. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Advances in Spatial Databases (SSD'97), Berlin, Germany*, pages 47–66, London, UK, 1997. Springer-Verlag.
- [EK SX96] Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jorg Sander, and Xiaowei Xu. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In Evangelos Simoudis, Jiawei Han, and Usama Fayyad, editors, *Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 226–231, Portland, Oregon, 1996. AAAI Press.
- [ENV] <http://envisat.esa.int/>, ESA Missions - ENVISAT, online.
- [ERS] <http://earth.esa.int/ers/>, ESA Missions - ERS, online.
- [ES93] M.J. Egenhofer and J. Sharma. Topological relations between regions in R² and Z². In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Advances in Spatial Databases (SSD'93), Singapore*, volume 692 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 316–331. Springer-Verlag, 1993.
- [F05] J. Fürnkranz. From local to global patterns : Evaluation issues in rule learning algorithms. In *Local Pattern Detection, International Seminar, Dagstuhl*

- Castle, Germany, April 12-16, 2004, *Revised Selected Papers*, volume 3539 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 20–38. Springer, 2005.
- [FG01] U.M. Fayyad and G.G. Grinstein. Introduction. In *Information Visualization in Data Mining and Knowledge Discovery*, pages 1–17. Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, USA, 2001.
- [Fis97] P. Fisher. The pixel : A snare and a delusion. *International Journal of Remote Sensing*, 18 :679–685, 1997.
- [FLKI05] Peter Fisher, Patrick Laube, Marc Kreveld, and Stephan Imfeld. Finding REMO - Detecting Relative Motion Patterns in Geospatial Lifelines. In *Developments in Spatial Data Handling*, pages 201–215. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [Foo97] G.M. Foody. Fully fuzzy supervised classification of land cover from remotely sensed imagery with an artificial neural network. *Neural Computing and Applications*, 5 :238–247, 1997.
- [Foo99] G.M. Foody. The Continuum of Classification Fuzziness in Thematic Mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(4) :443–451, 1999.
- [FPSM91] W.J. Frawley, G. Piatetsky-Shapiro, and C.J. Matheus. Knowledge discovery in databases : an overview. In G. Piatetsky-Shapiro and W.J. Frawley, editors, *Knowledge in Discovery in Databases*, pages 1–27. Menlo Park : AAAI Press, 1991.
- [FPSS96a] U. M. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, and P. Smyth. Knowledge Discovery and Data Mining : Towards a Unifying Framework. In *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining KDD*, pages 82–88, 1996.
- [FPSS96b] U.M. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, and P. Smyth. From data mining to knowledge discovery : An overview. In U.M. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, P. Smyth, and R. Ulthurusamy, editors, *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 1–34. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1996.
- [Fre] French national research (ANR) project. Extraction and Fusion of Information for measuring ground displacements with Radar Imagery (EFIDIR) project. online. <http://www.efidir.fr>.
- [Fre60] E. Fredkin. Trie memory. *Commun. ACM*, 3(9), 1960.
- [FSFG⁺10] Frédéric Flouvat, Nazha Selmaoui-Folcher, Dominique Gay, Isabelle Rouet, and Chloé Grison. Constrained colocation mining : application to soil erosion characterization. In *SAC*, 2010.
- [GCB97] M. Guérif, D. Courault, and N. Brisson. Assimilation des données de télédétection dans les modèles de fonctionnement des cultures. In *Actes de l'École - Chercheurs INRA en bioclimatologie, Le Croisic, 1996*, volume 2, pages 169–191, Le Croisic, France, March 1997.

- [GD07] L. Gueguen and M. Datcu. Image time-series data mining based on the information-bottleneck principle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4) :827–838, April 2007.
- [GD08] L. Gueguen and M. Datcu. A similarity metric for retrieval of compressed objects : Application for mining satellite image time series. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 20 :562–575, April 2008.
- [GHP⁺03] G. Gianella, J. Han, J. Pei, X. Yan, and P. Yu. Mining Frequent Patterns in Data Streams at Multiple Time Granularities. In K. Sivakumar H. Kargupta, A. Joshi and Y. Yesha, editors, *Next Generation Data Mining Chapter 3*, 2003.
- [GKK⁺98] R. L. Grossman, C. Kamath, P. Kegelmeyer, V. Kumar, and R. Namburu, editors. *Data Mining for Scientific and Engineering Applications*. Kluwer Academic, The Netherlands, 1998.
- [GKS07] J. Gudmundsson, M. Kreveld, and B. Speckmann. Efficient Detection of Patterns in 2D Trajectories of Moving Points. *Geoinformatica*, 11(2) :195–215, 2007.
- [GMC08] L. Gallucio, O. Michel, and P. Comon. Unsupervised clustering on multi-components datasets : Applications on images and astrophysics data. In *16th European Signal Processing Conference EUSIPCO-2008*, pages 25–29, Lausanne, Switzerland, August 2008.
- [GNPP07] Fosca Giannotti, Mirco Nanni, Fabio Pinelli, and Dino Pedreschi. Trajectory pattern mining. In Pavel Berkhin, Rich Caruana, and Xindong Wu, editors, *Proceedings of the 13th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Jose, California, USA, August 12-15, 2007*, pages 330–339. ACM, 2007.
- [Goe05] B. Goethals. Frequent set mining. In *The Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, chapter 17, pages 377–397. Springer-Verlag, 2005.
- [GP08] Fosca Giannotti and Dino Pedreschi, editors. *Mobility, Data Mining and Privacy - Geographic Knowledge Discovery*. Springer, 2008.
- [Gri96] Silvio Griguolo. Classification on Sets of Remotely-Sensed Images : a Vegetation Monitoring Model. In E. Binaghi, P.A. Brivio, and A. Rampini, editors, *Soft Computing in Remote Sensing Data Analysis*, pages 235–244. World Scientific, Singapore, 1996.
- [GRS99] M. Garofalakis, R. Rastogi, and K. Shim. SPIRIT : Sequential Pattern Mining with Regular Expression Constraints. In *Proc. of the 25th International Conference on Very Large Databases (VLDB'99)*, pages 223–234, Edinburgh, United Kingdom, September 1999.
- [Gue07] L. Gueguen. *Extraction d'information et compression conjointes des séries temporelles d'images satellitaires*. PhD thesis, Télécom Paris, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, Octobre 2007.

- [GvKS04] Joachim Gudmundsson, Marc J. van Kreveld, and Bettina Speckmann. Efficient detection of motion patterns in spatio-temporal data sets. In Dieter Pfoser, Isabel F. Cruz, and Marc Ronthaler, editors, *Proceedings of the 12th ACM International Workshop on Geographic Information Systems, ACM-GIS 2004, November 12-13, 2004, Washington, DC, USA*, pages 250–257. ACM, 2004.
- [GW05] P. Gañarski and C. Wemmert. Collaborative multi-strategy classification : application to per-pixel analysis of images. In *Proc. of the 6th International Workshop on Multimedia Data Mining : mining integrated media and complex data*, pages 15–22, 2005.
- [H05] P. Héas. *Apprentissage Bayésien de Structures Spatio-Temporelle : application à la fouille visuelle de séries temporelles d’images de satellites*. PhD thesis, École Nationale Supérieure de l’Aéronautique et de l’Espace, France, Avril 2005.
- [Han98] J. D. Hand. Data mining : Statistics and more? *The American Statistician*, 52(2) :112–118, 1998.
- [Han99] J. Han. Data Mining. In J. Urban and P. Dasgupta, editors, *Encyclopedia of Distributed Computing*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Han02] D. Hand. Pattern Detection and Discovery. In D. Hand, N. Adams, and R. Bolton, editors, *Pattern Detection and Discovery*, volume 2447 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 161–173. Springer Berlin / Heidelberg, 2002.
- [HC06] G.J. Hay and G. Castilla. Object-based image analysis : Strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT). In *Proceedings of the 1st International Symposium on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Salzburg University, Austria, July 4-5, 2006*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS), 2006.
- [HCXY07] J. Han, H. Cheng, D. Xin, and X. Yan. Frequent pattern mining : current status and future directions. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 15(1) :55–86, 2007.
- [HD05] P. Héas and M. Datcu. Modeling trajectory of dynamic clusters in image time-series for spatio-temporal reasoning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(7) :1635–1647, 2005.
- [HG02] J. Hipp and U. Güntzer. Is pushing constraints deeply into the mining algorithms really what we want? : an alternative approach for association rule mining. *ACM SIGKDD Explorations*, 4(1) :50–55, 2002.
- [HJ87] A. R. Huete and R. D. Jackson. The Suitability of Spectral Indices for Evaluating Vegetation Characteristics on Arid Rangelands. *Remote Sensing of Environment*, 23 :213–232, 1987.

- [HK00] J. Han and M. Kamber, editors. *Data Mining : Concepts and Techniques*. The Morgan Kaufmann Series in Data Management. Morgan Kaufmann Publishers, first edition, 2000.
- [HK01] R. Honda and O. Konishi. Temporal rule discovery for time-series satellite images and integration with RDB. In *Proceedings of the 5th European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery (PKDD '01)*, pages 204–215, London, UK, 2001. Springer-Verlag.
- [HK06] Jiawei Han and Micheline Kamber. *Data Mining, Second Edition : Concepts and Techniques*. Morgan Kaufmann, January 2006.
- [HKKM98] E. Han, G. Karypis, V. Kumar, and B. Mobasher. Hypergraph based clustering in high dimensional data sets : A summary of results. *Bulletin of the Technical Committee on Data Engineering*, 21(1), 1998.
- [HL98] F. M. Henderson and A. J. Lewis. Introduction - Chapter 1. In F. M. Henderson and A. J. Lewis, editors, *Principles and Applications of Imaging Radar*, volume 2 of *Manual of Remote Sensing*, pages 1–6. John Wiley and Sons, New York, USA, third edition, 1998.
- [HMJ00] T. Hornstra, H.G. Maas, and S.M. de Jong. Classification of spectroscopical imagery by combining spectral and spatial information : the SSC method. In *Proceedings 19th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, pages 550–558, Amsterdam, The Netherlands, July 2000.
- [HMS01] D. J. Hand, H. Mannila, and P. Smyth. *Principles of Data Mining*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2001.
- [HPX06] Yan Huang, Jian Pei, and Hui Xiong. Mining co-location patterns with rare events from spatial data sets. *GeoInformatica*, 10(3) :239–260, 2006.
- [HPY00] J. Han, J. Pei, and Y. Yin. Mining frequent patterns without candidate generation. In *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, volume 29 of *SIGMOD Rec.*, pages 1–12, Dallas, Texas, USA, 2000. ACM.
- [HSX04] Yan Huang, Shashi Shekhar, and Hui Xiong. Discovering colocation patterns from spatial data sets : A general approach. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 16(12) :1472–1485, 2004.
- [HWKK02] R. Honda, Shuai Wang, Tokio Kikuchi, and Osamu Konishi. Mining of moving objects from time-series images and its application to satellite weather imagery. *J. Intell. Inf. Syst.*, 19 :79–93, July 2002.
- [HZZ08] Yan Huang, Liqin Zhang, and Pusheng Zhang. A framework for mining sequential patterns from spatio-temporal event data sets. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 20(4) :433–448, April 2008.
- [IFY+03] J. Inglada, J.-C. Favard, H. Yesou, S. Clandillon, and C. Bestault. Lava flow mapping during the Nyiragongo January, 2002 eruption over the city of

- Goma (D.R. Congo) in the frame of the international charter space and major disasters. In *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03)*, volume 3, pages 1540–1542, July 2003.
- [IM96] Tomasz Imielinski and Heikki Mannila. A database perspective on knowledge discovery. *Commun. ACM*, 39(11) :58–64, 1996.
- [IM07] J. Inglada and G. Mercier. A new statistical similarity measure for change detection in multitemporal SAR images and its extension to multiscale change analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5) :1432–1446, May 2007.
- [IWM00] Akihiro Inokuchi, Takashi Washio, and Hiroshi Motoda. An apriori-based algorithm for mining frequent substructures from graph data. In *PKDD*, pages 13–23, 2000.
- [J. 00] J. Han and J. Pei and B. Mortazavi-Asl and Q. Chen and U. Dayal and M. Hsu. FreeSpan : frequent pattern-projected sequential pattern mining. In *Proceedings of the 6th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Boston, USA, 2000.
- [Jeu02] B. Jeudy. *Optimisation des requêtes inductives : Application à l'extraction sous contraintes de règles d'association*. PhD thesis, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France, Décembre 2002.
- [JHM01] S.M. de Jong, T. Hornstra, and H.G. Maas. An integrated spatial and spectral approach to the classification of mediterranean land cover types : the SSC method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(2) :176 – 183, 2001.
- [JK94] N.L. Johnson and S. Kotz. *Distribution in statistics : Continuous univariate distributions, Vol. 1 and 2*. John Wiley and Sons, New York, 1994.
- [JLM⁺11] A. Julea, F. Ledo, N. Méger, E. Trouvé, P. Bolon, C. Rigotti, R. Fallourd, J.M. Nicolas, G. Vasile, M. Gay, O. Harant, L. Ferro-Famil, and F. Lodge. Pol-SAR RADARSAT-2 Satellite Image Time Series Mining over the Chamonix Mont-Blanc Test Site. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2011)*, Vancouver, Canada, 2011. accepted.
- [JMB08] A. Julea, N. Méger, and P. Bolon. On mining pixel based evolution classes in satellite image time series. In *Proc. of the 5th Conference on Image Information Mining : pursuing automation of geospatial intelligence for environment and security (ESA-EUSC 2008)*, ESRIN - Frascati, Italy, March 2008.
- [JMB⁺11] A. Julea, N. Méger, P. Bolon, C. Rigotti, M-P. Doin, C. Lasserre, E. Trouvé, and V. Lăzărescu. Unsupervised Spatiotemporal Mining of Satellite Image Time Series Using Grouped Frequent Sequential Patterns. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4) :1417–1430, 2011.

- [JMBL11] A. Julea, N. Méger, Ph. Bolon, and V. Lăzărescu. Spatiotemporal mining of evolutions in Satellite Image Time Series. *Scientific Bulletin of University Politehnica of Bucharest, Series C : Electrical Engineering and Computer Science*, 2011. submitted.
- [JMR⁺10] A. Julea, N. Méger, C. Rigotti, M. P. Doin, C. Lasserre, E. Trouvé, P. Bolon, and V. Lăzărescu. Extraction of frequent grouped sequential patterns from satellite image time series. In *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2010)*, volume 5, pages 3434–3437, Honolulu, Hawaii, USA, 2010.
- [JMR⁺11] A. Julea, N. Méger, C. Rigotti, E. Trouvé, P. Bolon, and V. Lăzărescu. Mining Pixels Evolutions in Satellite Image Time Series for Agricultural Monitoring. In *Proceedings of the 11th Industrial Conference on Data Mining (ICDM 2011)*, New York, USA, 2011. accepted.
- [JMT06a] A. Julea, N. Méger, and E. Trouvé. On mining METEOSAT and ERS multi-temporal images. In *Proc. of the 4th Conference on Image Information Mining for Security and Intelligence (ESA-EUSC 2006)*, Madrid, Spain, November 2006.
- [JMT06b] A. Julea, N. Méger, and E. Trouvé. Sequential patterns extraction in multi-temporal satellite images. In *10th European Conf. on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (PKDD'06), Practical Data Mining Workshop : Applications, Experiences and Challenges*, pages 94–97, Berlin, Germany, September 2006.
- [JMT⁺10] A. Julea, N. Méger, E. Trouvé, P. Bolon, C. Rigotti, R. Fallourd, J.M. Nicolas, G. Vasile, M. Gay, O. Harant, and L. Ferro-Famil. Spatio-temporal mining of PolSAR satellite image time series. In *ESA Living Planet Symposium*, Bergen, Norway, 2010.
- [JMTB08] A. Julea, N. Méger, E. Trouvé, and P. Bolon. On extracting evolutions from satellite image time series. In *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2008)*, volume 5, pages 228–231, Boston, MA, USA, 2008.
- [Joh01] W.L. Johnston. Model visualization. In *Information Visualization in Data Mining and Knowledge Discovery*, pages 223–227. Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, USA, 2001.
- [JPV⁺06] A. Julea, I. Petillot, G. Vasile, E. Trouvé, V. Buzuloiu, and D. Hășegan. Slant Range Rectification Of Georeferenced Information For SAR Data Analysis In Mountainous Regions. In *Proceedings of the 1st International Summer School on Optoelectronic Techniques for Environmental Monitoring and Risk Assessment*, pages 253–258, Baia Mare, Romania, 2006.
- [Jul05] Julea, A. Transformation et simulation d'images en géométrie Radar à Synthèse d'Ouverture, 2005. projet fin d'études Universitatea Politehnica Bucuresti - Université de Savoie.

- [Jul07] A. Julea. Sequential patterns in satellite imagery. Master's thesis, Universitatea Politehnica Bucuresti, 2007.
- [Jul08] Andreea Julea. Extraction des évolutions à partir de séries temporelles d'images satellitaires, Octobre 2008. Rapport LISTIC no.07-08.
- [KBFM09] M.-T. Kechadi, M. Bertolotto, F. Ferrucci, and S. Di Martino. Mining Spatio-Temporal Datasets : Relevance, Challenges and Current Research Directions. In Julio Ponce and Adem Karahoca, editors, *Data Mining and Knowledge Discovery in Real Life Applications*, pages 215–228. InTech Education and Publishing, Vienna, Austria, January 2009.
- [KCFS09] Arno Knobbe, Bruno Crémilleux, Johannes Furnkranz, and Martin Scholz. From local patterns to global models : The lego approach to data mining. In *From Local Patterns to Global Models (LeGo-09), ECMLPKDD'09 Workshop, Bled, Slovenia, 7 September 2009*, 2009.
- [KDNS94] T. Kanungo, B. Dom, W. Niblack, and D. Steele. A Fast Algorithm for MDL-Based Multiband Image Segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, June 21-23, 1994*, pages 609–616, 1994.
- [KG02] M. Kryszkiewicz and M. Gajek. Concise representation of frequent patterns based on generalized disjunction-free generators. In *Proceedings of the Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD'02)*, volume 2336 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 159–171, Taipei, Taiwan, 2002. Springer-Verlag.
- [KG07] A. Ketterlin and P. Gançarski. Sequence similarity and multi-date image segmentation. In *4th Intl Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images*, Leuven, Belgique, July 2007.
- [KH95] Krzysztof Koperski and Jiawei Han. Discovery of spatial association rules in geographic information databases. In M. J. Egenhofer and J. R. Herring, editors, *Proc. 4th Int. Symp. Advances in Spatial Databases, SSD*, volume 951, pages 47–66. Springer-Verlag, 6–9 1995.
- [KHA98] Krzysztof Koperski, Jiawei Han, and Junas Adhikary. Mining knowledge in geographical data. *Communications of the ACM*, 26, 1998.
- [KL51] S. Kullback and R. A. Leibler. On information and sufficiency. *Annals of Mathematical Statistics*, 22(1) :79–86, 1951.
- [Kod98] Yves Kodratoff. Techniques et outils de l'extraction de connaissances à partir des données. *Signaux*, 92 :38–43, March 1998.
- [Kon05] A. Konar. *Computational Intelligence : Principles, Techniques and Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2005.
- [KPWD03] H.-C. Kum, J. Pei, W. Wang, and D. Duncan. ApproxMAP : Approximate Mining of Consensus Sequential Patterns. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Data Mining*, San Francisco, CA, USA, 2003.

- [KS97] E. J. Keogh and P. Smyth. A probabilistic approach to fast pattern matching in time series databases. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'97)*, pages 24–30. ACM Press, 1997.
- [KSH01] T. Kohonen, M. R. Schroeder, and T. S. Huang, editors. *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag New York, Inc., third edition, 2001.
- [KT03] I. Kopanakis and B. Theodoulidis. Visual data mining modeling techniques for the visualization of mining outcomes. *Journal of Visual Languages and Computing*, 14(6) :543–589, December 2003. Special Issue on Visual Data Mining.
- [LB02] F.-X. Le Dimet and J. Blum. Assimilation de données pour les fluides géophysiques. *MATAPLI, Bull. SMAI*, 67 :35–55, January 2002.
- [LBL03] C. Lauvernet, F. Baret, and F.X. Le Dimet. Assimilating high temporal frequency SPOT data to describe canopy functioning : the ADAM project. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2003)*, volume 5, pages 3184–3186, Toulouse, France, July 2003.
- [LC01] C. Largouët and M.-O. Cordier. Improving the landcover classification using domain knowledge. *AI Communications*, 14(1) :35–43, 2001.
- [LHM98] B. Liu, W. Hsu, and Y. Ma. Integrating Classification and Association Rule Mining. In *Proceedings of the 4th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 80–86, 1998.
- [LHP01] W. Li, J. Han, and J. Pei. CMAR : Accurate and Efficient Classification Based on Multiple Class-Association Rules. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Data Mining*, pages 369–376, 2001.
- [LK00] T.M. Lillesand and R.W. Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons, New York, fourth edition, 2000.
- [LKE⁺06] R. S. Lunetta, J. F. Knight, J. Ediriwickrema, J. G. Lyon, and L. D. Worthy. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 105(2) :142–154, 2006.
- [LL01] L. Li and M.K.H. Leung. Robust change detection by fusing intensity and texture differences. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'01)*, 2001.
- [LL03] M. Lin and S. Lee. Improving the Efficiency of Interactive Sequential Pattern Mining by Incremental Pattern Discovery. In *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Big Island, USA, 2003.
- [LM09] C. Le Men. *Segmentation spatio-temporelle d'une séquence temporelle d'images satellitaires à haute résolution*. PhD thesis, Télécom ParisTech, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France, September 2009.

- [LMBM04] D. Lu, P. Mausel, E. Brondizio, and E. Moran. Change detection techniques. *Intl. J. of Remote Sensing*, 25(12) :2365–2407, June 2004.
- [LMJM⁺08] C. Le Men, A. Julea, N. Méger, M. Datcu, P. Bolon, and H. Maître. Radiometric evolution classification in high resolution satellite image time series (SITS). In *Proc. of the 5th Conference on Image Information Mining : pursuing automation of geospatial intelligence for environment and security (ESA-EUSC 2008)*, ESRIN - Frascati, Italy, March 2008.
- [LMMD08] C. Le Men, H. Maître, and M. Datcu. Minimum description length applied to the spatio-temporal segmentation of high resolution satellite image time series. *Telecom Technical Report*, May 2008.
- [LMR04] M. Leleu, N. Méger, and C. Rigotti. Extraction de motifs séquentiels fréquents sous contraintes dans des données contenant des répétitions. *Revue Ingénierie des Systèmes d'Information (ISI)*, 9(1) :133–159, 2004.
- [LMW00] B. Liu, Y. Ma, and C. Wong. Improving an Association Rule Based Classifier. In D. Zighed, J. Komorowski, and J. Zytkow, editors, *Proceedings of the 4th European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, volume 1910 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 293–317. Springer Berlin / Heidelberg, 2000.
- [LRBE03] M. Leleu, C. Rigotti, J-F. Boulicaut, and G. Euvrard. Constrained-based mining of sequential patterns over datasets with consecutive repetitions. In *Proc.2003 Int. Conf. on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery in Databases (PKDD'03)*, pages 303–314, Cavtat-Dubrovnik, Croatia, September 2003. Springer-Verlag LNCS 2838.
- [LS84] Finkelstein L. and Leaning M. S. A review of the fundamental concepts of measurement. *Measurement*, 2(1) :22–34, 1984.
- [LS06] Srivatsan Laxman and P. S. Sastry. A survey of temporal data mining. *SADHANA, Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 31 :173–198, April 2006.
- [LSTF09] P. Lohmann, U. Soergel, M. Tavakkoli, and D. Farghaly. Multi-temporal Classification for Crop Discrimination using TerraSAR-X Spotlight images. In *Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, 2009.
- [LSU05] Srivatsan Laxman, P. S. Sastry, and K. P. Unnikrishnan. Discovering Frequent Episodes and Learning Hidden Markov Models : A Formal Connection. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 17(11) :1505–1517, November 2005.
- [M04] N. Méger. *Recherche automatique des fenêtres temporelles optimales des motifs séquentiels*. PhD thesis, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France, Décembre 2004.
- [Ma1] H. Maître. *Le traitement des Images de Radar à Synthèse d'Ouverture*. Hermès Science Publications, Paris, 2001.

- [Mac02] D. J. C. Mackay. *Information Theory, Inference & Learning Algorithms*. Cambridge University Press, June 2002.
- [Man00] H. Mannila. Theoretical Frameworks for Data Mining. *ACM SIGKDD Explorations*, 1(2) :30 – 32, 2000.
- [MAPD00] B. Mortazavi-Asl, H. Pinto, and U. Dayal. PrefixSpan : mining sequential patterns efficiently by prefix-projected pattern growth. *Proceedings 17th International Conference on Data Engineering*, pages 215–224, 2000.
- [MBS05] K. Morik, J.-F. Boulicaut, and A. Siebes, editors. *Local Pattern Detection*, volume 3539 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2005.
- [MCK⁺04] Nikos Mamoulis, Huiping Cao, George Kollios, Marios Hadjieleftheriou, Yufei Tao, and David W. Cheung. Mining, indexing, and querying historical spatiotemporal data. *Proceedings of the 2004 ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining - KDD '04*, page 236, 2004.
- [MCP98a] F. Masegla, F. Cathala, and P. Poncelet. The PSP approach for mining sequential patterns. In *Proc. of the 2nd European Symposium on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery in Databases (PKDD'98)*, volume 1510, pages 176–184, Nantes, France, September 1998. LNAI, Springer Verlag.
- [MCP98b] Florent Masegla, Fabienne Cathala, and Pascal Poncelet. The psp approach for mining sequential patterns. In *PKDD*, pages 176–184, 1998.
- [MH01] H.J. Miller and J. Han. Geographic data mining and knowledge discovery : an overview. In H.J. Miller and J. Han, editors, *Geographic data mining and knowledge discovery*, pages 3–32. Taylor & Francis, 2001.
- [Mil08] H.J. Miller. Geographic data mining and knowledge discovery. In J. P. Wilson and A. S. Fotheringham, editors, *Handbook of Geographic Information Science*, pages 352–366. Blackwell Publishing Ltd, 2008.
- [Mit82] T.M. Mitchell. Generalization as search. *Artificial Intelligence*, 18(2) :203–226, 1982.
- [MJL⁺11] N. Méger, R. Jolivet, C. Lasserre, F. Lodge, E. Trouvé, M.-P. Doin, S. Guillaso, A. Julea, P. Bolon, and C. Rigotti. Spatio-Temporal Mining of ENVISAT SAR Interferogram Time Series over the Haiyuan Fault in China. In *Proceeding of the 6th International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*, Trento, Italy, 2011. accepted.
- [MM00] H. Mannila and C. Meek. Global Partial Orders from Sequential Data. In *Proceedings of the 6th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'00)*, pages 161–168, 2000.
- [MPT03] F. Masegla, P. Poncelet, and M Teisseire. Incremental Mining of Sequential Pattern in Large Databases. *Data and Knowledge Engineering*, 46(1) :97–121, 2003.

- [MSFF11] Loïc Mabit, Nazha Selmaoui-Folcher, and Frédéric Flouvat. Modélisation de la dynamique de phénomènes spatio-temporels par des séquences de motifs. In *EGC*, pages 455–466, 2011.
- [MSSR10] Pradeep Mohan, Shashi Shekhar, James A. Shine, and James P. Rogers. Cascading spatio-temporal pattern discovery : A summary of results. In *SDM*, pages 327–338, 2010.
- [MT96a] H. Mannila and H. Toivonen. Discovering Generalized Episodes Using Minimal Occurrences. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery in Databases and Data Mining (KDD'96)*, pages 146–151. ACM Press, 1996.
- [MT96b] H. Mannila and H. Toivonen. Multiple uses of frequent sets and condensed representations. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96)*, pages 189–194, Portland, USA, 1996. AAAI Press.
- [MTP05] F. Masegla, M. Teisseire, and P. Poncelet. Sequential Pattern Mining : A Survey on Issues and Approaches. In J. Wang, editor, *Encyclopedia of Data Warehousing and Mining*, volume 33 of *Advances in Database Systems*. Information Science Publishing, 2005.
- [MTV97] H. Mannila, H. Toivonen, and A. Inkeri Verkamo. Discovery of frequent episodes in event sequences. *Data Min. Knowl. Discov.*, 1(3) :259–289, 1997.
- [MW03] H. J. Miller and E. A. Wentz. Representation and spatial analysis in geographic information systems. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(3) :574–594, 2003.
- [Mye70] V. I. Myers. Soil, water and plant relations. In J. R. Shay, editor, *Remote Sensing with special reference to agriculture and forestry*, pages 253–297. National Academy of Sciences, Washington D. C., 1970.
- [NGSR96] E. Nezry, G. Genovese, G. Solaas, and S. Rémondière. ERS - Based early estimation of crop areas in Europe during winter 1994-95. In Guyenne T.-D., editor, *ERS Application, Proceedings of the Second International Workshop held 6-8 December 1995 in London*, volume 383 of *ESA Special Publication*, page 13, 1996.
- [NH94] R. T. Ng and J. Han. Efficient and effective clustering methods for spatial data mining. In Jorgeesh Bocca, Matthias Jarke, and Carlo Zaniolo, editors, *20th International Conference on Very Large Data Bases, September 12–15, 1994, Santiago, Chile proceedings*, pages 144–155, Los Altos, CA, USA, 1994. Morgan Kaufmann Publishers.
- [NLH98] R. Ng, L. Lakshmanan, and J. Han. Exploratory Mining and Pruning Optimizations of Constrained Association Rules. In *Proceedings of the International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'98)*, pages 13–24. ACM Press, 1998.

- [NP06] M. Nanni and D. Pedreschi. Time-focused clustering of trajectories of moving objects. *J. Intell. Inf. Syst.*, 27(3) :267–289, November 2006.
- [Oat99] T Oates. Identifying Distinctive Subsequences in Multivariate Time Series by Clustering. In *Proceedings of the 5th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'99)*, pages 322–326. ACM Press, 1999.
- [OBV03] F. Oro, F. Baret, and R. Vintila. Evaluating of SPOT/HRV data over temporal series acquired during the ADAM project. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2003)*, volume 4, pages 2209–2211, Toulouse, France, July 2003.
- [Oja92] Erkki Oja. Self-organising maps and computer vision. In H. Wechsler, editor, *Neural Networks for Perception (Human and Machine Perception)*, volume 1, pages 368–385. Academic Press, 1992.
- [Pao89] Yoh-Han Pao. *Adaptative Pattern recognition and Neural Networks*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1989.
- [PB05] R. G. Pensa and J.-F. Boulicaut. From Local Pattern Mining to Relevant Bi-cluster Characterization. In A. F. Famili, J. N. Kok, J. M. Peña, A. Siebes, and A. J. Feelders, editors, *Proceedings of the 6th International Symposium on Intelligent Data Analysis IDA*, volume 3646 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 293–304. Springer, 2005.
- [PBM01] S. K. Pal, S. Bandyopadhyay, and C. A. Murthy. Genetic classifiers for remotely sensed images : Comparison with standard methods. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13) :2545–2569, 2001.
- [PBTL98] N. Pasquier, Y. Bastide, R. Taouil, and L. Lakhal. Pruning closed itemset lattices for association rules. In *Actes Bases de Données Avancées (BDA'98)*, Hammamet, Tunisie, October 1998.
- [PBTL99] N. Pasquier, Y. Bastide, R. Taouil, and L. Lakhal. Efficient mining of association rules using closed itemset lattices. *Information Systems*, 24(1) :25–46, January 1999.
- [PD95] D.J. Peuquet and N. Duan. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9 :7–24, 1995.
- [PDR01] W. Perrizo, Q. Ding, and A. Roy. On mining satellite and other remotely sensed images. In *Proceedings of ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery*, pages 33–40, Santa Barbara, California, May 2001.
- [Pet08] I. Petillot. *Cominasion d'informations hétérogènes : intégration d'images RSO pour la surveillance des glaciers alpins*. PhD thesis, Université de Savoie, Annecy, France, Décembre 2008.

- [PGM10] François Petitjean, Pierre Gançarski, and Florent Masseglia. Extraction de motifs d'évolution dans les séries temporelles d'images satellites. In *Spatial Analysis and GEOmatics*, November 2010.
- [PGMF10] François Petitjean, Pierre Gançarski, Florent Masseglia, and Germain Forestier. Analysing satellite image time series by means of pattern mining. In Colin Fyfe et al., editor, *11th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning*, volume 6283 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 45–52. Springer, 2010.
- [PH00] J. Pei and J. Han. Can we push more constraints into frequent pattern mining? In *Proceedings of the 6th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pages 350–354, New York, NY, USA, 2000. ACM Press.
- [PH02] J. Pei and J. Han. Constrained frequent pattern mining : a pattern-growth view. *ACM SIGKDD Explorations*, 4(1) :31–39, 2002.
- [PHMA⁺04] J. Pei, J. Han, B. Mortazavi-Asl, J. Wang, H. Pinto, Q. Chen, U. Dayal, and M.-C. Hsu. Mining Sequential Patterns by Pattern-Growth : The PrefixSpan Approach. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 16(10) :1424–1440, 2004.
- [PHMAP01] J. Pei, J. Han, B. Mortazavi-Asl, and H. Pinto. PrefixSpan : Mining Sequential Patterns Efficiently by Prefix-Projected Pattern Growth. In *Proceedings of the 17th International Conference on Data Engineering (ICDE'01)*, pages 215–226, Heidelberg, Germany, 2001.
- [PHW02] J. Pei, B. Han, and W. Wang. Mining Sequential Patterns with Constraints in Large Databases. In *Proc. of the 11th International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'02)*, pages 18–25, McLean, VA, USA, November 2002. ACM Press.
- [PHW07] Jian Pei, Jiawei Han, and Wei Wang. Constraint-based Sequential Pattern Mining : the Pattern-Growth Methods. *J. Intell. Inf. Syst.*, 28(2) :133–160, 2007.
- [pol] http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/polarim/index_e.php, Tutorial : Radar Polarimetry, Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, online.
- [PR08] R.V. Platt and L. Rapoza. An evaluation of an object-oriented paradigm for land use/land cover classification. *Professional Geographer*, 60 :87–100, 2008.
- [PTB⁺10] I. Petillot, E. Trouvé, P. Bolon, A. Julea, Y. Yan, M. Gay, and J.-M. Vanpé. Radar-Coding and Geocoding Lookup Tables for the Fusion of GIS and SAR Data in Mountain Areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (GRSL)*, 7(2) :309–313, 2010.
- [PVM⁺05] N. Pettorelli, J. O. Vik, A. Mysterud, J.-M. Gaillard, C. J. Tucker, and N. C. Stenseth. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20 :503–510, 2005.

- [PVT⁺07] I. Petillot, G. Vasile, E. Trouvé, P. Bolon, M. Gay, M. Koehl, and A. Julia. Rectification radar de données géoréférencées : application à l'analyse de données dans les régions de haute montagne. In *Onzième congrès francophone des jeunes chercheurs en vision par ordinateur ORASIS*, Obernai, France, 2007.
- [PVMH02] C.-S. Perng, H. Wang, S. Ma, and J. L. Hellerstein. Discovery in multi-attribute data with user-defined constraints. *SIGKDD Explorations*, 4(1) :56–64, 2002.
- [PZOD99] S. Parthasarathy, M. Zaki, M. Ogihara, and S. Dwarkadas. Incremental and Interactive Sequence Mining. In *Proceedings of the 8th International Conference on Information and Knowledge Management*, Kansas City, USA, 1999.
- [QHH09a] Feng Qian, Q. He, and Jiangfeng He. Mining Spatial Co-location Patterns with Dynamic Neighborhood Constraint. *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, pages 238–253, 2009.
- [QHH09b] Feng Qian, Qinming He, and Jiangfeng He. Mining spread patterns of spatio-temporal co-occurrences over zones. In *ICCSA (2)*, pages 677–692, 2009.
- [Qui86] J. R. Quinlan. Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1 :81–106, 1986.
- [RAD] <http://www.radarsat2.info/about/mission.asp>, Mission RADARSAT-2, online.
- [Rae02] Luc De Raedt. A perspective on inductive databases. *SIGKDD Explorations*, 4(2) :69–77, 2002.
- [RD94] H. Rahman and G. Dedieu. SMAC : A Simplified Method for the Atmospheric Correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 16(1) :123–143, 1994.
- [RGN08] Luc De Raedt, Tias Guns, and Siegfried Nijssen. Constraint programming for itemset mining. In *KDD*, pages 204–212, 2008.
- [RHSD74] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite Symposium*, volume 1, pages 301–317, 1974.
- [Rig] Rigotti, C. DMT4SP : Data Mining Tool 4 Sequential Patterns. online. <http://liris.cnrs.fr/crigotti/dmt4sp.html>.
- [RL01] John F. Roddick and Brian G. Lees. Paradigms for spatial and spatio-temporal data mining. In H.G. Miller and J. Han, editors, *Geographic Data Mining and Knowledge*. Taylor & Francis, 2001.
- [Ron98] P. Ronkainen. *Attribute similarity and event sequence similarity in data mining*. PhD thesis, University of Helsinki, Helsinki, Finland, October 1998.
- [RPT06] C. Raïssi, P. Poncelet, and M. Teisseire. Speed : Mining maximal sequential patterns over data streams. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Systems*, pages 546–552, Prague, Czech Republic, 2006.

- [RS02] J. F. Roddick and M. Spiliopoulou. A Survey of Temporal Knowledge Discovery Paradigms and Methods. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 14(4) :750–767, 2002.
- [RvZ93] E.J.M. Rignot and J.J. van Zyl. Change detection techniques for ERS-1 SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(4) :896–906, July 1993.
- [SA95] R. Srikant and R. Agrawal. Mining Generalized Association Rules. In *Proceedings of the 21st International Conference on Very Large Data Bases (VLDB '95)*, pages 407–419, San Francisco, CA, USA, 1995. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [SA96a] R. Srikant and R. Agrawal. Mining sequential patterns : Generalizations and performance improvements. In *Proc. of the 5th International Conference on Extending Database Technology (EDBT'96)*, pages 3–17, Avignon, France, September 1996.
- [SA96b] Ramakrishnan Srikant and Rakesh Agrawal. Mining quantitative association rules in large relational tables. In H. V. Jagadish and Inderpal Singh Mumick, editors, *Proceedings of the 1996 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Montreal, Quebec, Canada, June 4-6, 1996*, pages 1–12. ACM Press, 1996.
- [SC05] A. Soulet and B. Crémilleux. Optimizing constraint-based mining by automatically relaxing constraints. In *The Fifth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'05)*, pages 777–780, Houston, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [SC09] A. Soulet and B. Crémilleux. Mining constraint-based patterns using automatic relaxation. *Intell. Data Anal.*, 13(1) :109–133, 2009.
- [Sch96] R.A. Schowengerdt. Soft classification and spatial-spectral mixing. In E. Binaghi, P.A. Brivio, , and A. Rampini, editors, *Soft Computing in Remote Sensing Data Analysis*, pages 1–6. World Scientific, Singapore, 1996.
- [Sch97] R. A. Schowengerdt, editor. *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. Academic Press, San Diego, CA, USA, second edition, 1997.
- [Sko90] M. I. Skolnik, editor. *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York, USA, second edition, 1990.
- [SLZ03] Shashi Shekhar, Chang-Tien Lu, and Pusheng Zhang. A unified approach to detecting spatial outliers. *GeoInformatica*, 7 :139–166, June 2003.
- [Sou06] A. Soulet. *Un cadre générique de découverte de motifs sous contraintes fondées sur des primitives*. PhD thesis, Université de Caen / Basse-Normandie, Caen, France, Novembre 2006.
- [SPO] <http://www.spotimage.com/web/fr/148-les-satellites-spot.php>, Les satellites SPOT, online.

- [SVA97] R. Srikant, Q. Vu, and R. Agrawal. Mining Association Rules with Item Constraints. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery in Databases and Data Mining*, pages 67–73, Newport Beach, CA, USA, August 1997. ACM Press.
- [SvLvV⁺00] L.S.M. Schouten, H.J.C. van Leeuwen, E.H. van Valkengoed, J.F. Desprats, C. King, N. Baghdadi, L. Prévot, N. Bruguier, M. Dechambre, and R. Valentin. Land use classification based on time series of micro-wave data (ERS, Radarsat). study in framework of the project ReSeDa - Assimilation of Multisensor & Multitemporal Remote Sensing Data to Monitor Soil & Vegetation Functioning, 2000.
- [TBG08] Roberto Trasarti, Francesco Bonchi, and Bart Goethals. Sequence mining automata : A new technique for mining frequent sequences under regular expressions. In *ICDM*, pages 1061–1066, 2008.
- [TG01] Ilias Tsoukatos and Dimitrios Gunopulos. Efficient mining of spatiotemporal patterns. In Christian S. Jensen, Markus Schneider, Bernhard Seeger, and Vassilis J. Tsotras, editors, *Proceedings of the 7th International Symposium, Advances in Spatial and Temporal Databases (SSTD 2001), Redondo Beach, CA, USA, July 12-15, 2001*, volume 2121 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 425–442. Springer, 2001.
- [TGR03] IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing : special issue on analysis of multitemporal remote sensing images, November 2003. Volume 41, Number 11, ISSN 0196-2892.
- [TMKD02] J.C. Tilton, G. Marchisio, K. Koperski, and M. Datcu. Image information mining utilizing hierarchical segmentation. In *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002 (IGARSS '02)*, volume 2, pages 1029–1031, June 2002.
- [Tob70] Waldo Tobler. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(2) :234–240, 1970.
- [TRS02] Alexandre Termier, Marie-Christine Rousset, and Michèle Sebag. Treefinder : a first step towards xml data mining. In *ICDM*, pages 450–457, 2002.
- [TS86] C. J. Tucker and P. J. Sellers. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11) :1395–1416, 1986.
- [TSK05a] P.-N. Tan, M. Steinbach, and V. Kumar. *Introduction to Data Mining*. Addison Wesley, 2005.
- [TSK05b] P.-N. Tan, M. Steinbach, and V. Kumar. *Introduction to Data Mining*. Addison Wesley, May 2005.
- [Tuc79] C. J. Tucker. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8 :127–150, 1979.
- [TVG⁺05] E. Trouvé, G. Vasile, M. Gay, P. Grussenmeyer, J.M. Nicolas, T. Landes, M. Koehl, J. Chanussot, and A. Julea. Combining Optical and SAR Data to

- Monitor Temperate Glaciers. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2005)*, volume IV, pages 2637–2640, Seoul, Korea, 2005.
- [TVG⁺07] E. Trouvé, G. Vasile, M. Gay, L. Bombrun, P. Grussenmeyer, T. Landes, J.-M. Nicolas, P. Bolon, I. Petillot, A. Julea, L. Valet, J. Chanussot, and M. Koehl. Combining airborne photographs and spaceborne SAR data to monitor temperate glaciers. Potentials and limits. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4) :905–923, 2007.
- [VAN07] Florian Verhein and Ghazi Al-Naymat. Fast mining of complex spatial collocation patterns using glimit. In *ICDM Workshops*, pages 679–684, 2007.
- [VnER04] A. Viña, F. R. Echavarria, and D. C. Rundquist. Satellite change detection analysis of deforestation rates and patterns along the Colombia-Ecuador border. *AMBIO : A Journal of the Human Environment*, 33 :118–125, 2004.
- [VPJ⁺06a] G. Vasile, I. Petillot, A. Julea, E. Trouvé, P. Bolon, L. Bombrun, M. Gay, T. Landes, P. Grussenmeyer, and J.M. Nicolas. High Resolution SAR Interferometry : influence of local topography in the context of glacier monitoring. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2006)*, pages 4008–4011, Denver, CO, USA, 2006.
- [VPJ⁺06b] G. Vasile, I. Petillot, A. Julea, E. Trouvé, P. Bolon, L. Bombrun, M. Gay, T. Landes, P. Grussenmeyer, and J.M. Nicolas. Simulation of SAR Images and Radar Coding of Georeferenced Information for Temperate Glacier Monitoring. In *Proceedings of the International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, volume IV, pages 175–180, Braşov, Romania, 2006.
- [WG02] C. Wemmert and P. Gañçarski. Urban thematical zones construction from remote sensing data by unsupervised classification. In *Proceedings of the 23rd Symposium on Urban Data Management*, Prague, October 2002.
- [WGK99] C. Wemmert, P. Gañçarski, and J. Korczak. Un système de classification hybride et son application à la télédétection. In *Actes des septièmes rencontres de la Société Francophone de Classification*, pages 273–280, Nancy, Septembre 1999.
- [WHL05] Junmei Wang, Wynne Hsu, and Mong-Li Lee. Mining generalized spatio-temporal patterns. In *DASFAA*, pages 649–661, 2005.
- [WHLW04] Junmei Wang, Wynne Hsu, Mong-Li Lee, and Jason Tsong-Li Wang. Flowminer : Finding flow patterns in spatio-temporal databases. In *ICTAI*, pages 14–21, 2004.
- [WJL03] K. Wang, Y. Jiang, and L. V. S. Lakshmanan. Mining unexpected rules by pushing user dynamics. In *Proceedings of the ninth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'03)*, pages 246–255, New York, NY, USA, 2003. ACM.

- [WK05] J. Wang and G. Karypis. HARMONY : Efficiently Mining the Best Rules for Classification. In *Proceedings of 5th SIAM International Conference on Data Mining*, pages 205–216, Newport Beach, USA, 2005.
- [WLC07] Lih-Chyau Wu, Tzong-Jye Liu, and Kuo-Ming Chen. A longest prefix first search tree for ip lookup. *Comput. Networks*, 51(12) :3354–3367, 2007.
- [WMSW01] J. T. L. Wang, Q. Ma, D. Shasha, and C. H. Wu. New techniques for extracting features from protein sequences. *IBM Systems Journal*, 40(2) :426–441, 2001.
- [WS97] T.A. Warner and M. Shank. An evaluation of the potential for fuzzy classification of multispectral data using artificial neural networks. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63 :1285–1294, 1997.
- [WZTS05] J. T. L. Wang, M. J. Zaki, H. T. T. Toivonen, and D. Shasha, editors. *Data Mining in Bioinformatics*. Springer, 2005.
- [Yao03] X. Yao. Research issues in spatio-temporal data mining. In *Workshop on Geospatial Visualization and Knowledge Discovery, Virginia, USA, 18-20 November, 2003*, 2003.
- [YB09] Jin Soung Yoo and Mark Bow. Finding n-most prevalent colocated event sets. In *DaWaK*, pages 415–427, 2009.
- [YHA03] X. Yan, J. Han, and R. Afshar. Clospan : Mining closed sequential patterns in large datasets. In *Proceedings of the SIAM International Conference on Data Mining (SDM'03)*, pages 71–82, San Francisco, CA, USA, May 2003.
- [YPM05] Hui Yang, Srinivasan Parthasarathy, and Sameep Mehta. A generalized framework for mining spatio-temporal patterns in scientific data. In *KDD*, pages 716–721, 2005.
- [YS06] Jin Soung Yoo and Shashi Shekhar. A joinless approach for mining spatial colocation patterns. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 18(10) :1323–1337, 2006.
- [Yua97] M. Yuan. Use of knowledge acquisition to build wildfire representation in geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 11 :723–745, December 1997.
- [ZA03] M. J. Zaki and C. C. Aggarwal. XRules : An Effective Structural Classifier for XML Data. In *Proceedings of the Ninth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'03)*, pages 316–325. ACM, 2003.
- [Zak98] M. J. Zaki. Efficient Enumeration of Frequent Sequences. In *Proceedings of the 7th International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM '98)*, pages 68–75, New York, NY, USA, 1998. ACM Press.
- [Zak00a] M.J. Zaki. Scalable algorithms for association mining. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 12(3) :372–390, 2000.

- [Zak00b] M.J. Zaki. Sequence Mining in Categorical Domains : Incorporating Constraints. In *Proc. of the 9th International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'00)*, pages 422–429, Washington, DC, USA, November 2000.
- [Zak01a] M.J. Zaki. SPADE : an efficient algorithm for mining frequent sequences. *Machine Learning Journal, Special issue on Unsupervised Learning*, 42(1/2) :31–60, Jan/Feb 2001.
- [Zak01b] Mohammed J. Zaki. SPADE : An efficient algorithm for mining frequent sequences. *Machine Learning Journal*, 42(1/2) :31–60, January/February 2001.
- [Zak02] Mohammed Javeed Zaki. Efficiently mining frequent trees in a forest. In *KDD*, pages 71–80, 2002.
- [ZDR00] X. Zhang, G. Dong, and K. Ramamohanarao. Information-Based Classification by Aggregating Emerging Patterns. In K. Leung, L.-W. Chan, and H. Meng, editors, *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2000. Data Mining, Financial Engineering and Intelligent Agents*, volume 1983 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 175–188. Springer Berlin/Heidelberg, 2000.
- [Zei99] K. Zeitouni. Data mining spatial. *Numéro spécial de la Revue internationale de géomatique*, 9(4), 1999.
- [ZMCS04] Xin Zhang, Nikos Mamoulis, David W. Cheung, and Yutao Shou. Fast mining of spatial collocations. In *KDD*, pages 384–393, 2004.
- [ZO98] M. J. Zaki and M. Ogihara. Theoretical foundations of association rules. In *Proceedings of the SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery (DMKD'98)*, pages 1–8, June 1998.

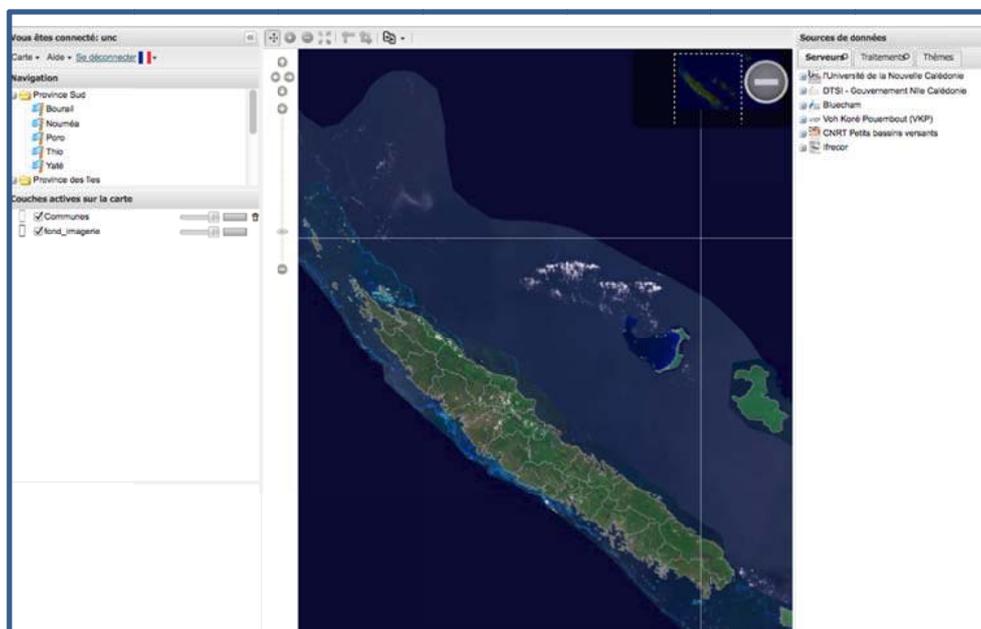
1.7 Système d'information inter-opérable

Touraivane et coll. (UNC)





Fonctionnement des petits bassins versants miniers
Programme CNRT 2010-2014
Rapport PPME-EA 3325
« Volet Informatique partie B - Système d'information inter opérable ».



Auteur : Touraivane
Avec la collaboration de Michel Allenbach, Arnaud Couturier,
Thierry Hoibian, Isabelle Rouet, Guillaume Watellez
et des stagiaires du programme :
Pierre-Eric Alloin, Antoine Guyonneau, Alexandre Motto

Sommaire

SOMMAIRE	2
PREAMBULE	2
ASPECTS CONCEPTUELS	3
INFORMATION GEOGRAPHIQUE	3
LES METADONNEES.....	4
SERIES DE DONNEES.....	4
<i>Normes de l'OGC</i>	4
<i>SensorML</i>	4
<i>O&M</i>	4
<i>SOS</i>	5
<i>Définition des éléments O&M</i>	5
<i>Service SOS</i>	5
<i>Application</i>	5
INFORMATION DOCUMENTAIRE	5
<i>Les Métadonnées et protocole d'échange</i>	6
<i>Entrepôt et moissonneur</i>	6
<i>ORI-OAI</i>	6
<i>Points-clés de ORI-OAI</i>	6
<i>Trois cas d'utilisation d'ORI-OAI</i>	7
<i>Architecture technique</i>	7
ACTIONS REALISEES	8
ESPACE DE TRAVAIL COLLABORATIF.....	9
LES DIFFERENTS ESPACES	9
INFORMATION GEOGRAPHIQUE	10
<i>Page d'accueil du geoportail</i>	11
<i>Visualisation de la zone de Poro</i>	12
<i>Accès aux attributs des données</i>	12
<i>Accès aux métadonnées</i>	13
SERIE DE DONNEES	13
INFORMATION DOCUMENTAIRE	15
PRESENTATION GLOBALE.....	16
MOTEUR DE RECHERCHE.....	16
LES PARCOURS.....	17
<i>Par auteur</i>	17
<i>Par institution</i>	17
<i>Par type de publication</i>	18
<i>Par année</i>	18
<i>Par projet CNRT</i>	18
LES RESULTATS	18
ANNEXES	19

Préambule

La finalité de ce volet était de mettre en place un outil de valorisation des données scientifiques produites dans le cadre de ce programme. Réduire la durée nécessaire pour acquérir, traiter et analyser des données de qualité connue est un but essentiel qui exige la mise en place d'un système intégré de gestion des données. Aussi, l'objectif de ce volet est de mettre en œuvre des actions visant à promouvoir et diffuser la production scientifique et technique résultant des travaux de l'ensemble de l'équipe projet.

Les actions prévues

Les résultats produits par le groupe projet seront intégrés et rendus accessibles via le centre de ressources numérique inter opérable de l'UNC, associant quatre grandes familles d'outils :

- *Un outil de communication et d'information (portail) donnant accès à un moteur de recherche.*
- *Un moteur d'indexation et de recherche sur les données scientifiques et techniques capable de rassembler par moissonnage les méta-données disponibles au niveau local, national et régional.*
- *Une base de méta-données sur les données produites par les partenaires du groupe projet.*
- *Un entrepôt de données (bases de données, bases de données géographiques, bases de données documentaires).*

Les actions réalisées

Les outils mis en place pour ce programme peuvent se résumer ainsi :

1. *Un espace de travail collaboratif (<https://confluence.univ-nc.nc>)¹*
2. *Deux plateformes techniques pour la capitalisation et la visualisation des données issues, scientifiques et techniques*
3. *Une plateforme de diffusion de données documentaires*

Aspects conceptuels

Les systèmes régionaux d'observation sont des composantes fondamentales de la gestion de l'étude de l'environnement. La constitution d'entrepôts de données dédiés à l'environnement, les outils de recherche d'informations sur un sujet donné par les individus, la mise à disposition de portails comme moyen de communication de collectivités rassemblées pour des besoins de plus en plus variés, sont quelques exemples d'un marché de l'information et de la connaissance en croissance de plus en plus forte, dont le médium de prédilection est le Web, et qui touche des pans de plus en plus variés du marché : les institutions de recherche, administrations et collectivités, petites et grandes entreprises, le grand public et le public spécialisé, etc.

Information géographique

Dans ce contexte, l'OGC (Open Geospatial Consortium) vise à rendre interopérables les systèmes d'information géographiques par l'intermédiaire d'interfaces définies dans des spécifications techniques. Les objectifs affichés de l'OGC sont les suivants :

- La promotion de l'utilisation d'applications ouvertes pour le traitement de l'information géographique sur le marché des technologies de l'information.
- La synchronisation des technologies de l'information géographique avec les standards des technologies de l'information (systèmes ouverts, applications distribuées, technologie de l'orienté objet, architectures en composants).
- La coopération entre les fournisseurs de systèmes et les utilisateurs pour le développement d'interfaces ouvertes.
- L'implication de l'ensemble de la communauté (industrie, gouvernement, milieux académiques, organismes de normalisation) dans le processus d'interopérabilité.
- La création d'une plate-forme d'échange pour promouvoir les partenariats, initiatives et projets communs de développement dans le domaine des technologies de l'information géographique.

L'interopérabilité des systèmes est supposée découler de la publication des spécifications qui donnent les détails techniques des interfaces permettant à ces systèmes de dialoguer. Par exemple, l'OGC a publié la spécification des «Simple Features », qui donne la description des entités élémentaires (points, lignes et polygones, datum, système de projection, système de coordonnées) à utiliser pour représenter l'information géographique. Ces entités constituent les briques de base pour la construction d'objets plus complexes.

Basées sur ces spécifications, un certain nombre d'initiatives commencent à voir le jour, visant à mettre à la disposition du public des catalogues pouvant être consultés sur le Web. Pour peu que ces catalogues s'appuient sur des entrepôts de données géographiques conformes à ces spécifications, l'utilisateur est capable de puiser et croiser des données provenant de sources de données hétérogènes, distantes et distribuées : les systèmes d'information géographique deviennent techniquement interopérables !

Les métadonnées

Avec l'émergence des standards d'échanges de données, il est raisonnable de penser que l'information géographique sera, dans un proche avenir, accessible de manière massive à un vaste public. Cette mise à disposition des données n'engendrera les bénéfices escomptés que si les utilisateurs potentiels sont capables d'identifier les données disponibles et de déterminer leur intérêt et leur pertinence. Les travaux sur l'interopérabilité dans le domaine de l'information géographique s'accompagnent nécessairement d'une véritable stratégie permettant d'accroître l'utilisation et la réutilisation des données géographiques existantes (catalogues) en informant au mieux de leur existence, de leur historique, de leur qualité et de leur structure (métadonnées), tout autant qu'en facilitant leur accessibilité.

Aussi, les métadonnées sont essentielles dans cette démarche car elles permettent non seulement à un utilisateur de connaître l'existence des données, mais aussi de choisir, en connaissance de cause, entre diverses données disponibles d'un ou plusieurs catalogues.

Des normes ont été mises en place afin de décrire comment créer des métadonnées. La norme « Dublin Core » est un schéma de métadonnées générique. La directive INSPIRE, qui concerne les informations géographiques, incite les Etats membres de la Communauté Européenne à mettre en place des organisations publiques chargées de mettre à jour les métadonnées.

Exemple avec INSPIRE

Cette directive décrit les éléments de métadonnées à remplir impérativement et comment les remplir. Il faut que l'on puisse identifier la ressource avec un titre (nom caractéristique), un résumé, le type de ressource (séries de données, services, ...), sa localisation (avec une URL généralement), la langue utilisée, l'encodage, etc. La directive liste des catégories thématiques.

La ressource doit être classée dans une de ces catégories. Des mots clés sont à renseigner afin d'aider lors de recherches détaillées.

La localisation de la donnée doit être connue grâce à un rectangle de délimitation géographique. Le référentiel de coordonnées décrit le système avec lequel les coordonnées sont enregistrées.

Le suivi de la ressource également est important avec les dates de création, de révision et de publication ou encore la période de temps couverte par le contenu de la ressource.

La qualité et la validité de la ressource permet de savoir quel crédit accorder à des données. Cela comprend la généalogie (historique du traitement et qualité de la série, validation, contrôle de qualité), la résolution spatiale.

Une ressource peut être accessible sous certaines conditions (accès restreint à un établissement ou une organisation, accès possible après paiement, ...). Les métadonnées décrivent donc les conditions applicables à l'accès et à l'utilisation de la ressource.

Les organisations responsables de la gestion, de la maintenance et de la diffusion de la ressource sont identifiées grâce aux métadonnées. Il est alors possible de les contacter en cas de besoin.

En quelques lignes, les métadonnées permettent de savoir de quelle ressource il s'agit et de quel sujet il est question dans cette ressource. Les métadonnées répondent aux questions :

- Quoi : de quoi on parle dans cette ressource,
- Où : où trouver la ressource,
- Où : dans le cas de ressource géographique, où se situe la donnée
- Quand : les données sont valables pour quelles périodes, quand ont-elles été créées, validées, corrigées,
- Qui : qui est l'auteur, le correcteur ; qui contacter en cas de besoin concernant la ressource ; qui y a accès et/ou qui peut y accéder (et comment).
- Comment : quelle est la qualité des données fournies.

Séries de données

Normes de l'OGC

L'OGC (Open Geospatial Consortium) est un organisme international créé en 1994 dont le but est d'établir des normes en vue de l'interopérabilité des systèmes. Parmi ces normes, SWE (Sensor Web Enablement) a pour fonction

de permettre l'enregistrement, le stockage et le partage de données provenant de capteurs¹. SWE permet également de décrire le processus utilisé pour obtenir les données. Parmi les normes SWE, on trouve : SensorML (Sensor Model Language), O&M (Observations and Measurements) et SOS (Sensor Observation Service).

SensorML

Cette norme est utilisée pour décrire les processus au sein des (systèmes de) capteurs et des observations. SensorML peut être utilisé pour décrire un large éventail de capteurs aussi bien des capteurs dynamiques que stationnaires, in-situ ou à distance.

Un document SensorML est un document XML (eXtensible Markup Language) dans lequel les entrées, les sorties, les paramètres, les méthodes et des métadonnées pertinentes concernant le capteur sont renseignés. Ainsi, il est possible de décrire le matériel utilisé, la calibration, la localisation du capteur, le phénomène qu'il mesure et la méthode de mesure.

O&M

La norme « Observations and Measurements » fournit un cadre abstrait pour l'encodage des observations² et des mesures³. Un ensemble de propriétés de base pour une observation est défini :

- L'entité géographique d'intérêt (feature of interest) : description de la zone couverte par les observations ; généralement, ça peut être un polygone ou point.
- La propriété observée (observed property) ou encore le phénomène (phenomenon) observé ou mesuré, par exemple la température.
- Le résultat (result) de l'observation.
- La procédure (procedure) : l'instrument, l'algorithme ou le processus utilisé ; généralement la procédure est décrite avec du SensorML.
- L'instant du phénomène (phenomenon time) : l'instant réel associé au résultat.

Une des caractéristiques de ce modèle de données est la séparation entre l'observation, l'entité géographique, le phénomène et la procédure d'observation. Ainsi chaque entité de ce modèle peut être décrite indépendamment des autres, ce qui permet de récolter des informations appropriées.

SOS

Sensor Observation Service décrit les caractéristiques d'une interface web pour rendre accessibles des archives de données de capteurs en temps réel. Les valeurs de mesures sont nécessairement encodées au format O&M. Les données proposées comprennent non seulement des mesures mais aussi la description des capteurs encodée au format SensorML.

Trois opérations de base sont décrites par cette norme :

- GetCapabilities pour demander une description du service et des données disponibles (phénomènes observés, périodes des mesures, ...).
- GetObservation pour récupérer des données provenant d'un capteur spécifique au format O&M.
- DescribeSensor pour obtenir des métadonnées à propos du capteur au format SensorML.

Deux opérations transactionnelles permettent d'interagir avec le service. RegisterSensor pour enregistrer un nouveau capteur et InsertObservation pour insérer de nouvelles données pour des capteurs déjà connus du service SOS. Dans le cas des capteurs pouvant transmettre des mesures à distance, il est possible de les enregistrer en temps réel.

Définition des éléments O&M

Lorsqu'on applique ces principes au programme « fonctionnement des petits bassins miniers », on dénombre quatre phénomènes (phenomena selon la terminologie de l'OGC) : les précipitations, les débits, les concentrations et la turbidité. A chaque phénomène est attribué un identifiant unique qui doit être une URN, une description et une unité.

¹ Un capteur n'est pas nécessairement un dispositif de mesures. Le terme ici est plus général et il peut s'agir par exemple d'un observateur humain.

² Une observation est une action avec un résultat qui a une valeur décrivant un certain phénomène (température, vent, couleur de l'eau, ...).

³ Une mesure est une observation dont le résultat peut être mesuré, c'est-à-dire décrit en utilisant une quantité numérique avec une échelle ou en utilisant un système de références scalaire.

Chaque station répertoriée est une entité géographique d'intérêt (feature of interest selon la terminologie de l'OGC) sur laquelle sont réalisées les mesures. Un identifiant, un nom, une description et une géométrie sont attribués à chacune des entités géographiques. Par exemple, sur Poro quatre stations ont été retenues : deux pour les mesures de précipitations et deux pour les mesures débit d'eau et de concentration. Nous avons donc sur Poro quatre entités géographiques d'intérêt qui sont représentées par des points (longitude et latitude).

Chaque capteur est une procédure (procédure selon la terminologie de l'OGC). Pour chacun des capteurs, un document SensorML a été créé afin de le décrire. Un identifiant unique sous forme d'URN est attribué à chacun des capteurs et la localisation du fichier SensorML le décrivant lui est associée.

Chaque observation est associée à un instant, une procédure, une entité géographique et une valeur (numérique dans notre cas).

Une des particularités rencontrées ici est qu'à une procédure est associée une entité géographique et un phénomène, ce qui n'est pas toujours le cas. On aurait pu considérer un ensemble de capteur comme étant une procédure et dans ce cas, une procédure aurait été associée à plusieurs phénomènes.

Service SOS

Pour mettre en œuvre la norme SOS, une base de données PostgreSQL avec un schéma relationnel en accord avec la norme O&M (voir le schéma en annexe). L'opération transactionnelle d'insertion des données est mise en œuvre. Cela facilitera la mise à jour de la base de données notamment lors de la récupération de nouvelles mesures.

Application

Une application en ligne a été mise en place pour permettre aux différents acteurs de ce projet de visualiser par des graphes et télécharger les données enregistrées. La plupart des données et métadonnées disponibles sur ce site sont enregistrées avec le service SOS. L'affichage se fait par les requêtes GetObservation et DescribeSensor.

Un des avantages de cette méthode est que l'utilisation de ces données dans un contexte autre que cette application est facilitée grâce à l'interopérabilité.

Information documentaire

La mise en place d'archives ouvertes ouvre de nouveaux modes de diffusion des résultats de la recherche. Le constat souvent porté par un grand nombre de décideurs de services administratifs et techniques n'est pas tant le manque de données ou d'études, mais plutôt le manque de visibilité et le difficile accès aux résultats de ces études.

Du point de vue de l'utilisateur final, le point central est la mise en place d'un moteur de recherche permettant à l'ensemble des services techniques d'avoir accès à la documentation technique produite par chacun des services, mais également d'avoir accès à la documentation scientifique et technique disponible dans d'autres institutions.

Aussi, la mise en place d'un outil passe par une réflexion sur l'interopérabilité de l'information documentaire.

Les Métadonnées et protocole d'échange

À l'heure actuelle, Internet ressemble à une immense bibliothèque sans catalogue. Ce sont les métadonnées qui permettent de remédier à ce problème. Elles proposent une alternative moins stricte au catalogue traditionnel, tout en remplissant les mêmes objectifs : fournir des renseignements à propos de ressources numériques complètes ou partielles. Non seulement elles sont inestimables pour le repérage des documents, mais elles favorisent également la gestion, la description, l'accès et la conservation de l'information.

Le protocole OAI-PMH – pour Open Archive Initiative Protocol for Metadata Harvesting (protocole de collecte de métadonnées pour l'initiative des archives ouvertes) – permet de faciliter la mutualisation et la diffusion des contenus car il repose sur l'utilisation des fiches de métadonnées.

Entrepôt et moissonneur

Le protocole OAI-PMH est indissociable des notions de réseau, d'entrepôt et de moissonneur. On parle de réseau de portails OAI lorsque plusieurs portails échangent entre eux des descriptions de documents grâce au protocole OAI :

- Chaque producteur de ressources (établissement partenaire de l'UNT) doit enregistrer ses fiches de métadonnées dans ce que l'on appelle un « entrepôt OAI », c'est-à-dire un serveur de stockage configuré pour qu'il communique avec le protocole OAI-PMH.
- Un programme, appelé « moissonneur », va ensuite collecter les métadonnées dans l'entrepôt et les enregistrer dans une base de données mise à jour régulièrement et automatiquement. Un moissonneur peut

être configuré pour moissonner plusieurs entrepôts à la fois : sa base de données devient alors une base de métadonnées d'un réseau d'entrepôts.

Grâce à un moteur de recherche, il est possible d'interroger la base de métadonnées du moissonneur pour accéder aux descriptions des ressources et, ainsi, aux ressources elles-mêmes, où qu'elles soient. Un moteur de recherche peut être configuré pour interroger plusieurs moissonneurs.

ORI-OAI

La plateforme ORI-OAI vise la mise en place d'un système ouvert, en open source, permettant :

- de **gérer** tous les documents numériques produits par les institutions ;
- de les **partager** avec d'autres institutions ;
- de les **valoriser** par une indexation professionnelle ;
- de les **rendre accessibles**, à distance et selon les droits définis, dans des interfaces ergonomiques.

Points-clés de ORI-OAI

- **Référentiel unique**, pour les ressources numériques documentaires (ressources documentaires acquises ou produites par l'institution). Le référentiel ne se substitue pas aux diverses plates-formes qui peuvent utiliser et publier ces mêmes ressources, mais il gère la forme canonique de la ressource numérique ;
- **Système de recherche avancée**, multicritère (métadonnées, texte intégral).
- **Accès thématiques aux ressources**, selon des classifications simplifiées qui exploitent la classification Dewey (cf. classification UNIT).
- **Système de gestion et de publication des ressources numériques**
 - Publication web avec gestion des droits d'accès ;
 - Description des ressources selon les normes AFNOR LOM-FR, TEF, DC ..., en relation avec les autres systèmes documentaires pour le partage des tables d'autorité (SUDOC, STAR ...)
 - Indexation selon les classifications usitées dans les bibliothèques universitaires (Dewey ...) et exploitées par les classifications spécifiques des UNT ;
 - Archivage des ressources numériques.
- **Système de production** impliquant les acteurs concernés, dans des procédures élaborées matérialisées par des workflows ; gestion des versions et accès aux versions natives des documents pour leurs créateurs.
- **Système de partage**, fondé sur l'échange de métadonnées selon le protocole OAI-PMH, permettant de fonctionner au sein d'une communauté constituée (UNT par exemple) en réseau de portails.
- **Système open-source**, libre de droit, documenté.

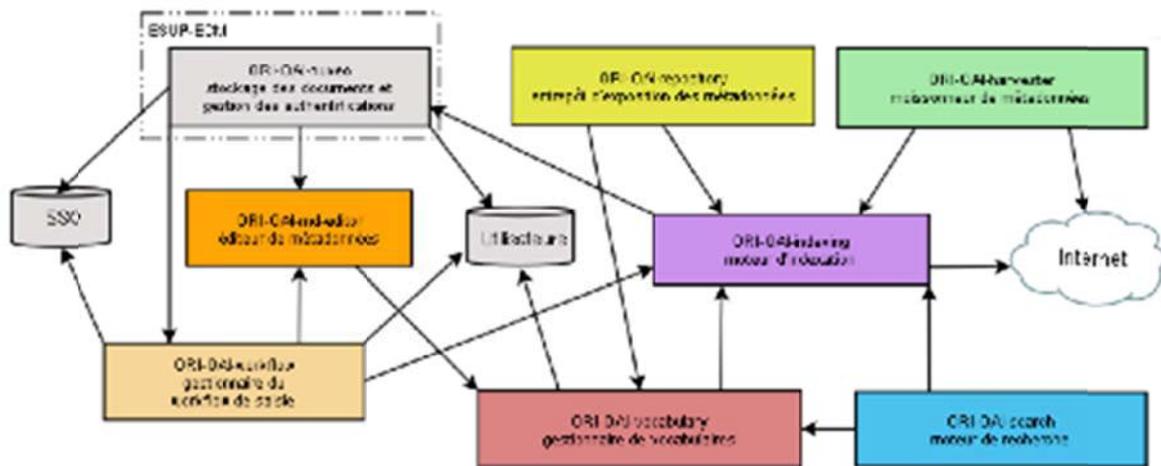
Trois cas d'utilisation d'ORI-OAI

Dans le système ORI-OAI, les composants sont indépendants. Suivant les cas d'utilisation, l'interaction entre les composants est différente. Trois grands cas existent :

- une gestion des ressources produites. Il s'agira par exemple d'une gestion par une institution de l'ensemble ou d'une partie des ressources numériques qui constitue son archive institutionnelle.
- une agrégation de ressources extérieures. Cet aspect sera par exemple utilisé pour développer des portails présentant l'ensemble des ressources produites par les institutions appartenant à un réseau.
- une utilisation complète (production et agrégation). Les deux précédentes possibilités sont compatibles : une institution peut à la fois gérer les ressources qu'elle produit et agréger des ressources extérieures issues de ses réseaux. De même une institution peut mettre à la disposition d'autres institutions qui ne possèderaient pas leur propre outil de gestion, une chaîne de diffusion de leurs ressources.

Architecture technique

Le logiciel ORI-OAI possède une architecture modulaire constituée de huit modules indépendants, interconnectables au travers de Web Services. Cette architecture présente l'avantage de pouvoir connecter des logiciels extérieurs aux différents modules du système et de ne pas nécessiter l'installation de tous les modules d'ORI-OAI. Pour exemple, il est possible pour une institution de proposer des fonctions de recherche depuis son portail documentaire sans passer par l'interface de recherche du logiciel ORI-OAI. Nous reviendrons par la suite sur les différents scénarios d'utilisation possibles. L'ensemble des modules et des interconnexions sont représentés sur la figure suivante :



Le module ORI-OAI-workflow

Ce composant optionnel est utilisé pour le référencement des ressources. C'est via ce module que sont saisies les métadonnées lors du dépôt de document. Le bon fonctionnement de ce module nécessite obligatoirement le module d'indexation des fiches de métadonnées (ORI-OAI-indexing), le module d'édition des fiches de métadonnées (ORI-OAI-md-editor), une base de données SQL pour le stockage des fiches de métadonnées et des données de gestion et enfin un annuaire LDAP pour la gestion des utilisateurs.

Le module ORI-OAI-indexing

Module obligatoire, ORI-OAI-indexing a pour rôle l'indexation des fiches de métadonnées saisies et validées à partir du module ORI-OAI-workflow.

Utilisant le moteur d'indexation Lucene, ce composant permet l'indexation de différentes ressources et offre ainsi une recherche puissante et rapide. L'utilisation complémentaire du framework d'indexation Lius2 permet une indexation de différents formats de fichiers et offre la possibilité d'indexer les documents associés aux fiches de métadonnées en plein texte.

Le module ORI-OAI-repository

Basé sur le logiciel OAICat, le module ORI-OAI-repository permet d'exposer les fiches de métadonnées locales ou provenant de la moisson d'autres entrepôts. Ces fiches de métadonnées peuvent être exposées sous forme de "sets OAI" gérés par le module, sets représentant des ensembles distincts liés à une thématique particulière.

Le module ORI-OAI-harvester

Utilisant le logiciel OAIHarvester, le module ORI-OAI-harvester est un composant optionnel qui permet le moissonnage de fiches de métadonnées sur tout entrepôt OAI. Les fiches de métadonnées moissonnées sont alors stockées localement dans une base de données SQL et indexées par le moteur d'indexation du logiciel. Les moissons des entrepôts peuvent être programmées par l'administrateur via une interface web.

Les composants obligatoires au bon fonctionnement de ce module sont le module d'indexation ORI-OAI-indexing et une base de données SQL pour le stockage des fiches de métadonnées et des données de gestion.

Le module ORI-OAI-search

Le module ORI-OAI-search offre une interface graphique pour la recherche de documents dans le système. Interconnecté au module d'indexation, ce composant génère des requêtes dans la syntaxe Lucene et affiche les documents retrouvés. Entièrement configurable, ce module permet des recherches multicritères sur les métadonnées des ressources, sur le texte intégral ou par la navigation dans une arborescence thématique. Par défaut, il est possible d'effectuer des recherches en fonction du type de documents, de la date de création ou de modification ou de la thématique.

Le module ORI-OAI-vocabulary

Utilisé par ce nombreux modules (ORI-OAI-md-editor, ORI-OAI-search, ORI-OAI-repository), ce composant permet de gérer l'ensemble des vocabulaires et des classifications utilisés dans tout le système.

Techniquement, les vocabulaires reposent sur le format d'échange normalisé VDEX5 (Vocabulary Description EXchange). Ces vocabulaires peuvent être statiques ou dynamiques. Dans le premier cas, ils seront définis dans des fichiers XML comme le sont les vocabulaires proposés par défaut par le logiciel (vocabulaire de classification des documents, vocabulaire pour les langues, etc.). Les vocabulaires dynamiques sont constitués automatiquement à partir des différentes valeurs disponibles dans l'index des fiches de métadonnées.

Le module ORI-OAI-md-editor

Module optionnel, le module ORI-OAI-md-editor est utilisé pour la saisie des métadonnées dans ORI-OAI et permet de configurer les formulaires de saisie des métadonnées. La création de nouvelles configurations XForms6 permet d'enrichir le module ORI-OAI-md-editor de supports pour différents formats de métadonnées et ainsi proposer de nouveaux formulaires de saisie de métadonnées. Ce module permet donc une saisie des métadonnées très riche grâce notamment à de l'aide à la saisie, de l'auto complétion, de la recherche de personnes dans l'annuaire, etc.

Le module ORI-OAI-nuxeo

Le module ORI-OAI-nuxeo permet de stocker les ressources numériques associées aux fiches de référencement ORI-OAI dans un espace de travail personnel ou dans un espace de travail partagé.

Les principales fonctionnalités qu'offre ce composant sont :

- La définition des droits d'accès aux ressources ;
- La modération des documents diffusés ;
- L'initialisation d'un référencement de ressources, en lien avec le module ORI-OAI-workflow, par la saisie de métadonnées selon un format choisi parmi ceux proposés et la demande de publication ou la publication de la fiche créée. Techniquement, ce module est basé sur la technologie Nuxeo DM7, application open source Java utilisant un serveur JBOSS.

Actions réalisées

Les outils mis en place pour ce programme peuvent se résumer ainsi :

1. Un espace de travail collaboratif (<https://confluence.univ-nc.nc/>)¹
2. Deux plateformes techniques pour la capitalisation et la visualisation des données issues scientifiques et techniques
3. Une plateforme de diffusion de données documentaires

Espace de travail collaboratif

L'espace de travail collaboratif mis en place en place par l'UNC est basé sur le bien connu wiki d'entreprise dénommé « Confluence ». Vous trouverez à ces adresses des informations complètes sur l'utilisation de Confluence :

- <http://confluence.atlassian.com/display/CONF32/Confluence+User's+Guide>
- http://confluence.atlassian.com/x/_gG6D
- Une page intéressante (avec des vidéos) trouvée à partir du lien précédent : <http://sandbox.onconfluence.com/x/DwDq> (si un mot de passe est demandé : [sandbox/sandbox](http://sandbox.onconfluence.com/x/DwDq))

En attendant de consacrer du temps à la lecture de toute cette documentation, voici quelques éléments permettant de démarrer rapidement l'utilisation de Confluence.

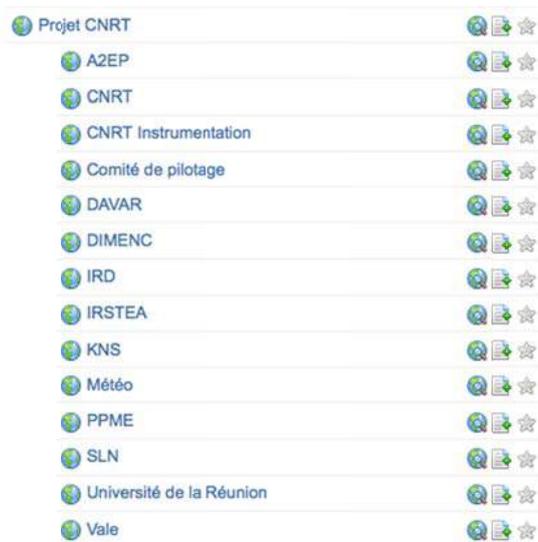
Confluence sert à connecter les gens qui travaillent sur un même projet qu'ils soient dispersés à travers le monde ou dans un même lieu. Confluence permet de documenter régulièrement l'activité des uns et des autres, de manière à capitaliser et à renseigner les partenaires d'un projet au fur et à mesure de l'actualité de ce projet. Confluence permet également de partager des idées, participer aux discussions et contribuer à des projets collaboratifs. Chaque équipe dispose de son propre espace de travail sécurisé.

Les différents espaces

Pour ce programme CNRT, plusieurs espaces ont été mis en place : l'espace Bassin Versant CNRT (<http://confluence.univ-nc.nc/display/BVCNRT/Accueil>) dédié à l'ensemble des participants au projet, l'espace [bvcnrt-cemagref \(http://confluence.univ-nc.nc/display/IRSTEA/Home\)](http://confluence.univ-nc.nc/display/IRSTEA/Home) réservé au chef de projet et aux intervenants de l'IRSTEA dans ce projet et *ainsi de suite*.

Voici la liste complète des espaces disponibles pour le projet du CNRT :

- ✓ L'espace Projet CNRT (<http://confluence.univ-nc.nc/display/BVCNRT/Accueil>)
- ✓ L'espace A2EP (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CA2EP/Home>)
- ✓ L'espace CEMAGREF (<http://confluence.univ-nc.nc/display/IRSTEA/Home>)
- ✓ L'espace CNRT (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CCNRT/Home>)
- ✓ L'espace Comité de Pilotage (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CCPIL/Home>)
- ✓ L'espace DAVAR (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CDAVAR>)
- ✓ L'espace DIMENC (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CDIMENC>)
- ✓ L'espace IRD (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CIRD>)
- ✓ L'espace KNS (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CKNS>)
- ✓ L'espace METEO France (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CMETEO>)
- ✓ L'espace PPME (<http://confluence.univ-nc.nc/display/PPME>)
- ✓ L'espace SLN (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CSLN>)
- ✓ L'espace Université de la Réunion (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CUR>)
- ✓ L'espace VALE (<http://confluence.univ-nc.nc/display/CVALE>)



Dans chaque espace sont créés des pages grâce à un éditeur de « texte riche » (une sorte de word simplifié) et un éditeur de texte par balise (une sorte d'éditeur HTML simplifié). Hormis le texte, ces pages peuvent contenir des images, des graphiques et divers autres objets sophistiqués. Vous pouvez également diffuser des annonces importantes avec les blogs.

Confluence sert, en particulier, à la communication autour d'un projet : tenir les intervenants informés et en fournissant un emplacement central pour les informations du projet et gérer les annonces et faciliter les discussions. Toutes vos présentations, feuilles de calcul et documents divers peuvent être stockés sur Confluence où ils sont partageables, visibles et modifiables (selon les droits accordés) aux participants du projet.

Par exemple, dans l'espace PPME, on trouve l'ensemble des informations sur le déroulement du projet pour la partie concernant le PPME :

Sommaire

Agenda (PPME)

CR de réunion du 10 novembre 2011

- [Annexe 1 - Inventaire des données existantes par Nicole Mathys](#)

Volet géologie

- [Parcelles d'érosion](#)
 - [Les termes du projet CNRT pour les parcelles](#)
 - [Références et documents antérieurs sur les parcelles d'érosion](#)
 - [Conception des parcelles CNRT](#)
 - [Comptes-rendus parcelles Poro](#)
 - [Observations in situ](#)
 - [Station d'acquisition et capteurs](#)

Archives du projet CNRT Petits bassins versants miniers

- [2011 - Données collectées ou préparées par Pierre-Erick Alloin](#)
- [2012 - Données préparées et collectées par Antoine Guyonneau](#)
- [Espace de travail du PPME](#)
 - [Architecture et requis techniques CNRT](#)
 - [Avancement de la mise en ligne des données](#)
 - [Documents fournis par Antoine Guyonneau et Lucie Navarrot pour Arnaud Couturier](#)
 - [Poro](#)
 - [SIG CNRT](#)

Rapports de stage

Rapports annuels

Autres rapports

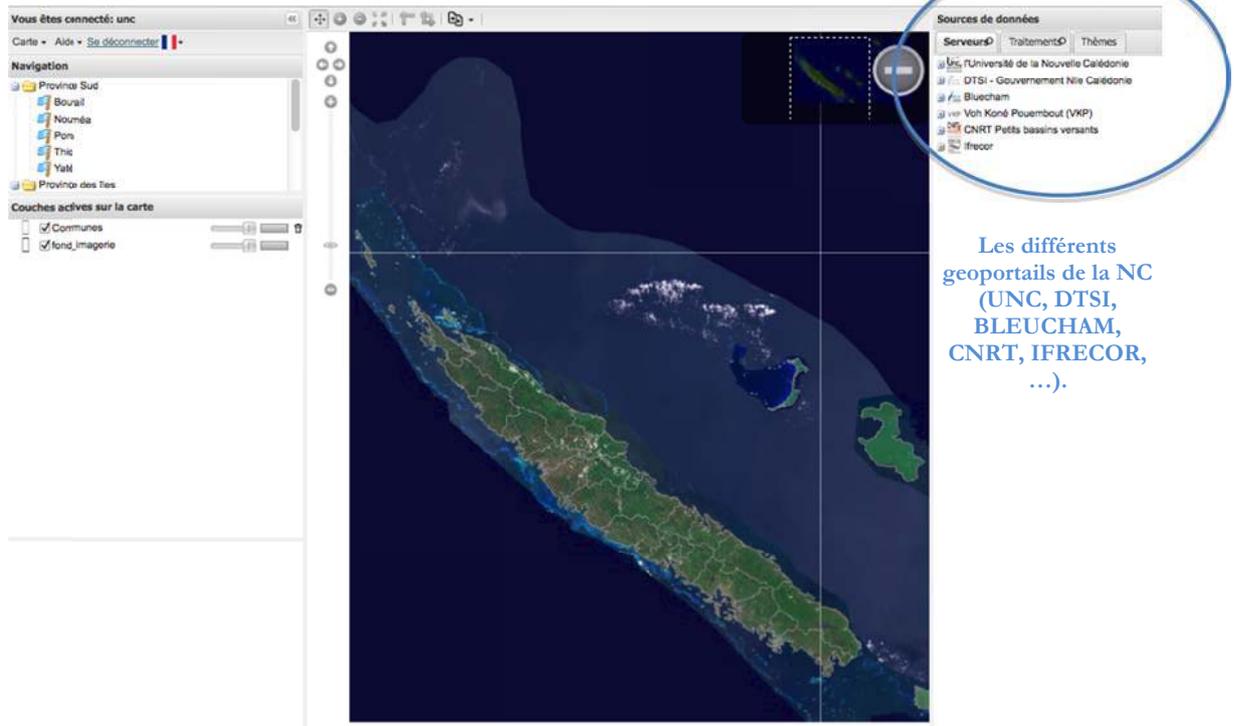
- [Elaboration d'un indice d'apport sédimentaire](#)

Information géographique

La plateforme de visualisation des données et métadonnées géographiques est accessible à l'adresse : <http://grimm.univ-nc.nc/geoportail/>.

Le système développé dans le cadre de ce programme constitue une des parties d'un projet plus ambitieux de conception d'une infrastructure globale pour le système d'information de l'UNC. Comme précisé plus haut, elle s'articule autour des standards internationaux pour permettre l'accès à des données réparties, hétérogènes, multi sources. Cette infrastructure permet de localiser, d'identifier et de transformer des ressources à destination d'un vaste public. La notion de méta-données est au cœur de la démarche avec une grande diversité dans l'interprétation et l'utilisation de cette notion.

Page d'accueil du geoportail

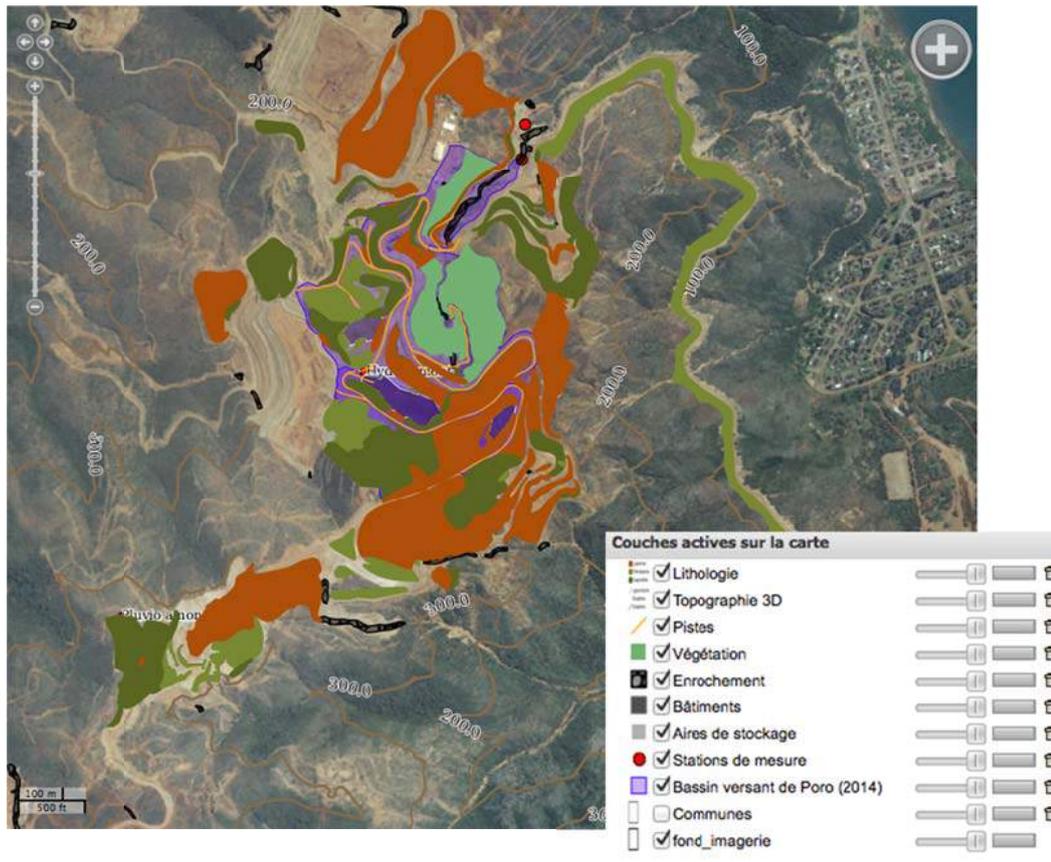


Les différents
geoportails de la NC
(UNC, DTSI,
BLEUCHAM,
CNRT, IFRECOR,
...).

Extrait des données disponibles sur le geoportail du CNRT



Visualisation de la zone de Poro



Accès au attributs des données

Informations sur le point cliqué		
Entités géographiques	boundedBy	368917,322193 368917,322193
Chargement terminé	nom	Pluvio aval
<input checked="" type="checkbox"/> Stations de mesure	x	368917.0
<input checked="" type="checkbox"/> cnrt_poro_hydrologie_stations	y	322193.0
<input checked="" type="checkbox"/> Enrochement	z	199.0
<input checked="" type="checkbox"/> cnrt_poro_occupation_sol_enr	observ	Augets basculeurs
	intru	Précis mécanique 400cm ² + Danae R62-LC
	loca	Poro 2 - Aval
	donnee_dis	Chronique pluvio
	editeur	Davar

Accès aux métadonnées

Titre	Lithologie
Légende	 Latérite Péridotite Sapolite
Description	Géologie du site minier de Poro. Localisation des affleurements de latérites, péridotites et sapolites. Source: Société le Nickel – SLN.
Nom WMS	nc_cnrt:cnrt_poro_geol
Serveur d'origine	geoserver/ows
Emprise lat/lon	165.690519,-21.312639 165.706693,-21.291749
Fournisseur de la donnée	CNRT Petits bassins versants  CNRT NICKEL & son environnement
Format	image/png
Projection	EPSG:3163

Série de données

Depuis ce site, mis en place par l'Université de la Nouvelle Calédonie, consultez et téléchargez des mesures effectuées par différents chercheurs sur les sites miniers étudiés. Les stations sont géolocalisées et leurs protocoles de mesures décrits avec précision afin de rendre les mesures exploitables.

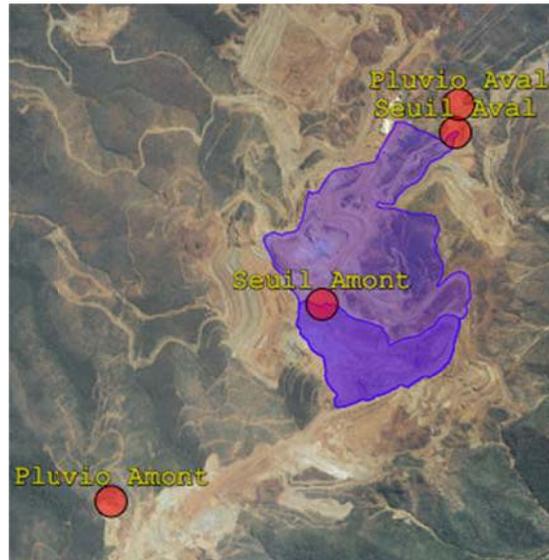
Exemple du site de Poro

Les bassins versants étudiés sont localisés sur le massif de Poro, plus particulièrement sur la mine Française gérée par le CFTMC, située sur la commune de Houaïlou, en Province Nord. Les bassins équipés Poro amont et Poro aval, sont deux bassins emboîtés compris entre 197 et 366 m d'altitude.

Les pluies sont mesurées à l'aide de deux pluviographes Précis Mécanique, modèle 3029 (résolution 0,5 mm cône 400 cm²). Ces pluviographes sont doublés de pluviomètres totalisateurs constitués d'un cylindre vertical dans lequel une fine couche d'huile permet d'éviter l'évaporation.

Les débits et transports solides en suspension sont mesurés au niveau des deux stations limnigraphiques Poro amont et Poro aval. Chaque station limnigraphique est constituée d'un canal de mesure de section trapézoïdale et est équipée d'une sonde de pression (sonde In Situ Level Troll 500) pour mesurer le niveau d'eau et d'un préleveur automatique ISCO 6712 d'une capacité de 24 flacons. Le préleveur dispose également d'une mesure de niveau d'eau via un module 720.

La station « Poro aval » est également équipée d'un turbidimètre WTW depuis avril 2013 qui mesure la turbidité in-situ lors des principaux épisodes.



Sur chacune de ces stations de mesure, les données et métadonnées sont disponibles. Par exemple, sur la station dite « seuil aval », on trouve une photo du site, la description des outils de mesure utilisés, la géolocalisation et ce qui est mesuré.

[Station 1 Graphe et téléchargement](#)
Seuil aval



Description : Seuil de trapézoidal. Equipé de 2 sondes.

Sonde 1 : ISCO 6712, module 750 (donnée de hauteur d'eau et de vitesse) et module 720 (Donnée de hauteur d'eau). Préleveur d'échantillons asservis sur la hauteur d'eau 24 bouteilles dont 6 réservées pour les grandes hauteurs d'eau.

Sonde 2 : Sonde INSITU, donne la hauteur d'eau. Dispose de deux échelles limnimétriques.

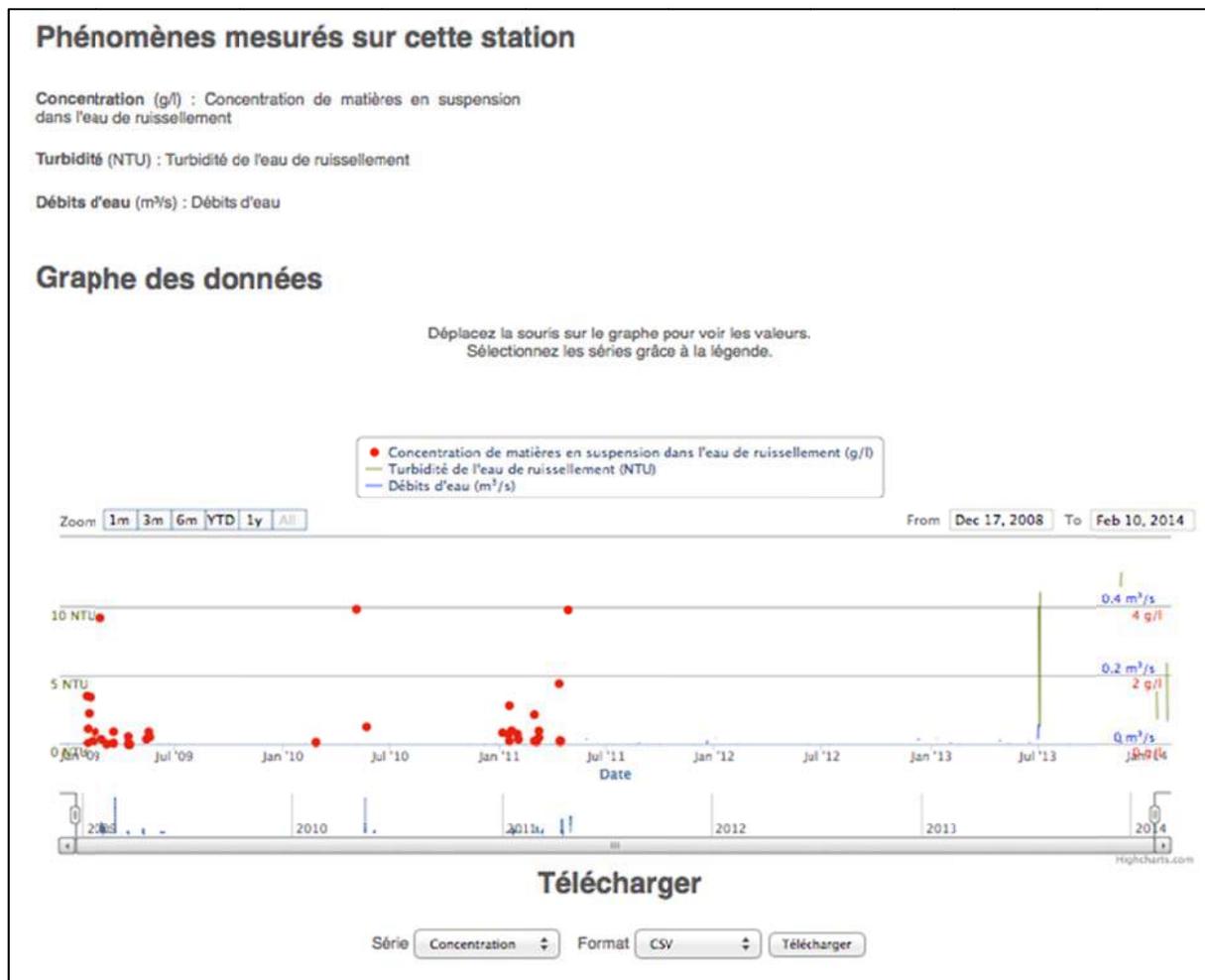
Mesures de concentration : Les concentrations sont mesurées en g/l. Les concentrations sont issues de prélèvements automatiques et manuels au niveau du seuil aval. Les prélèvements ont été effectués par l'ISCO 6712 et les analyses par le PPME de l'université de Nouméa. Soit les flacons sont relevés par la DAVAR puis donner au stagiaire hydromine du PPME soit directement par le stagiaire hydromine de janvier à mai. Les valeurs de concentrations hydromine sont obtenus par une filtration au Buchner puis passage à l'étuve des filtres préalablement passer à l'étuve pour une première pesée. A l'issue de ce second passage à l'étuve les filtres sont repesés et les concentrations déduites. Les pesées s'effectuent sur une balance de précision.

Emplacement de la station



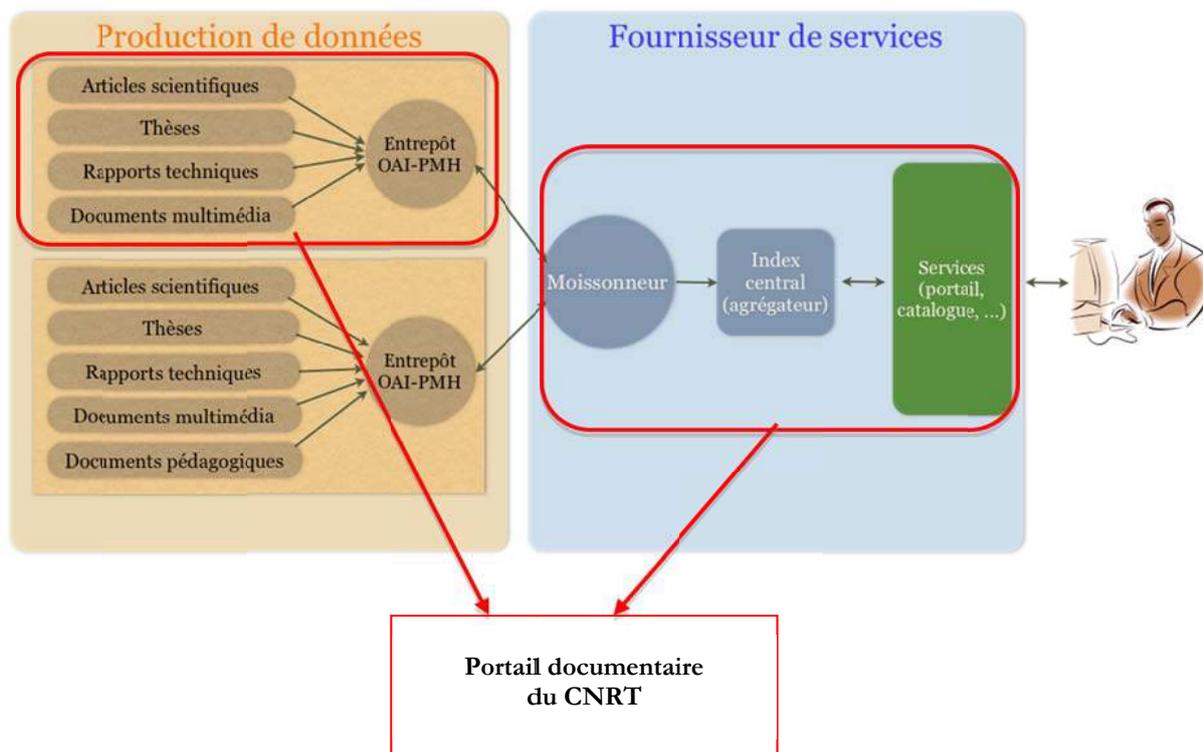
Les données issues de ce capteur sont

1. représentées sous forme de graphique
2. téléchargeables sous forme de fichier.



Information documentaire

Le serveur de données documentaires (l'application associée ORI-OAI) est hébergé et maintenu par l'UNC. On peut schématiquement résumer la structure de l'application par le schéma suivant :



Présentation globale

L'accès à la plateforme donne accès aux rubriques suivantes

- Nouveautés
- Recherche
- Parcours par auteur
- Parcours par institutions
- Parcours par type de publication
- Parcours par année
- Parcours par projet CNRT



Moteur de recherche

Le moteur de recherche donne accès à l'ensemble des entrepôts moissonnés par le CNRT. On peut restreindre la recherche aux seuls entrepôts qui intéressent l'utilisateur.

La recherche peut se faire par combinaison booléenne de critères. Les opérateurs booléens disponibles sont le ET, OU et SAUF.

Les critères adoptés (pour l'heure) concernent le titre, l'auteur et l'année.



Nouveautés Recherche Par auteur Par partenaire Par type de publication Par année Par projets

Titre (?)		Entrepôt <input type="checkbox"/> UNC <input type="checkbox"/> ArchiMer, Ifremer's Institutional Repository (French Research Institute for Exploitation of the Sea) <input type="checkbox"/> Horizon / Pleins textes - Fonds documentaire de l'IRD <input checked="" type="checkbox"/> cnrt
ET	Titre (?)	

Note : L'utilisation de guillemets permet de retrouver une expression entière (exemple : "Enseignement secondaire").
 Vous pouvez aussi remplacer un ensemble de caractères par * (exemple : méca*) et un caractère unique par ? (sauf en début de mot)

Rechercher Effacer

Les parcours

Par auteur

Auteurs	
Auteurs	
A [31]	M [93]
B [132]	N [3]
C [57]	O [23]
D [108]	P [57]
E [6]	R [55]
F [28]	S [61]
G [166]	T [48]
H [23]	U [14]
I [5]	V [32]
J [54]	W [35]
K [36]	Z [2]
L [127]	

Par institution

Recherche par partenaire	
Tutelles	
EHESS/ENS, [1]	UNIVERSITE PARIS 13, UFR LETTRES, Sciences de l'Homme et des Societes [1]
IAC [47]	Université de la Nouvelle Calédonie [14]
IAC / Institut des Régions Chaudes, Montpellier [1]	Université Montpellier II, 21 novembre 2007. [1]
IAC / Université Paris I. [1]	Université Paul Sabatier, Toulouse / IAC [1]
IAC / Université Paul Verlaine-Metz [1]	Université d'Avignon et des pays du Vaucluse, France / IAC [1]
IAC Saint Louis [47]	Université de Caen, France [1]
IAC.Montpellier : Institut des Régions Chaudes, Montpellier Supagro, [1]	Université de Montpellier II, France / IAC [1]
IAC/CIRAD/DDEE-PN, Pouembout, [1]	Université de Nouvelle-Calédonie [14]
ISTOM / IAC [2]	Université de Nouvelle-Calédonie, Nouméa. / IAC [1]
Massey University, Palmerston North, New Zealand. [1]	Université de Perpignan, France [1]
Montpellier : Institut des Régions Chaudes, Montpellier Supagro, IAC, [1]	Université de Rennes I. / IAC [1]
Montpellier SupAgro / IAC / IRD [1]	Université de Rouen, France / IAC [1]
Nelson Mandela Metropolitan University (George, South Africa). / IAC [1]	Université de la Nouvelle-Calédonie [14]
Paris III Sorbonne Nouvelle, / IAC [1]	Université des sciences et techniques de Montpellier / IAC [1]

Par type de publication

Recherche par type de publication	
Types de publications HAL	
Articles dans des revues avec comité de lecture [87]	Chapitres d'ouvrages scientifiques [26]
Articles dans des revues sans comité de lecture [17]	Rapports de recherche [126]
Communications avec actes [24]	Autres publications [58]
Communications sans actes [50]	Affiches et posters [26]
Ouvrages scientifiques [18]	Thèses de Doctorat [41]

Par année

Recherche par années	
Année	
2012 [6]	2006 [98]
2011 [17]	2005 [6]
2010 [68]	2004 [1]
2009 [89]	2003 [2]
2008 [71]	2001 [1]
2007 [69]	

Par projet CNRT

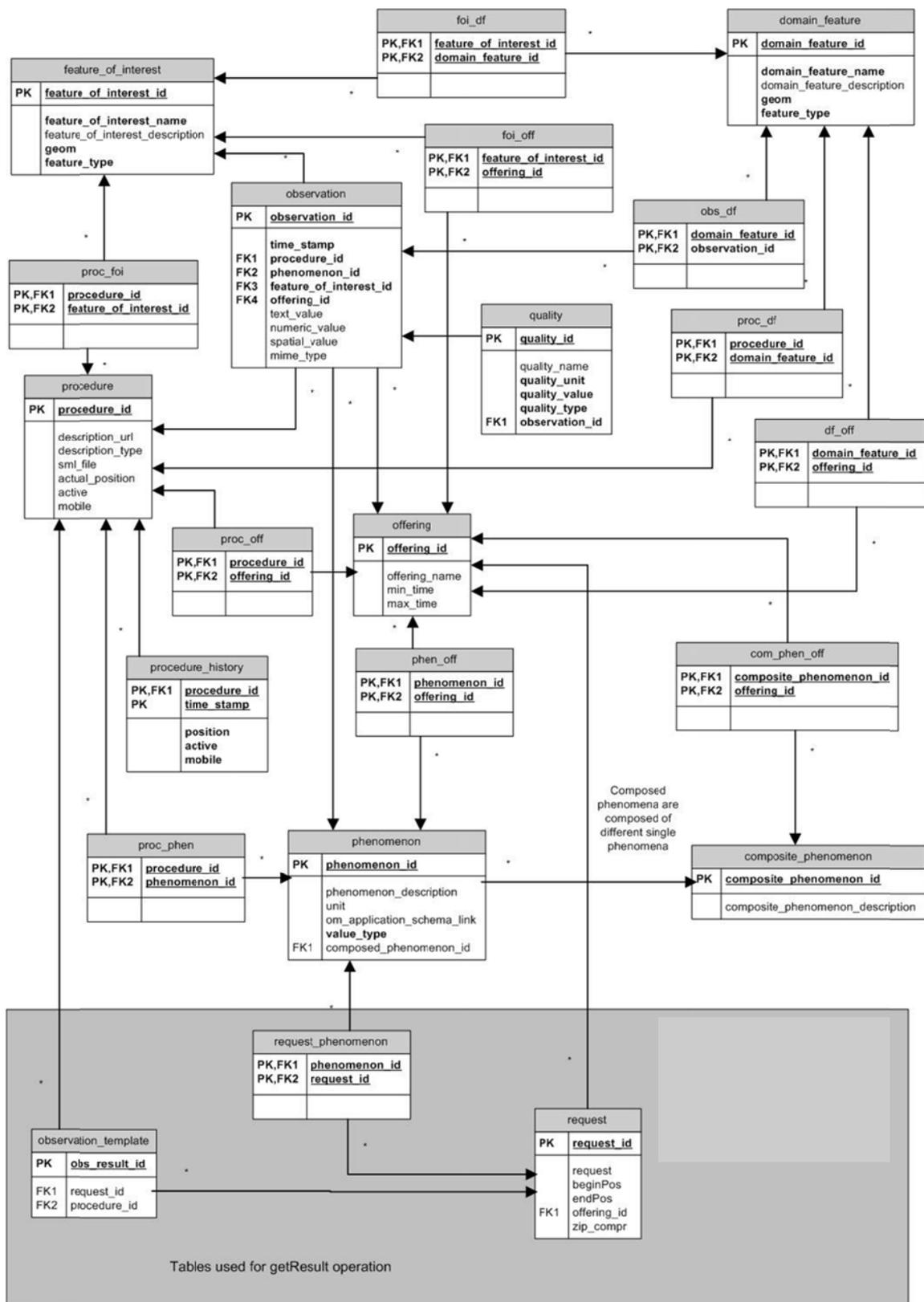
Projets CNRT	
Ecomine [1]	Suivi de l'impact ADIIP [0]
Analyse des Minerais lat. [0]	Toxicité directe du Ni [1]
Mines et gouvernance [0]	Poussières Ni [0]
CARTHA Télédétection [1]	Radiométrie [1]
Typologie des Minerais lat. [0]	Suivi de l'impact guide [1]
Mesure in situ [1]	Rhéologie [0]
Bassin versant [0]	Amiante environnementale [1]
Suivi de l'impact MANGROVE [1]	

Les résultats

Le nickel, le chrome, le cobalt et le manganèse dans les gisements de latérites de Nouvelle-Calédonie: Etude exploratoire sur la toxicité et l'exposition humaine / GIPCNRT98 / 15-11-2011 / cnrt Delmelle, P. Voir le résumé Accéder à la ressource
Conflit et arrangement - La politique du nickel à Thio, Nouvelle-Calédonie Lien permanent vers ce document / GIPCNRT98 / 04-04-2011 / cnrt Le Meur P-Y. Voir le résumé Accéder à la ressource

Annexes

Schéma relationnel de la base de données O&M



Liste des données géographiques disponibles

Site du KONIAMBO

- Centre de gravité des bassins versants
- Pente SW34

- Pente SW35
- Bassins versants SW34 et SW35
- Rivières
- Points d'exutoire
- Stations de mesure
- Pluviomètres
- Stations Surface Water
- Mangroves
- Plages
- Récifs
- Trait de côte
- Bâtiments
- Pistes principales
- Pistes secondaires
- Réseau électrique
- Support électrique
- Végétation SW35
- Topographie 2m sw34
- Topographie 2m sw35
- MNT SW34
- MNT SW35
- Courbes topographiques larges
- Zone bassins versants
- Zone d'étude
- Zone sw34
- Zone sw35
- BD ortho Koniambo
- BD Raster Koniambo

Site de PORO

- Masque de la végétation, des nuages et de l'eau
- Taux de goethite
- Taux d'oxyde de fer
- Rapport goethite/hématite
- Taux de serpentine (2120D)
- Taux de serpentine (2310D)
- BD Raster 50
- Carte des sols sur le BV de Poro 2012
- RapidEye 18/01/2012 - Classification sur 14 classes
- RapidEye 20/10/2011 - Classification sur 5 classes
- RapidEye 20/10/2011 - Classification sur 14 classes
- RapidEye 18/01/2012 - Classification sur 5 classes
- Centres de gravité des bassins versants
- Lithologie
- Bassins de sédimentation
- Buses
- Cassis
- Drainage
- Bassin versant de Poro (2014)
- Bassin versant
- Bassins versants principaux
- Cours d'eau
- Exutoires
- Stations de mesure
- Plages
- Récifs
- Trait de cote
- Occupation des sols des petits bassins versants du site CFTMC de Poro 2014

- Décharges du site CFTMC de Poro 2014
- Latérites grenailles du site CFTMC de Poro 2014
- Maquis du site CFTMC de Poro 2014
- Maquis dégradés du site CFTMC de Poro 2014
- Maquis dégradés grenailles du site CFTMC de Poro 2014
- Péridotites saprolites du site CFTMC de Poro 2014
- Pistes du site CFTMC de Poro 2014
- Plateformes du site CFTMC de Poro 2014
- Zones urbaines du site CFTMC de Poro 2014
- Aires de stockage 2011
- Bâtiments 2011
- Enrochement 2011
- Pistes 2011
- Végétation 2011
- Points côtés
- Topographie 3D
- Zone d'étude
- Zones de référence
- Bassin versant de Poum
- Stations de mesure
- Extraction de l'image Formosat2
- Classification SVM 2012 de l'image Formosat2 2008
- Classification SVM 2012 de l'image de Formosat 2 2008 sur le Bassin Versant de Poro
- Facteur C
- Facteur K
- Facteur K 2012
- Facteur KCLS
- Facteur LS
- Facteur SY
- BD ortho Poro
- BD Raster Poro
- MNT à 1m sur Poro 2014
- Pentes sur Poro 2014

Site de POUM

- BD Ortho Poum
- BD Raster Poum

Site de GORO

- BD Ortho Goro
- BD Raster Goro

Liste des séries de données issues des capteurs

Site du Koniambo

Pluviométrie

- RG001
- RG002
- RG003
- RG005
- RG010
- RG012
- RG019
- RG021

Site de Poro

Concentration

- Hydro Amont
- Hydro Aval

Débit d'eau

- Hydro Amont
- Hydro Aval

Pluviométrie

- Pluvio Amont
- Pluvio Aval

Turbidité

- Hydro Aval

Site de Poum

Concentration

- Seuil Povio
- Seuil Titch

Débit d'eau

- Seuil Povio
- Seuil Titch

Pluviométrie

- Pluvio Povio
- Pluvio Titch

CHAPITRE 2 : CONTRIBUTION DE L'IRSTEA, UNITE ETNA, GRENOBLE



Fonctionnement des petits bassins versants miniers Projet CNRT 2010-2014

Rapport final Irstea



Auteur : Nicolle Mathys

*Avec la collaboration de : Didier Richard, Alain Recking, Sébastien Klotz
Laureen Carpentier, Pierre-Eric Alloin, Lucie Navarrot, Antoine Guyonneau
Perrine Freydier, Alexandre Motto, Muhamed Aksoy*

Fonctionnement des petits bassins versants miniers

Projet CNRT 2010-2014 - Rapport final Irstea

Sommaire

Fonctionnement des petits bassins versants miniers Projet CNRT 2010-2014 - Rapport final Irstea	1
Sommaire	1
Liste des figures	2
Liste des tableaux	3
1 Introduction	4
1.1 Origine du projet, contexte et motivation	4
1.2 Définition du rôle d'Irstea à l'intérieur du projet	4
2 Déroulement du projet, missions assurées par Irstea	5
3 Fonctionnement hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers : état des connaissances	11
4 Les sites retenus pour le projet CNRT	14
4.1 Principe de la démarche, recherche de sites en 2010 et sites retenus dans la suite du projet	14
4.2 Un site pilote : le site de Poro	21
4.3 Réalisation des suivis et données recueillies	25
4.4 Synthèse du chapitre 4	32
5 Les données géographiques recueillies sur les sites	34
5.1 Démarche et présentation des données SIG	34
5.2 Exemples d'utilisation des données SIG	36
5.3 Conclusion du chapitre 5	38
6 Observations et résultats obtenus sur le site pilote de Poro	38
6.1 Méthodes d'analyse utilisées	38
6.2 Résultats sur la relation pluie-débit	40
6.3 Résultats sur les flux de sédiments	45
6.4 Modélisation statistique globale	49
6.5 Modélisation pluie-débit-transport en suspension	52
6.6 Discussion sur le fonctionnement des décanteurs	59
6.7 Résumé et conclusion du chapitre 6	61
7 Observations et résultats sur les autres sites	62
7.1 Poum.	63
7.2 Koniambo	65
7.3 Goro	68
7.4 Comparaisons entre les sites pour l'épisode Freda	69
7.5 Essais de transfert des modélisations réalisées à Poro	71
8 Le fonctionnement des décanteurs sur les sites miniers	73
8.1 Un point crucial dans la gestion des eaux sur mine	73
8.2 Etude exploratoire sur le fonctionnement des décanteurs et la faisabilité d'une modélisation	74
8.3 Conclusion et propositions sur l'étude des décanteurs	76
9 Conclusion générale	78
Références	82
Liste des Annexes	86

Liste des figures

Figure 1 : Stations et sites d'intérêt de Goro.....	16
Figure 2 : stations complémentaires sur le site de Goro.....	17
Figure 3 : stations et sites d'intérêt de Koniambo	18
Figure 4 : Panorama des bassins versants. (a) depuis l'amont de SW35 (b) depuis l'aval de SW34 (Motto A., 2013).....	19
Figure 5 : Sites inventoriés sur le bassin Cascade et vue générale du site.....	20
Figure 6: stations et sites d'intérêt de Poum	21
Figure 7 : Carte de localisation des bassins versants du site pilote de Poro (bassins FRN = Poro Amont, DNS = Poro Aval).....	22
Figure 8 : situation et couvert végétal des deux bassins de Poro	22
Figure 9 : Equipement des postes pluviométriques de Poro	23
Figure 10 : Station limnigraphique de Poro amont.....	23
Figure 11 : Station limnigraphique de Poro aval	24
Figure 12: Capteurs et préleveur de la station Poro amont.....	24
Figure 13 : Installation d'un turbidimètre optique sur la station de Poro aval.....	25
Figure 14 : Mesures de concentration en MES sur les stations de Poum	28
Figure 15 : Chronique de débits à Poro aval et zooms sur différentes périodes	29
Figure 16 : Prises de vue des écoulements sur mine et jaugeages en cours d'épisode.....	29
Figure 17 : Suivi du décanteur FRN01 de Poro.....	30
Figure 18 : Concentrations mesurées aux deux stations de Poro (2009-2013)	30
Figure 19 : Fonctionnement hydraulique du bassin versant de Poro (Guyonneau, 2012)	31
Figure 20 : Localisation des sites du projet CNRT-PBVM	32
Figure 21 : Schéma de principe d'une station de mesure des débits et transports en suspension.....	34
Figure 22 : Exemple de mise en forme thématique des couches SIG (Guyonneau 2012)	36
Figure 23 : Exemple d'utilisation du MNT, tracé de profils en long de talwegs (Motto, 2013)	37
Figure 24 : détermination de la fin du ruissellement (exemple sur Poro amont).....	39
Figure 25 : Pluviométrie annuelle sur le site de Poro	41
Figure 26 : Chronique 2009-2013 des pluies journalières de Poro	41
Figure 27 : Comparaisons des cumuls de pluie aux deux postes de Poro pour les épisodes moyens et forts	42
Figure 28 : Relation entre le débit de pointe et les paramètres de pluie incidente à Poro aval (période 2009-2013, épisodes supérieurs à 20 mm, 24 décembre 2011 exclu).....	43
Figure 29 : Relation lame écoulee / pluie incidente pour les épisodes de pluie supérieure à 20mm ..	44
Figure 30 : Variabilité des coefficients d'écoulement des épisodes supérieurs à 20 mm	45
Figure 31 : Distribution granulométrique des échantillons de crue	46
Figure 32 : Relation concentration/débit (échelle logarithmique en bas).....	47
Figure 33 : Débit et concentration en fonction du temps (Poro amont)	48
Figure 34 : Hystérésis dans la relation concentration-débit	48
Figure 35 : flux en tonnes des épisodes échantillonnés soit 93 épisodes classés par ordre chronologique (abscisse = rang de l'épisode dans la série)	49
Figure 36 : Calage d'un modèle simple pour l'estimation des flux à partir du débit de pointe.....	50
Figure 37 : Interactions entre les différents composants d'HEC-HMS (Cunderlik et Simonovic, 2004 in Aksoy, 2014)	53
Figure 38 : Schématisation du bassin sous HEC-HMS	54
Figure 39 : Représentation schématique des classes (Aksoy, 2014).....	55
Figure 40 : Calage et validation des épisodes du groupe 3.....	56
Figure 41 : Carte de la répartition du facteur K à Poro	57
Figure 42: Modélisation de l'érosion pour l'épisode 397 (flux en tonnes par pas de calcul de 5 min). 57	
Figure 43 : Répartition temporelle des flux observés et modélisés.....	58
Figure 44 : Essai d'interprétation sédimentologique d'une carotte de sédiments prélevés en 2011	

dans le décanteur FRN01	60
Figure 45 : Comparaison des pluies journalières aux deux stations Salamandre et Gendarmerie.....	63
Figure 46 : lame écoulee en fonction de la lame précipitée Titch	64
Figure 47 : Concentration mesurée aux stations de Poum	64
Figure 48 : Relation Concentration-Débit pour les bassins de Poum.....	65
Figure 49 : Graphe Pluie-Débit et Relation Concentration-Débit pour la crue du 5 mai 2012 à Povio (Guyonneau, 2012).....	65
Figure 50 : Relation Pluie/Lame écoulee et coefficient de ruissellement à Koniambo (année 2012) ..	66
Figure 51 : Mesures de concentration disponibles sur le bassin SW34	67
Figure 52 : Concentrations mesurées sur le bassin SW35.....	67
Figure 53 : : Terrassements dans le bassin versant SW3, Photo KNS, Mars 2012	67
Figure 54 : Relation Pluie/Lame écoulee et coefficients de ruissellement, bassin KN15 de Goro.....	68
Figure 55 : Relation Pluie/Lame écoulee et coefficients de ruissellement, bassin KO6 de Goro.....	68
Figure 56 : Correction de la décrue sur SW35 pour l'épisode FREDa (Motto, 2013).....	70
Figure 57 : Modélisation HEC-HMS (Pluie-Débit) sur le bassin sW34	72
Figure 58 : Résultats des modélisations sédimentaires sur Koniambo (bassin SW34)	73
Figure 59 : Illustrations du phénomène des eaux rouges et des ruissellements sur mine	74
Figure 60 : Observations dans le décanteur FRN01 de Poro pour la crue du 14/04/2012	75

Liste des tableaux

Tableau 1 : Déroulement des actions et missions de l'équipe Etna d'Irstea dans le projet	7
Tableau 2 : Données pluviométriques de Goro.....	26
Tableau 3 : Données de hauteur d'eau et de concentration disponibles pour le site de Goro	26
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des bassins retenus	33
Tableau 5 : Organisation thématique des données SIG	35
Tableau 6 : Bilan des données SIG recueillies ou élaborées sur les sites miniers du projet	36
Tableau 7 : Principales caractéristiques morphométriques des bassins versants (2013).....	38
Tableau 8 : Matrice de corrélation pour quelques paramètres hydrologiques (Poro amont, épisode 261 inclus)	40
Tableau 9 : Matrice de corrélation pour quelques paramètres hydrologiques (Poro aval, épisode 261 exclu)	40
Tableau 10 : paramètres du modèle $L_r = C_e \times (\text{pluie} - \text{pertes initiales})$	44
Tableau 11 : Coefficients de corrélation (R^2) entre paramètres de flux solide et variables hydrologiques (Poro amont, 2009-2012, n = 60)	50
Tableau 12 : Flux annuels de MES sur les stations de Poro	51
Tableau 13 : Episodes sélectionnés pour la modélisation HEC-HMS	55
Tableau 14 : Répartition des épisodes par classe et paramètres de calage de chaque classe	56
Tableau 15 : Caractéristiques des décanteurs FRN01 et FRN1_ de Poro.....	59
Tableau 16 : Caractéristiques des épisodes pluvieux.....	69
Tableau 17 : Caractéristiques hydrologiques des réponses des bassins versants	70
Tableau 18 : Concentrations observées et flux calculés pour l'épisode FREDa.....	71

1 Introduction

1.1 Origine du projet, contexte et motivation

Dans son appel d'offres de 2009, le CNRT "Nickel et son environnement" notait que les milieux naturels calédoniens subissaient, du fait de l'activité minière, de fortes dégradations dont l'essentiel est "lié à une mauvaise gestion du ruissellement sur les surfaces dénudées et du stockage des stériles sur les mines anciennes, avec comme conséquences dramatiques l'érosion irréversible des sols miniers et un transport solide exacerbé qui impacte à long terme tous les milieux en aval". Ce constat a conduit au lancement d'un appel à projets sur le thème " *Fonctionnement des petits bassins versants miniers*". Sous l'impulsion de l'Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC), un consortium s'est constitué pour répondre au mieux aux questions scientifiques et opérationnelles que pose la gestion des eaux et des sédiments dans les bassins versants miniers. Ce consortium réunissait outre l'UNC, pilote du projet, le Cemagref (Unité de recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches – ETNA - du centre de Grenoble), METEO- FRANCE (DIRNC), l'IRD (UMS Espace), l'Université de la Réunion et un bureau d'études local, A2EP. Ce groupe s'est organisé pour répondre à la demande ainsi formulée : " *En l'absence de données in situ sur les phénomènes de ruissellement et d'érosion, le CNRT « Nickel et son environnement » appelle à soumettre des projets pour une méthodologie, une mise en œuvre et une mutualisation d'acquisition de données et de suivi des principaux paramètres hydrologiques (pluie - débit - transport en solution et solide) sur des sites pilote représentatifs de la variabilité de fonctionnement des bassins versants miniers*".

Le projet proposé par ce consortium a été retenu par le CNRT, sous réserve de certaines modifications et il a été financé pour une durée de 4 ans à partir du printemps 2010. Il sera dénommé ci-après projet CNRT-PBVM.

1.2 Définition du rôle d'Irstea à l'intérieur du projet

En cours de projet, le Cemagref est devenu Irstea. C'est donc l'UR ETNA d'Irstea qui a poursuivi les travaux. A l'intérieur du projet global (chapitre II.3.3.2 du texte final), Irstea participe aux tâches suivantes :

- Développer et tester les capteurs et les méthodes de mesure adaptés au contexte minier de Nouvelle-Calédonie (avec le PPME de l'UNC)
- Préciser les protocoles d'acquisition de données, élaborer un plan qualité de l'obtention et de la gestion des données, puis gérer les données obtenues au cours des quatre années du projet (avec A2EP)
- Caractériser les matières en suspension exportées par ces petits bassins naturels ou modifiés par l'exploitation minière (avec le PPME de l'UNC)
- Préparer la régionalisation des résultats obtenus sur les bassins versants instrumentés en intégrant des données satellitaires, des données météorologiques, les MNT, les données hydrologique et les données de milieu dans un système d'information géographique (avec l'US Espace de l'IRD et le PPME de l'UNC)
- Recenser et synthétiser les données disponibles sur les flux d'eau et de sédiments dans les bassins miniers dans les séries temporelles du passé et dans les différentes études et expertises conduites sur les bassins miniers (avec le PPME)
- Réaliser des modélisations hydro-sédimentaires des épisodes pluvieux significatifs permettant de schématiser le fonctionnement des bassins étudiés, de généraliser les résultats et de quantifier les effets d'aménagements sur les réponses hydrosédimentaires (avec le PPME et l'IRD)

La revue d'offres du Cemagref (Irstea) précise le contenu de sa mission :

- assistance technique pour le choix, l'instrumentation, la maintenance et le suivi des bassins et sites de mesure

- analyse géomorphologique des creeks et de leurs bassins versants
- mise en œuvre de modélisations hydro-sédimentaires
- participation à la formation des partenaires calédoniens, et transfert de compétences, dans le domaine du transport de sédiments à forte pente

Le présent rapport s'attachera à restituer les résultats d'Irstea sur ces points clés de son intervention. Il s'agira notamment d'identifier les avancées et les éventuels manques dans les réponses aux questions scientifiques identifiées par Irstea :

- Quels sont les flux d'eau et de sédiments en provenance des bassins miniers ?
- Quelle est la réponse d'un bassin minier à un épisode pluvieux, notamment cyclonique ?
- Quels sont les facteurs qui contrôlent ces réponses ?
- Quels sont les processus en jeu ? Lesquels sont dominants dans les différentes situations hydrométéorologiques ?
- Quels sont les caractéristiques des matériaux transportés (MES notamment) et comment ces caractéristiques influencent-elles leur mise en mouvement, leur transport, leur sédimentation ?
- Quels sont les impacts de ces flux ?
- Quels sont les moyens d'action pour limiter les impacts ?
- Comment modéliser le fonctionnement actuel et les effets des aménagements futurs (nouvelles exploitations, travaux de protection) ?
- Comment prendre en compte les effets d'échelle –taille du bassin versant- dans les processus de transfert ?

Dans l'enveloppe globale du projet (260 000 € soit 31 M CFP), la part revenant à Irstea s'élève à 72 800 €, soit 28%. La dépense principale est représentée par les missions (15 missions pour un total de 60 000 €) auxquelles s'ajoutent deux stages de niveau master (4 800 €) et des frais de fonctionnement (2 000 € par an soit 8 000 €).

2 Déroutement du projet, missions assurées par Irstea

La participation d'Irstea au projet s'est étalée sur la période 2010-2014. Les activités principales ont été réalisées au cours de missions sur le territoire (15 missions en tout) complétées par des activités scientifiques au centre Irstea de Grenoble. A la demande du pilote du projet (UNC) et en concertation avec le directeur du CNRT, le programme de missions initialement prévu a été infléchi. La proposition initiale envisageait cinq missions de trois personnes, deux la première année et une les années suivantes. Il a été demandé d'assurer une présence plus importante sur le territoire en réduisant le nombre des participants par mission mais en prévoyant des missions plus fréquentes et plus longues. Cinq missions de deux personnes et cinq missions d'une personne ont donc été effectuées. Une sixième mission d'une personne a été réalisée en février 2014 sur un financement complémentaire du CNRT.

Outre les deux stages Master prévus au projet, les personnels Irstea ont encadré 6 stages de niveau Master en lien avec ce projet : trois stages de la partie UNC du projet et trois stages du programme Hydromine dont les activités sur le site pilote de Poro étaient étroitement liées au projet. Enfin des actions d'animation (groupe instrumentation) et de formation (séminaires de formation hydrologie minière et transport solide) ont été conduites au cours de cette période. Un ingénieur-chercheur Irstea (Nicolle Mathys), plus particulièrement chargé du suivi sur les sites a rendu compte au moins une fois par an de l'avancée des travaux au comité de pilotage du projet (Didier Richard pour octobre 2013).

Le Tableau 1 rassemble les informations sur les travaux et missions d'Irstea. Il précise notamment le lieu des interventions et les chercheurs, ingénieurs et techniciens impliqués. Il mentionne également les documents liés à chacune des tâches et missions. A chaque étape du projet, des rendus intermédiaires, sous forme de diaporamas des restitutions au comité de pilotage ou des séminaires

de formation, de rapports et de soutenances de stage ont été déposés dans l'espace collaboratif dédié au projet sur le portail de l'UNC.

Les missions sur le territoire ont été majoritairement consacrées au choix des sites d'études, à la définition des équipements à prévoir ou à améliorer, au recueil des données auprès des compagnies minières ou de leurs sous-traitants, aux travaux en commun avec les partenaires du projet. Une grande partie des missions a également comporté l'encadrement de stagiaires (niveau M2 ou ingénieur) qui travaillaient à la fois sur les sites miniers et à l'UNC, notamment au laboratoire pour les analyses des échantillons recueillis. Le suivi année après année des stagiaires par la même personne a permis d'assurer la cohérence dans les méthodes employées et la continuité dans les démarches des travaux scientifiques.

Ces missions ont permis également des collaborations nombreuses et fructueuses avec les partenaires des différentes compagnies minières, tant pour le choix et la conception des stations de mesure que pour le suivi et l'interprétation des résultats. La création d'un groupe "instrumentation" à partir de janvier 2012 a permis de mettre en commun les expériences ou les difficultés rencontrées par les différents acteurs des suivis en milieu minier. Ce groupe a permis des échanges entre praticiens sur les sites, des visites réciproques d'installation et même des prêts de matériel.

Enfin, la mission de transfert prévue au projet a été assurée au travers d'appuis techniques ponctuels et surtout de séminaires de formation en hydrologie appliquée aux petits bassins versants miniers et en hydraulique de transport solide. Les documents pédagogiques du séminaire "hydrologie" sont disponibles en ligne sur le portail de l'UNC, de même que l'enregistrement vidéo des présentations (cf. Tableau 1).

Au-delà de ces deux chapitres (1 et 2) introductifs, le présent rapport s'articulera en six parties principales :

- le chapitre 3 fera un rapide tour des connaissances antérieures à cette étude sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des bassins versants impactés par l'activité minière.
- le chapitre 4 explicitera la démarche adoptée pour le choix des sites et décrira les dispositifs mis en place. Une place particulière sera accordée au site de Poro, déjà instrumenté dans le cadre du projet Hydromine, suivi depuis 2009 et qui constitue le site pilote du projet CNRT-PBVM.
- le chapitre 5 illustrera les données géographiques des sites étudiés qui ont été incluses dans un système d'information géographique (SIG) accessible sur le portail de l'UNC.
- le chapitre 6 analysera en détail les résultats obtenus sur le site de Poro dans le cadre du projet Hydromine puis du projet CNRT. Il présentera également les approches de modélisation qui ont été réalisées.
- le chapitre 7 rendra compte des observations sur les autres sites et, dans la mesure du possible, compte tenu des séries chronologiques disponibles, en analysera les résultats avec les méthodologies mises au point sur Poro.
- le chapitre 8 reviendra sur un point clé de la gestion des eaux et des sédiments en site minier, le fonctionnement des décanteurs, et donnera les résultats d'une étude exploratoire réalisée au cours de la saison cyclonique 2012.

Enfin, une conclusion générale tentera de résumer les acquis de ce projet, de pointer ses limites et de proposer des perspectives à la fois sur le plan de la recherche appliquée et de la gestion opérationnelle.

Tableau 1 : Déroulement des actions et missions de l'équipe Etna d'Irstea dans le projet

Année	Période	Lieu	Action	Participants Irstea	Documents et annexes
1	14-15/6/2010	Grenoble	Réunions de concertation pour démarrage du projet avec Michel Allenbach, à Grenoble	Didier Richard Nicolle Mathys Alain Recking Frédéric Liébault	Projet_CNRT_reunion_14juin.pdf
1	07-24/7/2010	Nouvelle-Calédonie, Nouméa et autres sites	Reconnaissance des sites, restitution au comité de pilotage	Didier Richard Nicolle Mathys	Restitution_juillet_2010_imp.pdf Com_pilotage_CNRT_08072010.pdf CR_mission_Cemagref_Juillet2010.pdf
1	Sept-déc. 2010	Grenoble	Définition des sujets de stage 2011, diffusion des offres, sélection des candidats, préparation des missions 2011 Documentation sur les capteurs (salon Pollutec)	Nicolle Mathys Didier Richard Alain Recking	sujets_BVminiersNC2011.pdf
1	4-31/1/2011	Nouvelle-Calédonie, Nouméa, Poro, Goro, Koniambo, Poum	Suivi site de Poro Choix des bassins et des équipements sur les autres sites Rassemblement de données hydrologiques et cartographiques Mise en place des stages 2011 (Laureen Carpentier et Pierre-Erick Alloin)	Nicolle Mathys	
1	Février 2011	Grenoble	Restitution à l'équipe ETNA, préparation mission suivante	Nicolle Mathys Didier Richard Alain Recking + reste de l'unité	Avancement_CNRT_Irstea_fev2011.pdf
1	Mars 2011	Nouvelle-Calédonie, Nouméa, Poro, Goro, Koniambo, Poum	Poursuite des discussions sur le choix des sites et les équipements. Visites et rencontres ciblées sur la question des décanteurs. Encadrement des stagiaires. Présentation de l'hydraulique torrentielle au PPME (Alain Recking) Restitution au comité de pilotage	Nicolle Mathys Alain Recking	presentation_NC_Recking.pdf Restitution_mars_2011_imp.pdf CR_mission_Recking_mars2011.pdf CR_mission_Mathys_2011_1.pdf
1	Mai-Juin 2011	Grenoble	Accueil des deux stagiaires à Grenoble, interprétation et mise en forme des résultats, aide à la rédaction des mémoires	Nicolle Mathys	
1	Juillet-sept 2011	Grenoble/Beauvais	Relecture des rapports de stage, participation aux	Nicolle Mathys	Laureen_Carpentier_2011.pdf

			soutenances		Pierre-Erick_Alloin_2011.pdf Laureen_Carpentier_sept2011.pdf
2	Octobre 2011	Grenoble	Bilan en équipe de l'année écoulée Préparation des sujets de stage 2012 et recrutement des stagiaires (ENGEES)	Nicolle Mathys Alain Recking Didier Richard	sujets_BVminiersNC2012.pdf
2	5-27/11/2011	Nouvelle-Calédonie	Bilan de l'avancement des suivis hydrosédimentaires. Participation au colloque "gouvernance minière" (présentation orale) Réunion du groupe projet (avec autres partenaires calédoniens) Restitution au comité de pilotage	Nicolle Mathys	Reunion_groupe_projet_nov2011.pdf Reunion_com_pilotage_nov2011_doc.pdf Mathys_Richard_Bart_NC_bilingue_doc.pdf Allenbach_Mathys.pdf
2	4-31/1/2012	Nouvelle-Calédonie	Suivi des sites de Poro, Goro, Koniambo, Poum Encadrement de stagiaires (Antoine Guyonneau et Lucie Navarrot) Constitution et réunion du groupe Instrumentation des petits bassins versants miniers	Nicolle Mathys	Reunion_instrumentation_janvier_2012.pdf
2	14/3 au 4/4/2012	Nouvelle-Calédonie	Suivi des sites Animation du groupe Instrumentation Encadrement des stagiaires Mise en place du stage d'Audrey Chillou sur les décanteurs Collaboration équipes PPME Restitution au comité de pilotage	Nicolle Mathys Audrey Chillou	Restitution_Irstea_mars2012.pdf CNRT_PBVM_exemples_installations.pdf
2	Avril-mai 2012	Nouvelle-Calédonie	Poursuite des travaux de terrain sur le thème des décanteurs	Audrey Chillou	
2	Mai-juillet 2012	Grenoble/Strasbourg	Encadrement des trois stagiaires, analyse et interprétation des données, rédaction des rapports de stage, participation aux soutenances Restitution à l'UR ETNA	Nicolle Mathys Alain Recking	Antoine_Guyonneau_2012.pdf Lucie_Navarrot_2012.pdf Audrey_Chillou_2012.pdf Antoine_Guyonneau_juillet2012.pdf Lucie_Navarrot_juillet2012.pdf
3	Aout-septembre 2012	Grenoble/Strasbourg	Soutenance Chillou Poursuite du travail d'interprétation des données et de modélisation statistique (en parallèle avec	Nicolle Mathys Lucie Navarrot (CDD)	Audrey_Chillou_sept2012.pdf

			Hydromine pour Poro)		
3	Novembre 2012	Grenoble/Draix	Prospection complémentaire concernant l'instrumentation (notamment turbidimètres); Rencontre de fournisseurs au salon Pollutec Visio-conférence comité de pilotage. Définition des sujets de stage et sélection des stagiaires	Nicolle Mathys Sébastien Klotz Didier Richard	restitution_Irstea_com_pilot_visio_nov2012.pdf sujets_BVminiersNC2013.pdf
3	Janvier 2013	Nouvelle-Calédonie Nouméa, Poro, Koniambo, Poum	Complément d'instrumentation sur les sites miniers (turbidimètre), suivi des sites et des mesures, évaluation de l'instrumentation (S. Klotz), Encadrement des stagiaires (Alexandre Motto et Perrine Freydier). Collaboration iRD sur résultats télédétection et modélisation de l'érosion.	Nicolle Mathys Sébastien Klotz	Turbi_poro.pdf CR_mission_Mathys_Klotz_2013_1.pdf
3	Mars 2013	Nouvelle-Calédonie Nouméa, Poro, Koniambo, Goro	Suivi des sites et recueil de données Encadrement des stagiaires Tenue d'un séminaire de formation sur l'hydrologie des petits bassins versants miniers à l'UNC Réunion du groupe Instrumentation Restitution au comité de pilotage	Nicolle Mathys	Seminaire_formationCNRT_2013_1_doc.pdf Seminaire_formationCNRT_2013_2_doc.pdf Seminaire_formationCNRT_2013_3_doc.pdf (conférence 1 et 2 téléchargeables sur le site de l'UNC en video) Restitution_mars_2013.pdf CR_mission_Mathys_2013_2.pdf
3	Mai-juin2013	Grenoble	Exploitation des données, encadrement des stagiaires, aide à la préparation des rapports de stage et aux soutenances	Nicolle Mathys	Alexandre_Motto_2013.pdf Perrine_Freydier_2013.pdf Alexandre_Motto_juin2012.pdf Perrine_Freydier_juillet2013.pdf
4	Juin-septembre 2013	Grenoble	Analyse et interprétation de résultats, modélisation statistique (Poro principalement, en lien avec Hydromine)	Nicolle Mathys	
4	Octobre 2013	Nouvelle-Calédonie Nouméa, Poro, Koniambo	Visite des sites et bilan des suivis Analyse et interprétation (fin des travaux) Réunions avec les partenaires Restitution au comité de pilotage	Didier Richard	Restitution_com_pilot_oct2013.pdf
4	Novembre 2013 Janvier 2014	Grenoble/Draix	Animation du groupe instrumentation Préparation d'une installation test pour Koniambo En collaboration avec Ponselle et Campbell	Nicolle Mathys Sébastien Klotz Hervé Bellot	

4	Février 2014	Nouvelle-Calédonie Nouméa, Poro, Koniambo	Animation du groupe Instrumentation Concertation avec les partenaires A2EP et Météo- France. Suivi de sites et recueil de données Restitution au comité de pilotage	Nicolle Mathys	Restitution_Irstea_fev2014_doc.pdf
4	Avril 2014	Grenoble/Vienne	Préparation d'une communication au congrès EGU à Vienne (poster)	Nicolle Mathys Perrine Freydier	Resume_EGU2014.pdf poster_EGU.pdf
4	Mars-juillet 2014	Grenoble	Encadrement de stagiaire M2 : modélisation hydrosédimentaire des petits bassins versants miniers (Muhamed Aksoy)	Didier Richard Nicolle Mathys	Muhammed_Aksoy_2014.pdf Muhammed_Aksoy_septembre2014.pdf
4	Juin 2014	Grenoble	Séminaire interne de restitution et de discussion des résultats	Nicolle Mathys Muhammed Aksoy	Seminaire_juin2014_Mathys.pdf seminaire_juin2014_Aksoy.pdf
4	Septembre 2014	Grenoble	Rédaction rapport final	Nicolle Mathys Didier Richard Alain Recking Perrine Freydier	
4	Oct-nov 2014	Nouvelle-Calédonie (à venir)	Mise en forme finale des données et mise en ligne sur le portail UNC Séminaire de formation Hydrologie Séminaire de formation Transport solide Séminaire final de restitution	Nicolle Mathys Didier Richard	

3 Fonctionnement hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers : état des connaissances

Préambule : une version révisée de cet état des connaissances est en cours et n'a pu être intégrée dans ce rapport. Elle sera intégrée dans une version révisée du rapport Irstea qui tiendra compte des observations des relecteurs.

Les transferts sédimentaires dans les bassins versants participent au fonctionnement physique et écologique des hydrosystèmes (Amoros et Petts, 1993). Les déséquilibres qui affectent les flux solides (MES et charge de fond) peuvent avoir des répercussions importantes sur les écosystèmes (Montgomery et Buffington, 1998 ; Page et al., 2000 ; Wantzen, 2006). L'analyse des données disponibles sur les transferts de sédiments des hydrosystèmes terrestres aux océans montrent que les activités humaines, et principalement l'agriculture, l'exploitation forestière et les activités minières, ont considérablement modifié les flux de matériaux au cours des périodes récentes (Walling, 2006).

Lorsque des suivis quantitatifs continus sont réalisés, on observe que l'essentiel des transports en suspension se produisent pendant les périodes de crue et dans le contexte tropical pendant les épisodes cycloniques (Baltzer et Trescases, 1971; Lenzi and Marchi, 2000). Les activités minières sont identifiées comme modifiant considérablement les quantités transportées dans les bassins affectés (Krishnaswamy et al., 2006).

Dans le cas des petits bassins versants miniers, les questions qui sont posées concernent l'impact de l'amplification des flux solides sur le fonctionnement des milieux aquatiques situés en aval. Les résidus de l'activité minière peuvent être à l'origine d'apports sédimentaires importants qui se propagent dans le réseau hydrographique sous forme de vagues sédimentaires (Gilbert, 1917 ; Knighton, 1989 ; James, 1991).

Les processus d'érosion actifs dans les bassins versants de Nouvelle-Calédonie impliquent des processus d'altération spécifiques sous climat tropical, des processus de versants liés à la vulnérabilité particulière des terrains, une érosion et des phénomènes de transport très actifs liés aux activités humaines (Beauvais et al., 2007; Danloux and Laganier, 1991; Laganier, 1994. Laganier, 1995).

Dans de nombreux sites, des mesures de protection, notamment par des barrages de sédimentation ou des travaux de revégétalisation sont réalisés mais on dispose de peu de données quantitatives pour juger de leur efficacité sur le transport, notamment pendant les épisodes extrêmes (Hancock et al., 2006). Dans les années 1970-1988, des suivis de transports solides en suspension ont été réalisés par l'ORSTOM sur des rivières calédoniennes mais les mesures pendant les fortes crues sont rares et les bassins investigués sont de grande taille (Danloux, 1985; Danloux, 1987). Les études plus récentes sur les transports en suspension portent essentiellement sur le devenir de ces matériaux dans le lagon (Douillet et al., 2001; Fernandez et al., 2006; Ouillon et al., 2004; Ouillon et al., 2008).

Dans les cours d'eau à forte pente, on n'observe généralement pas de relation stable entre concentration et débit ce qui rend impossible les méthodes dites "rating curve technique" où l'on applique une relation concentration-débit à la courbe des débits classés. L'observation de courbes d'hystérésis dans la relation concentration-débit est assez générale dans les petits bassins d'amont et les différents types de courbes d'hystérésis rencontrés ont été depuis longtemps définis et discutés (Alexandrov et al., 2003; Nadal-Romero et al., 2008; Williams Garnett, 1989). Dans des petits bassins versants, on a pu mettre en évidence une décroissance de la charge en suspension (wash load) au cours d'épisodes successifs, indépendamment de l'intensité de la pluie. Cette décroissance peut être attribuée à un épuisement du matériau disponible au cours d'une séquence d'épisodes pluvieux (Lopez Periago and Soto, 2004).

Ces observations sur l'évolution des charges solides impliquent une adaptation des protocoles de mesure. Outre l'utilisation de préleveurs d'échantillons avec des protocoles permettant une bonne exploration du déroulement des épisodes de crue, la mise en place de turbidimètres mesurant la charge solide en continu s'avère fructueuse. Cependant, la dépendance de la réponse des capteurs utilisés à la nature (couleur, granulométrie, etc...) des matériaux impose de conserver en parallèle turbidimètres et échantillonneurs (Downing, 2006 ; Mathys et al., 2007).

Modèles applicables au fonctionnement des petits bassins versants miniers

D'assez nombreux modèles d'érosion ont été développés depuis le milieu du XX^e siècle, mais peu sont spécifiques à l'érosion des bassins versants miniers, sauf SIBERIA (Hancock et al, 2006). Les facteurs de l'érosion devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier et Smith, 1978 ; King et Le Bissonnais, 1992 ; Le Bissonnais, 2002).

Il existe principalement trois types de modèles permettant d'estimer l'érosion :

- les modèles empiriques ou statistiques,
- les modèles conceptuels,
- et les modèles à base physique,

Des trois types de modèle, les modèles empiriques sont les plus simples à mettre en œuvre (Aksoy et Kavvas, 2005). Ils requièrent peu de données en entrée contrairement aux autres modèles. Les modèles conceptuels décrivent les processus à l'échelle du bassin versant, sans pour autant rentrer dans les détails des interactions entre les différents processus à l'échelle du bassin versant. Les paramètres des modèles conceptuels sont généralement obtenus grâce à une calibration par rapport aux données observées. Beck (1987) a noté que les modèles conceptuels jouent un rôle d'intermédiaire entre les modèles empiriques et les modèles physiques. Les modèles physiques sont basés sur les résultats des équations régissant les écoulements et l'érosion. Bien que ces modèles permettent théoriquement la représentation la plus juste du phénomène en question, en pratique tous les paramètres n'étant pas facilement mesurables en direct, ils sont étalonnés à partir d'autres données observées. Une des autres sources d'incertitude de ces modèles (également source d'incertitude pour les autres types de modèles) provient des erreurs de mesures qui viennent s'ajouter aux incertitudes liées à la calibration.

L'**USLE** : the Universal Soil Loss Equation, est un modèle empirique a été développé dans les années 70 par l'USDA (United States Department of Agriculture). D'après ce modèle l'érosion est une fonction multiplicative comportant cinq facteurs :

$$\text{USLE : } \quad \dot{A} = R * K * C * L * S * P$$

Avec : \dot{A} : perte annuelle de sol [t.ha⁻¹],

R : facteur d'érosivité des précipitations [MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹],

K : facteur d'érodabilité des sols [t.h.M⁻¹.mm⁻¹],

C : facteur adimensionnel fonction de la couverture végétale et des pratiques culturales,

L : longueur de pente,

S : inclinaison de pente [%],

P : facteur adimensionnel lié aux pratiques de conservation des sols.

Différentes formules ont été établies en fonction des nécessités de la zone d'étude, pour chacun de ces facteurs.

De par sa simplicité de mise en œuvre et du peu de données nécessaires à sa mise en application, ce modèle a été très largement exploité de par le monde. Il a servi de base à l'établissement de modèles plus complexes. Il a également été modifié à de nombreuses reprises, afin de permettre son application à un plus grand nombre de situations.

Étant initialement établie pour les États-Unis, l'USLE a été révisée afin de l'améliorer et de permettre son application à d'autres contrées. Ainsi la version « **RUSLE** » prend en compte le dépôt

sédimentaire ayant lieu au cours du ruissellement. Ayant prouvé son efficacité dans un grand nombre de cas, cette nouvelle formulation sert de référence dans l'étalonnage de nouveaux modèles tel que le modèle SIBERIA (Hancock et al, 2008).

Initialement le modèle USLE n'est pas un modèle événementiel, il permet seulement l'estimation de l'érosion annuelle. Cette lacune a été comblée par une modification apportée à l'équation de base. Cette nouvelle formule nommée MUSLE permet de calculer l'érosion à l'échelle de l'averse et a été retenue pour le travail de modélisation.

LASCAM (Large-scale catchment model)(Meritt et al., 2003), est un modèle conceptuel, capable de prédire sur le long terme les flux d'eau, de sels, de sédiments et de nutriments véhiculés par l'eau. Ce modèle nécessite la division du bassin versant en sous-bassins. Les calculs sont effectués à l'échelle du sous-bassin puis les résultats sont agrégés pour obtenir la réponse globale du bassin versant. Les données que l'on entre dans le modèle sont : la distribution spatiale de la pluie journalière, l'évaporation, les données concernant l'utilisation des terres, et les données topographiques. Par ailleurs il est nécessaire d'avoir des mesures de débit, et de charge sédimentaire afin de caler le modèle. Vinay et al. (1999) ont incorporé une adaptation de l'USLE dans ce modèle afin de pouvoir prédire le flux sédimentaire. Les valeurs entrées permettent d'obtenir en sortie : le ruissellement de surface et de subsurface, l'évaporation réelle, la recharge de la nappe phréatique, le débit de base, l'humidité du sol, les flux de sédiments, les flux de nutriments, et les flux de sel. Ces valeurs sont fournies pour chaque sous-bassin et l'ensemble du bassin versant. Ce modèle a été développé pour l'Australie (pays disposant de mines d'uranium à ciel ouvert sur lesquelles de nombreuses modélisations ont été effectuées). Il peut donc a priori convenir pour une utilisation en Nouvelle-Calédonie pour une modélisation sur le long terme.

WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Nearing et al., 1989) est un modèle à base physique. Il a été développé grâce à la collaboration de plusieurs agences gouvernementales des États-Unis (le Service de recherche agricole, le Service en charge de la conservation des sols, le Service en charge des forêts du ministère de l'Agriculture et le service en charge de l'aménagement du territoire au ministère de l'Intérieur). Le modèle a été appliqué sur de nombreux versants aux États-Unis et dans le monde entier (Laflen et al., 1991 ; NSERL, 1995). Le modèle a été conçu pour déterminer et /ou évaluer les principaux mécanismes contrôlant l'érosion hydrique, y compris les impacts d'origine anthropique. Ce modèle propose en sortie l'estimation spatiale et temporelle de l'érosion, le rendement sédimentaire, la granulométrie des sédiments, les éventuels dépôts sédimentaires, les volumes de ruissellement, et le ratio entrée / sortie d'eau dans le sol (évaporation, précipitation...). Pour pouvoir produire ces données il requiert : une description très détaillée de la couverture végétale (taux de croissance, variété, zone racinaire, hauteur, indice foliaire...), les volumes de ruissellement de surface, la rugosité hydraulique, le temps de concentration, le débit de pointe, les pratiques de gestion du sol, l'altération, la consolidation du sol, les précipitations, la rugosité du sol, la densité apparente, la conductivité hydraulique à saturation, les facteurs d'érodabilité.

Le modèle **SIBERIA** a semblé intéressant dans un premier temps pour le contexte calédonien, de nombreuses modélisations sur des sites miniers australiens (contexte climatique similaire à la Nouvelle-Calédonie) ayant été effectuées avec ce code. Cependant ce logiciel est destiné à la modélisation de l'évolution géomorphologique d'un site minier (le pas de temps minimum étant d'une année) plus qu'à l'effet érosif d'un événement (averse) donné.

Le modèle SIBERIA utilise un MNT pour calculer la longueur et l'angle de la pente contrairement au modèle RUSLE, il peut par ailleurs représenter les éventuelles dépositions de sédiment, là où l'USLE ne prend en compte que l'érosion. Ce modèle permet de calculer directement l'érosion globale contrairement au RUSLE ou il faut séparer le BV en secteurs homogènes, puis sommer le résultat des différents éléments.

Le modèle **MUSLE** a été récemment ajouté au logiciel de modélisation pluie débit HEC-HMS. HEC-HMS est à la base un logiciel qui permet (grâce à une fonction de production et de transfert) de

transformer une pluie brute en hydrogramme de crue. Il calcule donc automatiquement les paramètres Q (volume de ruissellement) et q_p (débit de pointe) à partir des valeurs de précipitations dont il dispose. Avec le nouveau module MUSLE qui a été intégré au logiciel, il suffit d'entrer les paramètres USLE de même que la pluie brute pour obtenir le flux sédimentaire.

Le modèle **KINEROS** est un modèle mathématique distribué à base physique. Il intègre les processus d'interception, d'infiltration, d'écoulement de surface et d'érosion. Kineros est une extension du modèle Kingen développé par Rovey et al. (1977) auquel a été ajoutée la composante d'érosion et de transport sédimentaire. Le bassin versant est composé d'un assemblage de parcelles et de canaux. D'après un certain nombre d'études (Goodrich, 2012, Jaoued et al. 2005, Lajili-Ghezal et al. 2003), le modèle Kineros donne de très bons résultats en modélisation événementielle sur de petits bassins versants.

4 Les sites retenus pour le projet CNRT

4.1 Principe de la démarche, recherche de sites en 2010 et sites retenus dans la suite du projet

L'objectif principal du projet est "d'améliorer la compréhension des mécanismes de fonctionnement et de quantifier les flux en amont pour une minimisation de l'impact du transport solide en aval, dans les différents contextes géo-morpho-climatiques des petits bassins versants impactés par l'activité minière en Nouvelle-Calédonie" (Version révisée de la proposition).

Le projet prévoyait donc de mettre en place des mesures des différentes composantes des crues torrentielles sur un bassin versant minier. Ces mesures devaient être réalisées principalement sur le site du bassin expérimental de Poro déjà instrumenté dans le cadre du projet Hydromine, mais également sur plusieurs petits bassins versants équipés par les sociétés minières, sur la base du volontariat de ces compagnies, afin de pouvoir rendre compte de la variabilité des conditions de fonctionnement des bassins versants miniers.

L'équipe ETNA d'Irstea (Cemagref au démarrage du projet) a acquis depuis 1983, une expérience solide de mesures hydrosédimentaires sur le site de Draix, dans les Alpes du Sud. Ce site dédié à l'amélioration des connaissances sur l'hydrologie et le transport solide dans les petits bassins versants de montagne, comporte plusieurs bassins versants équipés pour la mesure des précipitations, des débits liquides et des transports solides, en charriage et en suspension. Ce site a également été utilisé pour la mise au point de méthodes de mesures et le test de capteurs adaptés au contexte des torrents de montagne en érosion active. Compte-tenu de son expérience, l'implication du Cemagref-Irstea/ETNA dans le projet CNRT-PBVM portait donc tout particulièrement sur l'assistance technique pour le choix, l'instrumentation, la maintenance et le suivi des bassins et sites de mesure. Par ailleurs, la DAVAR et l'UNC avaient acquis une expérience sur le site minier de Poro où deux stations de mesure sur des petits bassins versants emboîtés avaient été équipées en 2008.

Une première mission, en juillet 2010, avait donc pour objectif principal de choisir avec les compagnies minières partenaires les sites à équiper pour un suivi pluriannuel, de définir les équipements à prévoir et de préparer les protocoles de suivi. Elle permettait également de rencontrer les équipes du projet, le CNRT et les organismes pilotant les actions (DAVAR, DIMENC). Le principe initialement retenu était celui d'un couple de deux bassins versants sur chaque site, un bassin versant fortement impacté par l'activité minière et un bassin versant relativement intact, dans le même contexte géomorphologique afin de quantifier l'impact de l'exploitation minière sur les réponses des bassins tant en débit liquide qu'en transport solide. Ce dispositif idéal n'a pu être mis en place, soit parce que des contraintes extérieures au projet ne le permettaient pas soit parce que les bassins non impactés étaient trop différents sur le plan géologique ou morphologique des bassins impactés. Ce sont donc des bassins impactés par l'activité minière qui ont été retenus, avec un

impact plus ou moins fort selon les bassins. Ces particularités seront détaillées site par site dans les paragraphes suivants.

Les trois compagnies minières impliquées dans le projet sont : KNS, SLN, VALE. Le choix des sites a été discuté avec les responsables des services hydrologie et/ou environnement de ces compagnies.

4.1.1 VALE, choix de bassins versants sur le site de Goro

Le but de la visite de juillet 2010 était d'identifier au minimum deux bassins objets de suivi : un bassin impacté par l'activité minière et un bassin intact ou au moins peu impacté. La difficulté du site de Goro tient à l'importance des circulations souterraines qui rendent parfois difficiles l'identification de la zone réellement contributive d'un bassin versant donné.

La société Vale disposait déjà d'un certain nombre de sites instrumentés sur lesquels des chroniques au moins partielles existaient. Au-delà de la "paire" de bassins versants de référence, il semblait intéressant de valoriser les sites existants et les chroniques déjà archivées. Cependant, ceci a posé de nombreux problèmes par la suite liés notamment aux lacunes dans les séries de données et à l'absence de validation des chroniques passées.

Les deux bassins proposés à l'issue de ces visites et discussions étaient Wadjana (bassin intact) et KN1 (bassin impacté mais modérément). Sur le site de Wadjana, un ancien seuil était présent mais insuffisant. Suivre ce bassin impliquait donc de construire un nouveau seuil et d'y installer l'instrumentation nécessaire (échelle, limnigraphe, turbidimètre et préleveur d'échantillon). Le bassin assez homogène, non impacté sauf par quelques pistes, accessible même si l'accès est assez long semblait idéal pour représenter le bassin de référence (Figure 1). Malheureusement, pour des raisons extérieures au projet, liées à des projets de modification de captages d'eau potable dans le secteur, cet aménagement n'a pas pu voir le jour pendant la durée du projet CNRT.



Site de Wadjana, vue générale



Site de Wadjana, seuil existant



Site KN1, section naturelle avant travaux

Site KN1, nouveau seuil à partir de 2011 (KN15)

Figure 1 : Stations et sites d'intérêt de Goro

Le site KN1 (devenu ultérieurement KN15) était déjà partiellement équipé (ISCO avec une mesure de niveau par capteur de pression + capteur multiparamètre) sur un seuil rocheux naturel. Un nouveau seuil a été construit début 2011, mais la forme du seuil en béton, très large, non linéaire et implanté en oblique sur l'axe du cours d'eau pose des problèmes pour l'établissement d'une relation hauteur-débit dès lors que la section en V est en débordement (Figure 1, en bas). Si les faibles débits sont connus avec une précision correcte, les forts débits, qui sont les plus intéressants pour l'estimation des flux de sédiments en crue, sont mal connus. Ce bassin est en fait peu impacté par l'activité minière elle-même, les matériaux transportés venant plutôt de la voie de roulage. L'ouvrage de franchissement de cette voie de roulage est équipé d'un décanteur dont le suivi (volumes déposés, granulométrie des matériaux) serait utile pour approfondir le fonctionnement du bassin.

Au cours des différentes visites de concertation sur le site (2011 puis 2012), un autre bassin a été proposé par les équipes hydrologie de Vale, le bassin KO5 sur lequel est implantée la station KO6, dont la construction date de la même période que KN1/KN15. Le seuil de cette station pose les mêmes problèmes que celui de KN15, avec une section en travers de la zone de débordement encore plus large et moins rectiligne. De plus, ce site n'est pas facilement accessible en période pluvieuse : les opérateurs ne peuvent pas s'y rendre en toute sécurité et les données de préleveur sont de ce fait rares.

Pour pallier le manque de données exploitables par le projet, des données d'une dernière station (KN14), située sur le déversoir du grand barrage de sédimentation dit BSKN, nous ont été fournies. Mais la taille du bassin et la situation à l'aval de ce barrage de sédimentation rendent ce site trop différent des autres sites du projet pour que les données soient valorisables dans le cadre de cette étude. Néanmoins, les données de ce site ainsi que du site situé à l'exutoire de la zone sur la Kwé (station KAL) présentent un intérêt pour la connaissance hydrologique de la zone. Une bonne qualité de recueil, de critique et d'archivage des données qui y sont obtenues sera donc capitale.

La pluviométrie du site de Goro est mesurée sur plusieurs postes gérés par Météo-France pour le compte de Vale. Ces postes sont suffisamment bien répartis sur le site pour accéder à une bonne connaissance de la variabilité spatiale des précipitations et il n'a pas été jugé utile de compléter le réseau pour le projet CNRT-PBVM.



Station KO6 sur le creek KO5

Station KN14 sur le seuil de BSKN

Figure 2 : stations complémentaires sur le site de Goro

4.1.2 KNS : Choix de bassins versants sur le site de Koniambo

Le site de Koniambo disposait déjà en 2010 d'un certain nombre de sites de mesure installés pour un suivi environnemental préalable à la mise en exploitation du site. Le choix des implantations et des dispositifs a été réalisé dans le cadre de sous-traitances. Certains équipements sont assez élaborés (notamment les sites sur la RT1 avec des dispositifs permettant le jaugeage) mais le suivi au cours du temps n'a pas été totalement assuré. Les stations sur la RT1, qui seraient intéressantes pour faire des estimations de flux globaux ne sont plus équipées du fait de dégradations fréquentes. De plus, les ouvrages sont sur des sections à fort charriage dont les dimensions sont variables dans le temps (forte "respiration" des lits en fonction des dépôts et reprises), ce qui rend instable les courbes de tarage et difficile la mise en place de prélèvements (Figure 3).

Deux très petits bassins, proche des zones sources ont été repérés dans un premier temps, sur le bassin de la Pandanus (SW34, 0.48 km²) et de la Coco (SW35, 0.37 km²). Ces bassins sont équipés de seuils trapézoïdaux en acier inoxydable, avec un capteur de niveau et un préleveur d'échantillons opérationnels (Figure 3).



Station Pandanus amont (SW34)



Station Coco amont (SW35)



Station limnigraphique "Coco aval" sur RT1

Station "camp des chinois" SW25

Figure 3 : stations et sites d'intérêt de Koniambo

Ces deux bassins ont été identifiés comme assez fortement impactés dès le début de projet ou à court terme. D'autres sites ont été recherchés, notamment parmi les sites déjà équipés au cours d'une mission en mars 2011. Il semblait particulièrement intéressant de rechercher des bassins emboîtés sur le bassin de la Coco, parmi lesquelles la station SW25 dite "du camp des chinois" (Figure 3). Mais cette station est implantée sur un seuil rocheux naturel difficile à jauger, d'autant plus que l'accès est périlleux, notamment en période pluvieuse. Enfin, un sous-bassin non anthropisé (préservé pendant au moins 5 ans) et accessible de la Coco a été recherché. Des sites ont été repérés en rive droite, mais ils posaient des problèmes d'accès. De plus, le substratum risquait d'y être différent. Un dernier bassin, SW39, dans le bassin de la Pandanus aurait pu convenir car, même s'il garde des traces d'exploitation ancienne il ne sera plus impacté parce qu'il est dans le périmètre de protection d'un captage. Après discussion, il s'est avéré inadapté car les aménagements nécessaires au complément d'équipement (seuil béton, accès) n'auraient pas été acceptés par les riverains.

La recherche des stations adaptées au projet a donc été longue et parfois peu fructueuse. Afin de permettre une progression dans le travail d'analyse hydrologique, les deux stations SW34 et SW35 ont été "définitivement" retenues au début de la saison cyclonique 2012 (stage Antoine Guyonneau) et il a été décidé que, pour cette saison, les prélèvements d'échantillons relevés par KNS seraient traités, pour les mesures de MES, par le stagiaire, au laboratoire de l'UNC, afin de disposer le plus rapidement possible de données exploitables. Malheureusement, de nombreux problèmes se sont révélés en cours de projet qui sont venus compromettre le choix des stations. Au-delà des problèmes liés au canal de mesure lui-même et à son instrumentation (65), ce sont les aménagements liés à l'exploitation minière qui ont exigé de nombreuses visites de terrain et échanges d'informations avec les équipes de KNS. Sur le bassin SW34, un bassin de rétention a été aménagé à l'amont, il ne modifie pas les conditions d'écoulement dans la station mais introduit un fort laminage des crues pour les épisodes faibles et moyens. Le bassin SW35 se trouve, lui, dans un secteur intensément modifié à partir de la seconde année du projet (Figure 4) : décapages et ouvertures de pistes (2011-2012), mise en place d'une verse juste en amont (2011), construction d'un barrage de sédimentation juste en aval (2012) puis surélévation de la digue (mai 2012). En 2012, il avait été convenu de conserver cette station qui aurait permis de quantifier les effets de ces aménagements intenses. Il subsistait un doute sur l'influence amont qu'exerçait la digue. Cette influence s'est confirmée par l'examen des données (cf.7.2) puis par les relevés topographiques complémentaires de KNS. Il a donc fallu renoncer à l'utiliser et les stations SW36 et SW38 ont été proposées par KNS et remises en service. Quelques données de crue ont pu être obtenues sur cette station en 2014.



Figure 4 : Panorama des bassins versants. (a) depuis l'amont de SW35 (b) depuis l'aval de SW34 (Motto A., 2013).

La pluviométrie du site de Koniambo est mesurée par un réseau assez dense de postes pluviométriques (appareils Précis-mécanique et centrales Danae, identique à ce qui est implanté à Poro). Cette densité de postes permet une bonne connaissance de la variabilité spatiale des précipitations et il n'a pas été nécessaire d'ajouter des postes supplémentaires pour le projet CNRT-PBVM.

4.1.3 SLN : Choix de bassins versants et équipement du site de Poum

Contrairement aux autres compagnies minières qui ont l'ensemble de leur exploitation sur un site unique, la SLN, compagnie historique exploitant le Nickel en Nouvelle-Calédonie, doit gérer un grand nombre de sites répartis sur plusieurs régions de la Grande-Terre. Choisir un site pour les objectifs du projet CNRT représentait donc une difficulté supplémentaire. A l'issue des premières discussions, deux sites sont apparus dignes d'intérêt, situés sur la côte Ouest :

- Tiebaghi qui présentait l'intérêt d'être au démarrage d'une intensification de l'exploitation et de permettre de suivre la modification des débits liquides et solides introduits par les modifications des bassins versants
- Poum qui disposait déjà de sections de mesure aménagées récemment pour des besoins de surveillance de captages AEP

Une première mission de reconnaissance a donc été réalisée sur ces deux sites en juillet 2010.

Sur le **site de Tiebaghi**, le bassin versant "Cascade" présentait de multiples intérêts et était déjà équipé de seuils en V dans le cadre d'une étude hydrogéologique. Mais ces sites présentent des difficultés d'accès. Le site de Cascade amont est équipé d'un petit seuil en V, correct pour les bas débits mais dont la section en débordement est complexe, ne permettant pas une bonne estimation des débits (Figure 5). D'autres sites à proximité pourraient être équipés mais ils présentent le même problème de difficulté d'accès. Il semblerait cependant possible d'aménager la piste jusqu'à une distance raisonnable de la station de mesure. Ce site présente donc un intérêt sur le plan hydrologique mais compte-tenu des délais pour résoudre les questions d'accès, il n'a pas été retenu pour le projet CNRT-PBVM. Il restera un site à recommander si la SLN souhaite augmenter son parc de stations de suivi hydro-sédimentaire.



Cascade, seuil amont en V, et seuil de débordement



Cascade, amont du seuil en V, site approprié pour la construction d'une station



Seuil pour captage d'eau, site potentiel de mesure



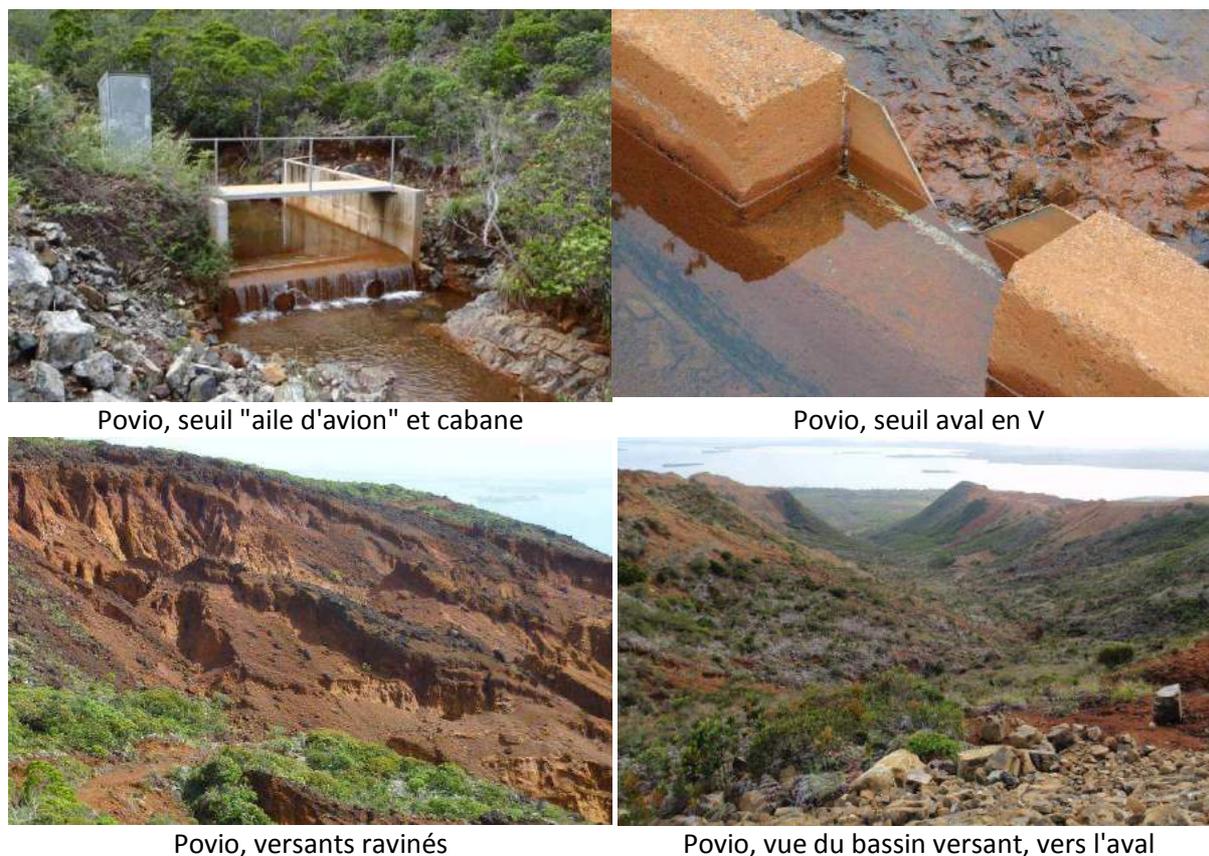
Vue Rive droite du BV Cascade

Figure 5 : Sites inventoriés sur le bassin Cascade et vue générale du site

Le **site de Poum** semblait au premier abord moins intéressant car la mine de Poum, "récupérée" récemment par la SLN n'est pas actuellement en exploitation active. La SLN prépare le terrain pour l'exploitation à venir et y conduit principalement des travaux d'"environnement". Deux bassins versants, Povio (0.99 km²) et Titch (0.78 km²) sont équipés de canaux rectangulaires avec seuil "en aile d'avion" à l'amont desquels ont été aménagés des pièges à sédiments. Même s'il reste des difficultés d'accès en période pluvieuse, les deux sites sont accessibles en 4x4 par des pistes. Les stations ont en outre des passerelles qui faciliteraient les opérations de jaugeage. Les seuils rectangulaires sont doublés de petits seuils en V à l'aval pour le contrôle des faibles débits (Figure 6). Les deux bassins sont impactés par l'activité minière mais le bassin Titch est pour le moment plus épargné. Les seuils sont équipés pour la mesure des niveaux de capteurs de pression "Diver" qui sont plus adaptés à la mesure en piézomètre. L'équipement des stations a dû être complété pour la mesure des concentrations (préleveurs d'échantillons). Compte-tenu du risque important de vandalisme, les équipements complémentaires ont été installés dans des cabanes sécurisées en acier galvanisé avec des goulottes pour les capteurs de niveau et tuyaux de prélèvement. Une goulotte a également été préparée pour accueillir ultérieurement un turbidimètre (placé quelque temps pour des tests en 2013).

Un poste pluviométrique géré par Météo-France était déjà présent sur le site au début du projet. Les analyses de précipitations réalisées en 2011 (Alloin P.E., 2011) ont montré que la variabilité spatiale des pluies sur ce massif côtier pouvait être importante et ont conduit la SLN, sur nos recommandations, à compléter le réseau de pluviomètres par deux appareils précis-mécanique associés à des centrales d'acquisition Danae (identiques à ce qui existe sur Poro et Koniambo). Des

descriptions complémentaires des équipements sont disponibles dans les documents mentionnés sur le Tableau 1.



Povio, seuil "aile d'avion" et cabane

Povio, seuil aval en V

Povio, versants ravinés

Povio, vue du bassin versant, vers l'aval

Figure 6: stations et sites d'intérêt de Povo

4.2 Un site pilote : le site de Poro

La proposition initiale approuvée par le CNRT indiquait : "A minima, le travail des différentes équipes sera mené sur le site du bassin expérimental de Poro, déjà instrumenté et suivi par le PPME-EA 3325 et la DAVAR dans le cadre de la convention pluriannuelle Hydromine (§ II.3.1)". Le site de Poro est donc considéré dans ce projet comme le "site pilote" : il bénéficie d'une antériorité dans l'équipement destiné à étudier le fonctionnement d'un bassin versant minier. Les dispositifs sont parfaitement adaptés aux objectifs.

4.2.1 Rappel sur l'origine du projet Hydromine

La convention Hydromine a été signée pour la première fois en 2007 puis renouvelée tous les ans, entre la Nouvelle-Calédonie (DAVAR et DIMENC), l'Université de Nouvelle-Calédonie (UNC) et le Centre de Formation aux Techniques de la Mine et des Carrières (CFTMC). Son objet général vise à la caractérisation des processus de ruissellement et au bilan des transferts sur un site pilote, représentatif des bassins versants miniers, localisé au CFTMC, à Poro. Les équipements de mesure ont été conçus et dimensionnés par la DAVAR après des études spécifiques (Frysoy, 2007). Construites et équipées au cours de l'année 2008, les stations de mesure ont été opérationnelles en décembre 2008. Les conventions successives ont régi les relations entre la DAVAR, le CFTMC et l'UNC pour la gestion et l'entretien des stations, la critique des données et l'interprétation des résultats. A partir de 2011, le Cemagref (puis Irstea) a été partie prenante indirecte de ce projet Hydromine car le site était devenu le site pilote du projet CNRT. Son action a consisté principalement à l'encadrement des stagiaires de l'UNC sur le projet (2011 et 2012), puis à l'analyse et l'interprétation des résultats, dans le cadre d'une sous-traitance par l'UNC de la rédaction d'une partie des rapports d'études. Un

financement complémentaire du CNRT a permis la poursuite du programme Hydromine sur la saison cyclonique 2013, permettant de compléter les résultats obtenus qui avaient fait l'objet du rapport final Hydromine.

4.2.2 Stations et équipements sur le site pilote de Poro

Les stations de mesure et les bassins versants sont décrits en détail dans le rapport final Hydromine (Irstea-UNC, 2014). Les éléments principaux seront repris ici car ils permettent de décrire la "station type" pour le suivi hydro-sédimentaire d'un petit bassin versant minier.

Les bassins versants sont localisés sur le massif de Poro, plus particulièrement sur la mine Française gérée par le CFTMC, située sur la commune de Houailou, en Province Nord, sur la côte est de la Grande Terre.

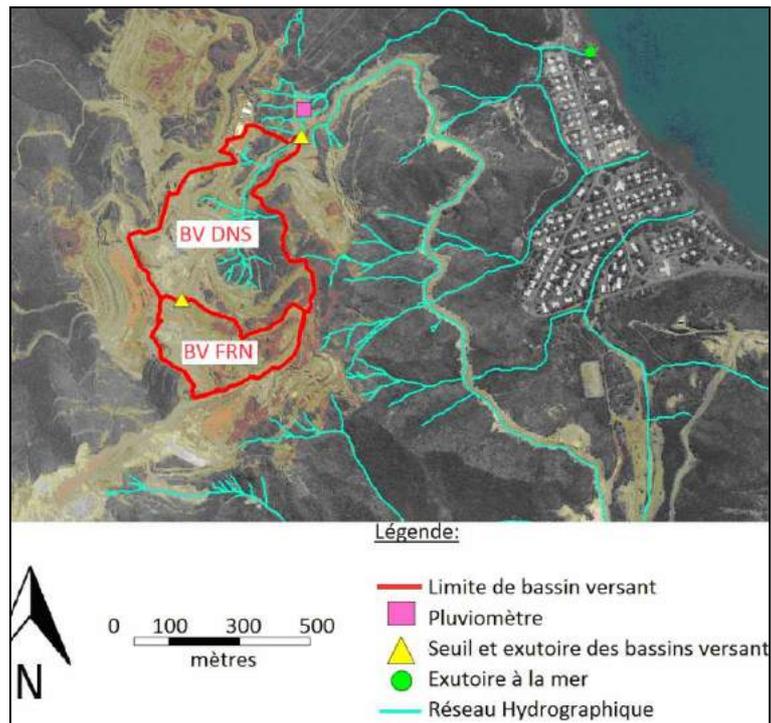
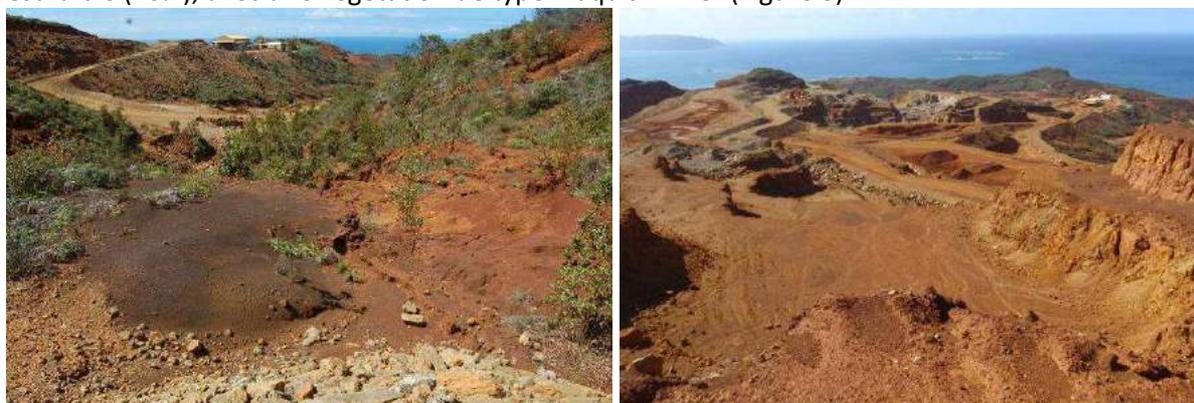


Figure 7 : Carte de localisation des bassins versants du site pilote de Poro (bassins FRN = Poro Amont, DNS = Poro Aval)

Deux bassins emboîtés, Poro amont (anciennement dénommé FRN), 0.09 km² et Poro aval (DNS), 0.04 km², sont équipés. (Figure 7). Ils s'étagent entre 200 et 366 m d'altitude. Le bassin versant de Poro amont est pratiquement dénudé tandis que le taux de couverture végétale du bassin Poro aval est faible (20%), avec une végétation de type maquis minier (Figure 8).

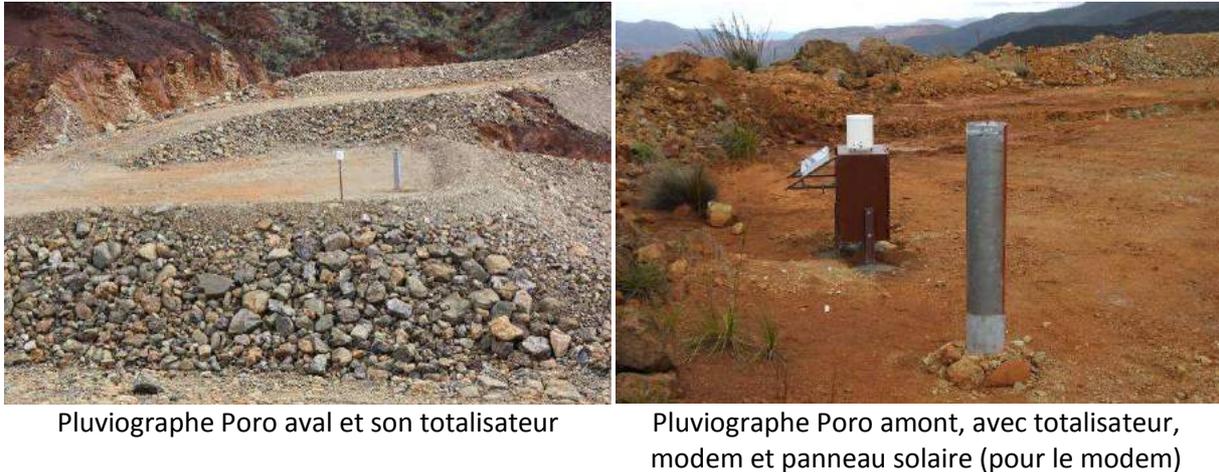


Bassin versant de Poro, vue vers l'aval

Secteur amont du bassin

Figure 8 : situation et couvert végétal des deux bassins de Poro

La **mesure des précipitations** est assurée par deux pluviomètres enregistreurs ou pluviographes (Précis-Mécanique, modèle de surface réceptrice 400 cm² et augets basculeurs de 20 g soit une résolution de 0.5 mm), situés à l'amont (455 m d'altitude) et à l'aval (200 m d'altitude) de la zone d'étude. Le pluviographe de Poro amont est également télétransmis par modem (alimenté par un panneau solaire) afin d'être consulté à distance. Ces pluviographes sont doublés de pluviomètres totalisateurs constitués d'un cylindre vertical dans lequel une fine couche d'huile permet d'éviter l'évaporation (Figure 9).



Pluviographe Poro aval et son totalisateur

Pluviographe Poro amont, avec totalisateur, modem et panneau solaire (pour le modem)

Figure 9 : Equipement des postes pluviométriques de Poro

La mesure des débits et des transports solides en suspension est assurée dans les deux stations limnigraphiques Poro amont et Poro aval. Afin d'assurer la stabilité de la relation hauteur-débit (courbe de tarage) un canal de mesure bétonné a été construit dans chaque station à l'issue d'une étude hydraulique (Frysoy, 2007) mais le canal de la station amont a finalement été réalisé avec une section moindre que prévue, nettement insuffisante pour les crues moyennes et fortes (Figure 10).

Les courbes de tarage, ont été établies par application d'un modèle hydraulique en régime permanent à un relevé détaillé de la géométrie des stations et des sections d'approche (DAVAR, modélisation sous HEC-RAS). Des jaugeages ont été réalisés en crue par les stagiaires en 2011 et 2012. Un capteur Doppler a été également utilisé pour des campagnes de mesures de vitesse en continu (Figure 11). Jaugeages et mesures Doppler ont permis de confirmer les courbes de tarage théoriques.



Station Poro amont

Station Poro amont en crue

Figure 10 : Station limnigraphique de Poro amont

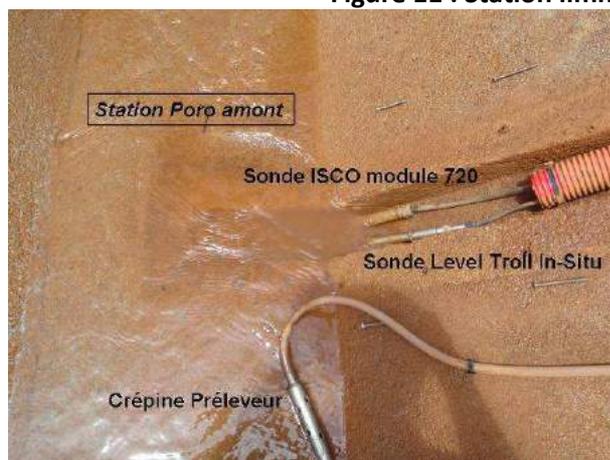


Station Poro aval



Station Poro aval avec capteur Doppler en place

Figure 11 : Station limnigraphique de Poro aval



Capteurs à l'intérieur du canal



Préleveur ISCO

Figure 12 : Capteurs et préleveur de la station Poro amont

Chaque section de mesure est munie d'une échelle à lecture directe. La mesure en continu des niveaux est assurée par une sonde de pression (sonde In Situ de modèle Level Troll 500). Un préleveur automatique ISCO 6712 d'une capacité de 24 flacons permet d'échantillonner les écoulements pendant les périodes de crue. Les prélèvements sont programmés par une seconde mesure de niveau connectée au préleveur (capteur de pression, module 720 ISCO). Cette seconde sonde pourrait suffire à l'enregistrement en continu des hauteurs d'eau. Elle est cependant un peu moins précise que la sonde in-Situ. Disposer de deux sondes sur la même section de mesure permet en outre de pallier les pannes de capteur (Figure 12). Ainsi, sur les stations de Poro, les lacunes de mesures de hauteur d'eau sont extrêmement rares. L'ensemble des appareils est placé dans une guérite en acier fermée par un cadenas (visible sur la Figure 11). Un panneau solaire et un régulateur permettent d'alimenter en continu la batterie nécessaire au fonctionnement du préleveur, la sonde In-situ étant, elle, autonome.

Début 2013, un turbidimètre a été mis en place sur la station de Poro aval afin de tester l'utilisation de ce type d'instrument pour mesurer la concentration en continu. Il s'agit d'un capteur à rétrodiffusion optique (WTW, Vi-Solid) qui permet de mesurer des turbidités élevées liées à des concentrations fortes (plusieurs dizaines de g/l). En effet, les capteurs généralement proposés par les constructeurs (ou en place sur les sites de Goro ou Koniambo) sont limités à 1000 ou 4000 NTU, ce qui correspond, selon les caractéristiques des matériaux, à des concentrations maximales de 1 à 5 g/l. Afin d'enregistrer les données, le capteur est relié à une centrale de mesure Campbell CR800 (Figure 13).



Installation de la sonde optique dans une goulotte Boitier ViSolid et centrale Campbell
Figure 13 : Installation d'un turbidimètre optique sur la station de Poro aval

4.3 Réalisation des suivis et données recueillies

4.3.1 Goro

Suivi

Le suivi des postes pluviométriques de Goro est assuré par Météo-France qui procède à la critique et à l'archivage des données.

Le suivi des stations de mesure des débits et des préleveurs est assuré par l'équipe hydrométrie de Vale. Les équipes de techniciens se rendent sur les sites après les crues afin de vérifier le fonctionnement des appareils, de prélever les données des centrales de mesure et de vider les préleveurs. La majorité des données sont télétransmises ce qui assure une certaine sécurité des données.

Données recueillies

Les données sont gérées au travers de deux logiciels de base de données adaptés à l'hydrologie, HYDRAS et WHISKY. Cependant, jusqu'à une période récente, les données n'étaient pas systématiquement critiquées et validées, sauf pour des périodes particulières pour lesquelles des synthèses hydrologiques étaient réalisées (ex bilan hydrologique du cyclone Vania, 2011). Ce sont donc souvent des données non validées qui nous ont été transmises.

Les données de **précipitations**, critiquées et validées par Météo-France sont disponibles pour trois postes Mine, Ancienne Pépinière et Usine du 14/2/2011 à fin 2012, au pas de temps de 6 minutes. En 2013, des synthèses ont également été fournies (S. Leclerc) avec un bilan de lacunes et les valeurs de pluie calculées sur des pas de temps horaire, journalier, mensuel et annuel pour les années 2011 et 2012 complétées par une synthèse des données antérieures. Des chroniques complémentaires plus anciennes sont en effet également disponibles au pas de temps de 15 minutes. Les chroniques disponibles sont résumées dans le Tableau 2.

Des données de hauteur d'eau sont également disponibles mais principalement pour les stations de grand bassin. Les bassins proposés dans le projet CNRT-PBVM, KN15 et KO6, ont pour le moment des séries relativement courtes et parfois en lacune (Tableau 3).

Les données de Concentration en MES sont disponibles principalement aux grandes stations mais peu de crues disposent de ces données pour les stations KN15 et KO6, introduites dans le projet (Tableau 3). Les crues pour lesquelles ces données étaient exploitables ont été analysées (Motto, 2013).

Tableau 2 : Données pluviométriques de Goro

Pluvio	Types	Dates	Commentaire
ancienne pep = SMAA	6 min	14/02/2011 - 11/03/2013	beaucoup de lacunes
	15 min	23/12/1996 -05/10/2010	
usine = SMAB	6 min	14/02/2011 - 11/03/2013	
	15 min	28/10/1998 - 01/11/2010	
mine = SMAC	6 min	14/02/2011 - 11/03/2013	
	15 min	23/12/1996 - 10/03/2008	
résidu	6 min	08/08/2011 - 11/03/2013	
gisement	6min	08/08/2011 - 11/03/2013	

Tableau 3 : Données de hauteur d'eau et de concentration disponibles pour le site de Goro

Nom	Autre nom	Surf BV km2	Hauteurs	MES	Commentaire
KAL	1A, KA 01	31.33	06/09/2006 -01/04/2012	oui	Kwé Principale, sortie de mine
KN14		10.54	01/10/2010 - 20/09/2012	oui	aval BSKN, remplace KNL
KOL	KO	11.96	26/10/2005-05/07/2012		KWE Ouest, beaucoup de lacunes, non visitée, quasi inexploitable
KN15	Bras KN1	2.11	Valable 05/01/2012 - 19/07/2012 Valeurs Nulles depuis 07/07/2011 - 27/11/2011	oui	Station CNRT MES très partielles
KO6	bras KO5	3.84	05/01/2012 - 21/03/2013 lacune dec 2011 ??		sur creek KO5
KNL	KN14		1995-2008	oui	Station dans le BSKN

4.3.2 Koniambo

Suivi

Le suivi des stations de Koniambo est assuré par le service Hydrologie qui sous-traite certaines opérations de maintenance ou de relevés des données à un bureau d'études local et par le service Gestion des eaux qui intervient notamment sur la conception et le suivi des ouvrages de décantation. C'est ce dernier service qui est à même de fournir des indications précieuses sur le fonctionnement hydraulique des bassins pendant les épisodes pluvieux. Les difficultés d'accès sur mine et les consignes de sécurité perturbent souvent le relevé des appareils après évènement et les préleveurs ne sont pas toujours opérationnels lors de la survenue d'une crue, faute d'avoir été vidés au préalable.

Données recueillies

Sauf sur les périodes très récentes, la majorité des données recueillies sont des données brutes. Dans le cadre de ce projet, ces données ont dû être critiquées par les ingénieurs et stagiaires Irstea avant analyse et interprétation. Ce travail de critique a occasionné des allers-retours entre l'équipe Irstea et le service hydrologique de KNS qui ont permis d'améliorer les dispositifs de mesure ou les protocoles.

Les données de **précipitations** sont disponibles sur un grand nombre de postes. Un certain nombre de périodes sont manquantes ou en anomalies et ont été mises en lacune pour les besoins de l'étude.

Les chroniques de **hauteur d'eau** ont été fournies par KNS pour les bassins SW34et SW35 tout

d'abord, puis pour SW36 et SW38. Compte-tenu des dysfonctionnements des appareils ou des périodes d'arrêt ces chroniques présentent de nombreuses discontinuités ou lacunes. Aucun jaugeage n'a été effectué et les **débites** sont calculés à partir des formules théoriques fournies par le bureau d'études Golder lors de l'installation. L'incertitude est donc très importante. Les résultats des analyses conduites à partir de ces données doivent être regardés à la lumière de ces fortes incertitudes.

Les données de **concentration en MES** sont de qualité variable selon la période. Dans le protocole standard mis en place à KNS, tous les échantillons étaient testés par un turbidimètre de laboratoire et seuls les échantillons dépassant un seuil de turbidité étaient analysés par séchage et pesée pour l'obtention des données de MES. Sur les bassins inclus dans le projet, tous les échantillons relevés sur SW34 et SW35 puis sur SW38 ont été analysés. Mais les incidents de préleveur ou les défauts d'échantillonnage pour cause de préleveur plein sont assez nombreux. A titre d'exemple, pour l'année 2012, 25 épisodes pluvieux ont été répertoriés. 8 ont été échantillonnés sur Sw34 et seulement 4 sur SW35.

4.3.3 Poum

Suivis

La SLN sous-traite au bureau d'études Mica, l'archivage, la critique et l'interprétation des données du site de Poum. Sur place, la maintenance du matériel est assurée par un autre sous-traitant de la SLN, Steeven Cogulet, qui assure les interventions d'urgence et la maintenance, est à même de procéder aux jaugeages ou aux observations de terrain, relève les échantillons dans les préleveurs et prélève les données des centrales. Certains décanteurs sont équipés de perche mais la pérennité de ces équipements n'est pas assurée car ils sont souvent déplacés ou endommagés lors des curages.

Données recueillies

Les données du site de Poum ont été fournies soit par la SLN pour les données pluviométriques du poste géré par Météo-France soit par le bureau d'études Mica pour les données de hauteur d'eau (et de débit) puis de pluie aux postes SLN et de concentrations.

Les données de précipitation au poste Météo-France sont disponibles au pas de temps de 6 minutes depuis 2009 mais avec des périodes de lacune.

Deux postes supplémentaires ont été installés début 2012 sur le site dans le cadre de ce projet. Les données relevées et validées par Mica sont disponibles depuis le 22 mars 2012. Comme pour Poro, ce sont les horaires de basculement (résolution 0.5 mm) qui sont archivés. Ils permettent le calcul des pluies horaires, journalières, mensuelles et annuelles.

Les données de niveau d'eau sont disponibles depuis 2010. Aucun jaugeage n'a été réalisé sur les seuils et c'est donc la courbe de tarage théorique établie par l'ORSTOM pour des seuils de ce type qui est utilisée pour la transformation des hauteurs d'eau en débit. De ce fait, l'incertitude sur les valeurs de débit est forte. Les chroniques permettent néanmoins d'étudier la dynamique de la réponse et de comparer les deux stations Povio et Titch.

Les données sont archivées par Mica dans des fichiers Excel. Les hauteurs d'eau et débits étant au pas de temps fixe de 5 min puis 2 min, les fichiers sont très volumineux, ce qui gêne considérablement leur utilisation. Le passage à une base de données adaptée à l'hydrométrie (Type HYDRAS de OTT) serait bénéfique. En l'absence de cet outil, l'archivage des données à pas de temps variable serait un minimum indispensable.

Les préleveurs d'échantillons ont été mis en place en 2012 avec l'appui d'A. Guyonneau pendant son stage. La configuration des seuils fait que seules les crues notables peuvent être échantillonnées. De plus, des incidents de fonctionnement ou une mauvaise accessibilité des stations pour vider les préleveurs n'ont pas permis d'échantillonner toutes les crues, notamment sur la station Titch. Les données de concentration ont été traitées au laboratoire de l'UNC pour la saison 2012 puis sous-

traités par la SLN à un laboratoire d'analyse en 2013 et 2014. Les données disponibles (Figure 14) débutent en mai 2012 à Povio (données de janvier 2012 correspondant à des prélèvements manuels) et en novembre 2012 à Titich.

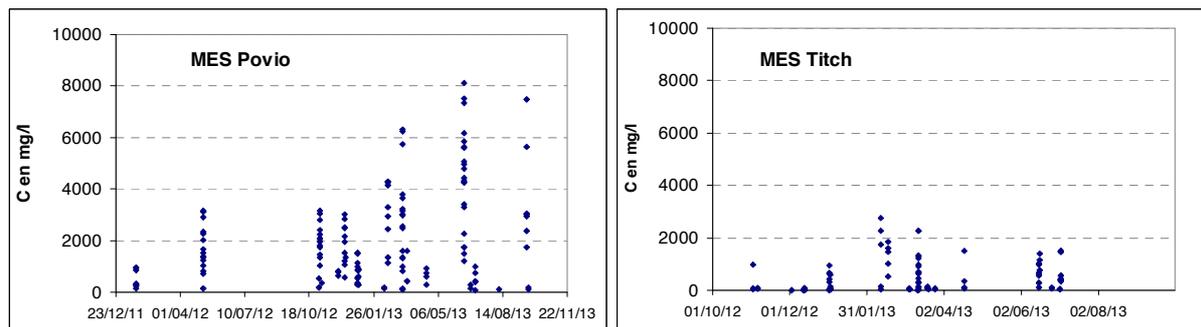


Figure 14 : Mesures de concentration en MES sur les stations de Povio

4.3.4 Poro

Suivis

A Poro, les pluviomètres et les capteurs de niveau sont relevés mensuellement par la DAVAR. La hauteur d'eau dans les totalisateurs est relevée au mètre et sert au contrôle du cumul des basculements enregistrés par les pluviographes à augets. Le modem du pluviographe Poro amont est de plus interrogé en fonction des prévisions météo et de fortes précipitations enregistrées sur le site peuvent conduire à une visite de terrain supplémentaire pour relever les données, vérifier les appareils et récupérer les échantillons des préleveurs automatiques. Ceci permet de les vider pour les rendre opérationnels pour la crue suivante.

En période cyclonique, des agents (stagiaires ou vacataires) de l'UNC se rendent sur le site après chaque évènement notable. Si les alertes météo le permettent, ils anticipent la survenue des crues en se rendant sur place à l'avance de manière à procéder à des jaugeages, à faire des prélèvements manuels et à observer les circulations d'eau sur le site minier en cours d'épisode pluvieux (Figure 16). Ces agents procèdent également à des relevés et prélèvements en entrée et sortie de deux bassins de décantation qui sont équipés de perches (Figure 17).

Données recueillies

L'ensemble des **données brutes** "sorties de centrales" est archivé. Les données de précipitation et de débit sont gérées, critiquées et validées par la DAVAR avec les méthodes appliquées pour l'ensemble de son réseau. Les anomalies sont détectées et corrigées quand c'est possible ou conduisent à des mises en lacunes dans le cas contraire. Les éventuels décalages en temps des centrales de mesure sont corrigés grâce aux relevés des opérateurs sur le terrain qui sont toujours effectués en "heure GPS".

Pour **les pluies**, les chroniques obtenues sont constituées des horaires des basculements d'auget. La DAVAR génère également à partir de ces données de base, une chronique de pluies journalières, un calcul de pluies mensuelles et annuelles. L'ensemble des données d'une station est archivé dans un classeur Excel qui comprend également les relevés des totalisateurs et les relevés de terrain. Sur la période 2009-2013, la chronique ne comporte aucune lacune à Poro amont et 167 jours de lacune à Poro aval soit un taux de 9 % seulement.

Pour **les débits**, les données de **hauteur d'eau** issues des deux capteurs présents, la sonde Leveltroll et le module 720 ISCO, sont comparées et compilées et fournissent des chroniques de hauteur d'eau à pas de temps variable. Les points aberrants sont supprimés et les périodes de dysfonctionnement mises en lacune. Grâce à la présence de deux capteurs, il n'y a pas de lacunes dans les données. Les données sont des données à pas de temps variable : les périodes sans variation de niveau ne comportent que peu de points, les périodes de crue sont décrites en détail (pas de temps minimum de 5 voire 3 minutes). Les chroniques de hauteur d'eau sont converties en **chroniques de débit** à

l'aide des **courbes de tarage** validées par la DAVAR. Un exemple de chronique est donné sur la Figure 15. Les deux zooms en bas de la figure illustrent la précision des données en période de crue. Comme pour les pluies, les données sont archivées dans un classeur par station qui contient les données brutes, les données de hauteur validées, les débits calculés. Les débits journaliers, mensuels, annuels déduits de ces données validées y sont également consignés ainsi que les résultats de jaugeages et les notes des passages de terrain.

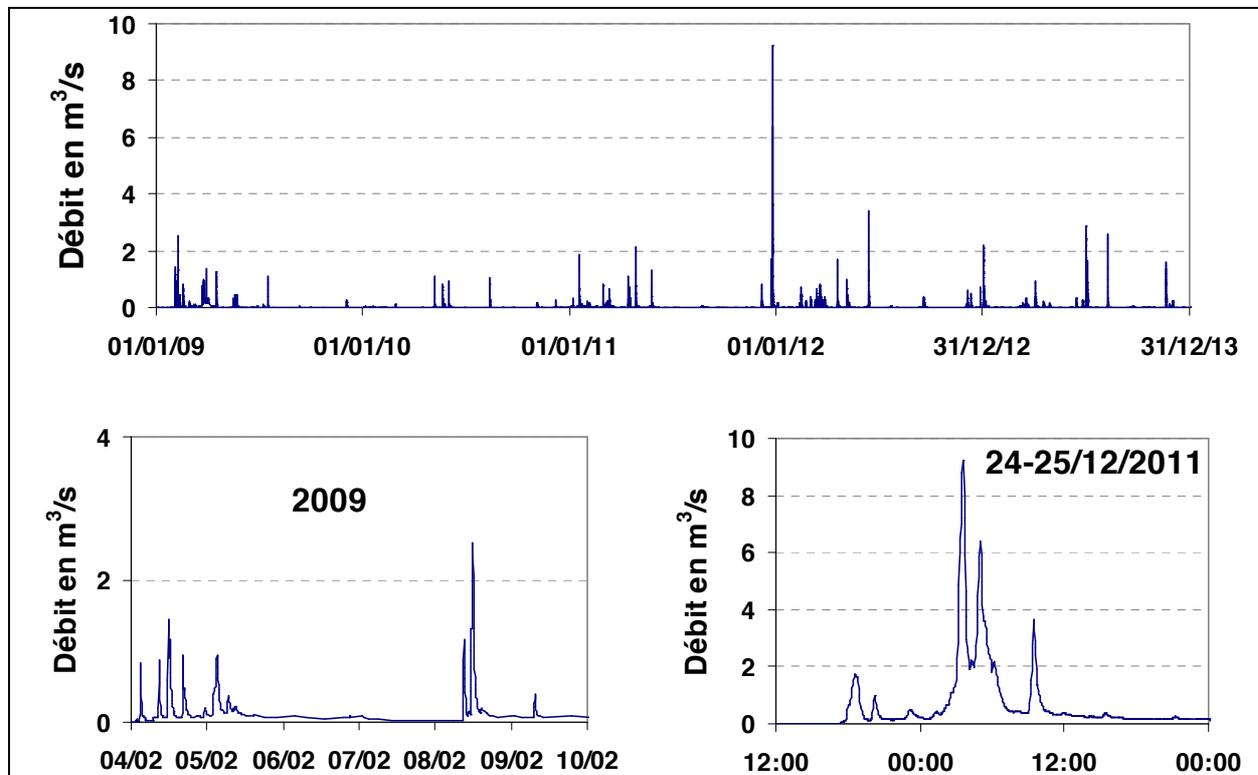


Figure 15 : Chronique de débits à Poro aval et zooms sur différentes périodes



8 mars 2011

8 mars 2011



18 avril 2012, Jaugeage Poro amont

8 mars 2011, jaugeage Poro aval

Figure 16 : Prises de vue des écoulements sur mine et jaugeages en cours d'épisode



Décanteur FRN01 en déversement

Relevés de niveaux de dépôts dans FRN01

Figure 17 : Suivi du décanteur FRN01 de Poro

Les **données de MES** sont déduites du traitement au laboratoire des échantillons issus des préleveurs automatiques ou prélevés manuellement par les opérateurs. Le protocole de traitement au laboratoire est décrit dans Carpentier (2011) et Navarrot (2012) ainsi que dans le rapport final Hydromine. Sur la période 2009-2013, 973 échantillons ont été traités à Poro amont et 647 à Poro aval (1620 analyses), représentant 83 crues échantillonnées à Poro amont, 69 crues à Poro aval dont 57 sont échantillonnées aux deux stations. La Figure 18 résume les concentrations mesurées aux deux stations. On note le peu de prélèvements pour la saison cyclonique 2010, particulièrement sèche et les concentrations plus élevées à Poro amont qu'à Poro aval (cf 6.3).

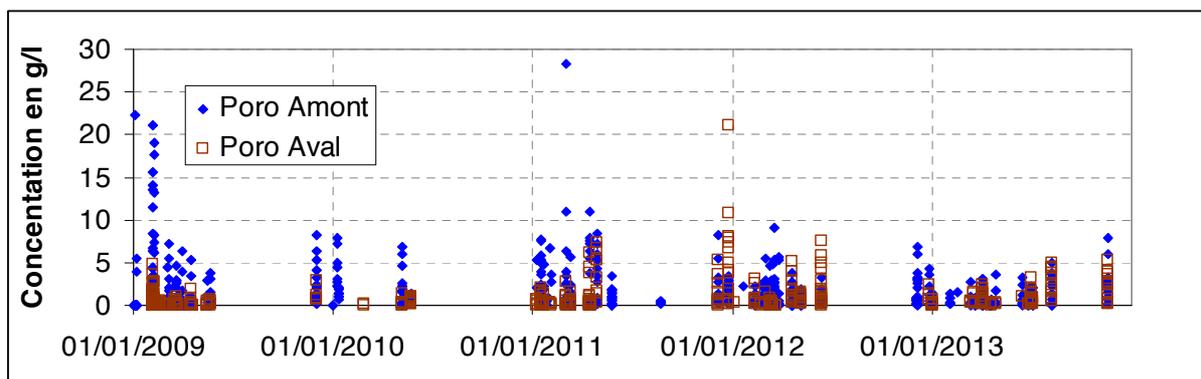


Figure 18 : Concentrations mesurées aux deux stations de Poro (2009-2013)

Observations in situ

Le suivi des perches dans les décanteurs a permis d'obtenir certaines années des informations sur le rythme de remplissage des bassins. Néanmoins, compte-tenu des difficultés de relevé quand les décanteurs sont en eau et de l'imprécision de la mesure, les données obtenues restent partielles et peu exploitables (cf 0).

Les observations des écoulements pendant les périodes pluvieuses ont, elles, apporté des informations précieuses sur le fonctionnement du bassin versant. Ces informations ont en outre permis d'éclaircir certaines questions posées par l'analyse des résultats. La Figure 19 illustre la synthèse sur le fonctionnement hydraulique des bassins versants de Poro qui a pu être établie après ces observations de terrain. Ce type d'observation est capital pour la mise à jour des plans de gestion des eaux (PGE)

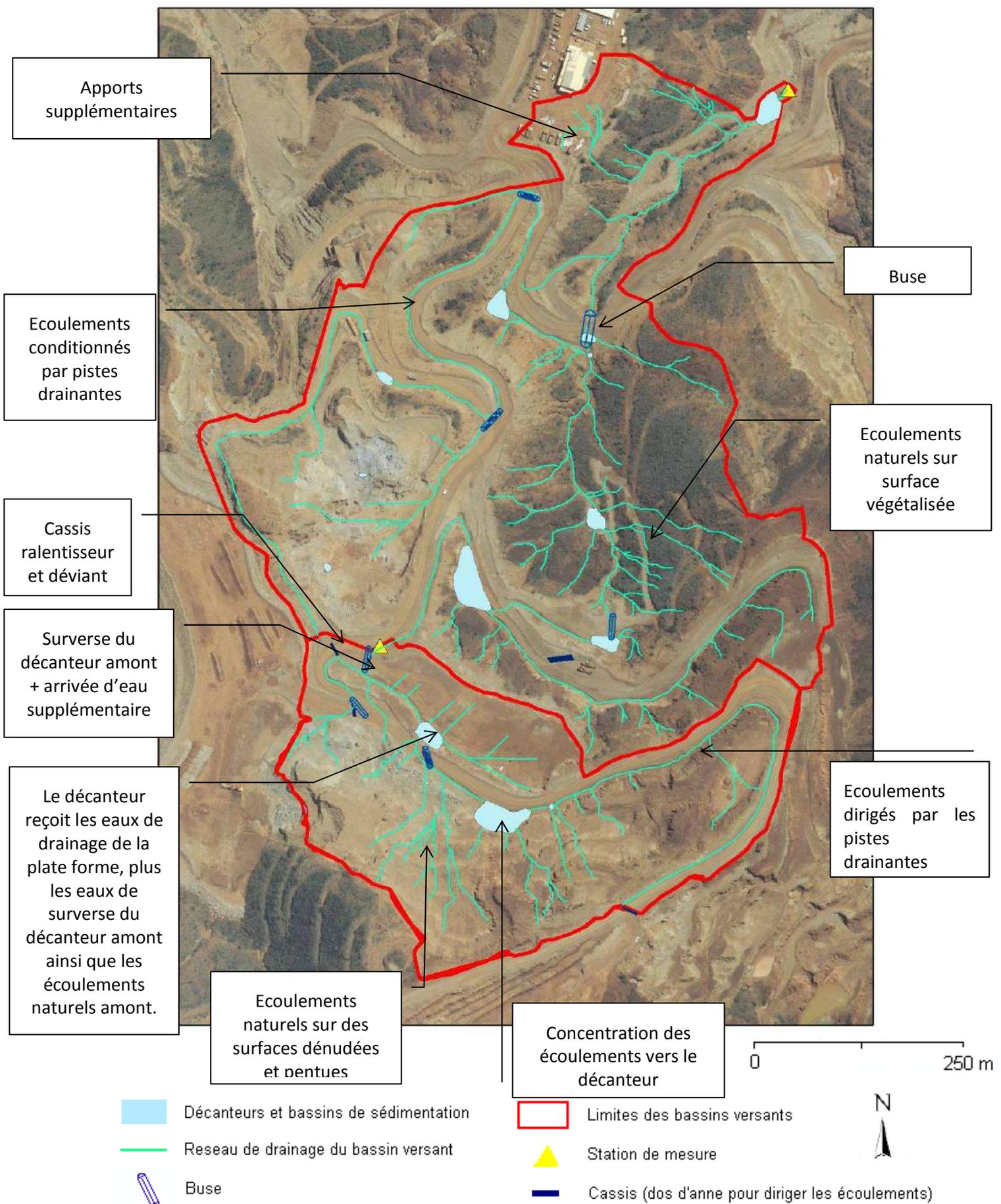


Figure 19 : Fonctionnement hydraulique du bassin versant de Poro (Guyonneau, 2012)

4.4 Synthèse du chapitre 4

4.4.1 Réseau de stations impliquées dans le projet

Ainsi que le montre la carte de la Figure 20, les sites retenus dans le projet sont suffisamment bien répartis sur la Grande Terre (Grand Sud, Côte Est, Côte Ouest et extrême Nord) pour aborder la diversité des contextes climatiques et géomorphologiques des sites miniers du Territoire. Pour la plupart des sites, deux bassins versants ont été inclus dans le projet. Il n'a pas été possible de trouver sur ces sites un couple bassin impacté/bassin intact de référence. Les bassins retenus sont soit des bassins emboîtés (Poro) soit des petits bassins avec des niveaux d'impact par l'activité minière variables, même si ce paramètre est susceptible de varier rapidement dans le temps. Les bassins proposés pour le site de Goro sont plus grands et moins impactés car plus éloignés des activités minières intenses.



Figure 20 : Localisation des sites du projet CNRT-PBVM

Le Tableau 4 résume les caractéristiques des bassins retenus pour le projet. Sur Koniambo et Goro, des données partiellement disponibles sur d'autres bassins ont cependant été analysées afin d'améliorer les connaissances sur les fonctionnements hydrologiques de ces sites lorsque les données sur les bassins retenus étaient insuffisantes.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des bassins retenus

Site minier gestionnaire minier	Poro		Poum		Koniambo			Goro	
	CFTMC		SLN		KNS			Vale	
Nom_BV	Poro amont	Poro aval	Pôvio	Titch	SW34	SW35	Wadjana	KN15	KO6
Distance de Noumea (km)	220	220	425	425	300	300	70	70	
Remarques	très impacté	contien t Poro amont	le plus impact é	le moins impact é	le moins impact é	verse	non impacté	impact é	impact é
superficie (km ²)	0.090	0.304	0.995	0.778	0.482	0.366	2.720	2.110	3.840
altitude minimale (m)	295	197	56	34	709	628		100	109
altitude maximale (m)	366	366	384	354	898	788		412	467
Pluie moyenne annuelle (mm)	1830		1500		1100			2830	
données de débit	2009- 2014	2009- 2014	2010- 2014	2010- 2014	2011- 2013	2010- 2012	non	2012	2011- 2013
données de concentration	2009- 2014	2009- 2014	2012- 2014	2012- 2014	2011- 2013	2010- 2012	non	2012	non

4.4.2 Définition d'une station type et du suivi nécessaire

L'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydro-sédimentaire d'un petit bassin versant minier implique d'assurer un suivi pluriannuel des précipitations incidentes et des exportations d'eau et de sédiments en provenance de ce bassin versant. Les bassins concernés par ce suivi sont de superficie modérée (de quelques hectares à quelques kilomètres carrés) et proches des zones d'intérêt dans les sites miniers. Dans l'idéal, un bassin versant de même caractéristiques géomorphologiques mais non impacté devrait être suivi afin d'offrir une situation de référence. Cette disposition est rarement possible.

Pour un bassin donné, le dispositif doit donc comporter :

- un (ou plusieurs pour les grands bassins) **pluviomètre enregistreur** (pluviographe)
- une **section de mesure** des débits (en fait mesure des hauteurs) stable
 - Soit en section naturelle
 - Soit de préférence en canal de mesure (par exemple canal de section trapézoïdale ou canal Parshall)
- un dispositif (**limnigraphe**) permettant d'enregistrer en continu les hauteurs d'eau, c'est-à-dire un **capteur de niveau** (capteur de pression, capteur radar, capteur à ultra-sons) associé à une **centrale de mesure** (data-logger). Certains capteurs ont une centrale de mesure intégrée et autonome (exemple LevelTroll)
- un **préleveur d'échantillon** asservi à la hauteur d'eau (pour prélever de manière pertinente pendant les crues) pour permettre la mesure des teneurs en matières en suspension (**MES**)
- si possible un **turbidimètre** permettant de compléter par une mesure de turbidité l'échantillonnage (mais un turbidimètre ne permet pas de se passer de l'analyse des teneurs en MES d'échantillons)
- une **alimentation électrique** pour les différents appareils (généralement **batterie + panneau solaire**)
- si possible, une **transmission** (GSM par exemple) des données enregistrées
- un **dispositif de jaugeage** pour établir la relation entre les hauteurs mesurées et les débits,

dite **courbe de tarage**. Le jaugeage peut être effectué de différentes manières

- de manière ponctuelle, pour différents niveaux de crue, par des méthodes permettant de déterminer les vitesses d'écoulement dans la section de mesure
 - moulinet
 - capteur radar
 - flotteur et chronomètre
 - profileur ADCP
 -
- en continu, par la mise en place d'une mesure et d'un enregistrement des vitesses (capteur doppler par exemple)
- Un **dispositif de protection** pour les appareils contre les intempéries et le vandalisme : cage grillagée, guérite métallique, cabane métallique ou en bois, etc...

Le suivi nécessite une présence régulière de contrôle du fonctionnement des appareils et de l'état des installations mais surtout, un passage le plus rapidement possible après les événements pluvieux pour relever les données et les échantillons et remettre en état matériel et site si nécessaire. Un passage en cours d'épisode est fortement recommandé mais les conditions de sécurité imposées sur les mines ne le permettent pas toujours.

Les éléments d'une station type sont décrits en Annexe 1. Station type et suivi font également l'objet d'un volet spécifique du projet assuré par le bureau d'études A2EP (cf le rapport spécifique). La Figure 21 résume cet équipement type, tel qu'il a été mis en place et utilisé depuis 2008 à Poro. Les équipements complémentaires, turbidimètre et capteur doppler ne sont pas représentés sur ce schéma.

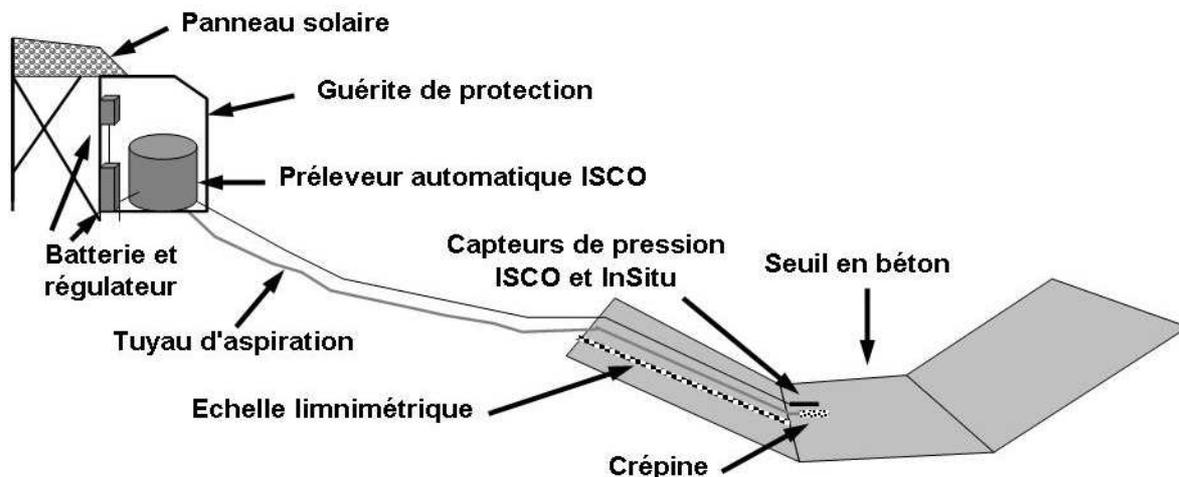


Figure 21 : Schéma de principe d'une station de mesure des débits et transports en suspension

5 Les données géographiques recueillies sur les sites

5.1 Démarche et présentation des données SIG

L'objectif du projet étant la compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire des bassins versant et des phénomènes érosifs, les informations géographiques sont un outil nécessaire à cette analyse. Ces données doivent être accessibles, sous réserve des droits d'accès, sur le portail de l'UNC. L'étape principale était donc la constitution d'un Système d'Information Géographique (SIG).

Au cours du projet, de 2011 à 2013, Irstea a encadré un stagiaire de l'UNC qui avait notamment pour mission de construire et d'alimenter le SIG du projet (Alloin, 2011 ; Guyonneau, 2012 ; Motto, 2013). Ces trois stagiaires ont également contribué, avec les stagiaires Hydromine, à la mise en place du SIG

sur le site de Poro. Compte tenu de la richesse de l'information disponible sur le site pilote de Poro, il a été décidé de faire du SIG de Poro le prototype des SIG à mettre en place et de tester la mise en ligne de ce SIG sur le portail de l'UNC.

La première étape du travail s'est traduite par le recueil des données géographiques et hydrologiques disponibles pour les bassins versants sélectionnés dans le cadre du projet. Le système d'information géographique utilisé est le logiciel ArcGIS d'ESRI. Les données font l'objet de cartographie dynamique dans un fichier dit "projet ArcMap", selon la nomenclature ESRI.

Afin d'assurer la traçabilité des données, c'est à dire d'être capable de retrouver la source et la nature de l'information géographique, des fiches de métadonnées simplifiées ont été éditées, selon le modèle mis au point à l'UNC (formulaire EXPIRE, respectant la norme INSPIRE). L'Annexe 2 présente un exemple de fiche.

Les données ont été regroupées par thématique de telle sorte que chaque acteur puisse retrouver de façon intuitive les données géographiques nécessaires à son analyse. L'organisation thématique adoptée est résumée dans le Tableau 5. L'ensemble des couches a été géoréférencé dans le système de projection "RGNC Lambert 91" et les couches qui avaient été recueillies dans un système différent ont été converties.

Dans le cadre de ce projet CNRT-PBVM, l'UNC était chargée de mettre en ligne sur un portail dédié les informations géographiques. Toutes les couches élaborées ou mises en forme ont donc été livrées au service informatique de l'UNC qui les a mises en ligne (cf. Rapport UNC).

Tableau 5 : Organisation thématique des données SIG

Groupe thématique	Intérêt
Hydrologie	Couches géographiques permettant la caractérisation hydrologique des bassins versants.
Occupation du Sol	Regroupe l'ensemble des couches donnant des indications sur l'état et donc la vulnérabilité des surfaces exposées
Gestion des Eaux	Regroupe l'ensemble des couches présentant les ouvrages et modifications hydrauliques opérées sur les bassins versants pour la gestion des eaux
Littoral	Couches situant le milieu récepteur aval soumis à la réception des flux
Topographie	Caractérisation topographique des bassins versants
Analyses	Couches issues des géo-traitement et permettant de compléter les informations sur les paramètres géographiques influant l'érosion (ex : pente)
Orthophotos	Fond photographique riche en informations pour tous les autres thèmes (ex : couvert végétal)

Le travail s'est ensuite organisé en trois actions successives :

- Sélection des couches d'intérêt, mise en forme et rassemblement dans un fichier projet généré sous le module ArcMap d'ArcGIS
- Regroupement des fichiers « Shapefile » dans des dossiers selon les regroupements thématiques retenus, à l'aide du module ArcCatalog d'ArcGIS
- Edition de métadonnées, de façon simplifiée grâce à l'ArcCatalog, en accord avec la directive INSPIRE sur les métadonnées

Le Tableau 6 récapitule les données SIG disponibles sur les différents sites miniers. Différentes analyses ont pu être réalisées pour décrire les bassins versants (croisement de couches) mais les couches issues des géotraitement ne sont pas archivées. Un exemple de cartographie thématique élaborée sous ArcGIS (module Arcmap) pour le site de Poro est présenté sur la Figure 23. L'ensemble des couches disponibles figure dans le bandeau de gauche mais seules les couches cochées apparaissent sur la carte dont le fond est constitué de l'orthophoto.

Tableau 6 : Bilan des données SIG recueillies ou élaborées sur les sites miniers du projet

		Poro	Goro	Koniambo	Poum
Hydrologie		X	X	X	X
	BV	X	X	X	X
	cours d'eau	X	X	X	X
	stations	X	X	X	X
Occupation du Sol		X	X	X	X
	végétation	X		X	X
	autres	X		X	X
Gestion des Eaux		X			X
Littoral		X	X	X	X
Topographie		X	X	X	X
	courbes	X	X	X	X
	MNT	X	X	X	X
Analyses		X	X	X	X
	pentés	X	X	X	X
Orthophotos		X	X	X	X

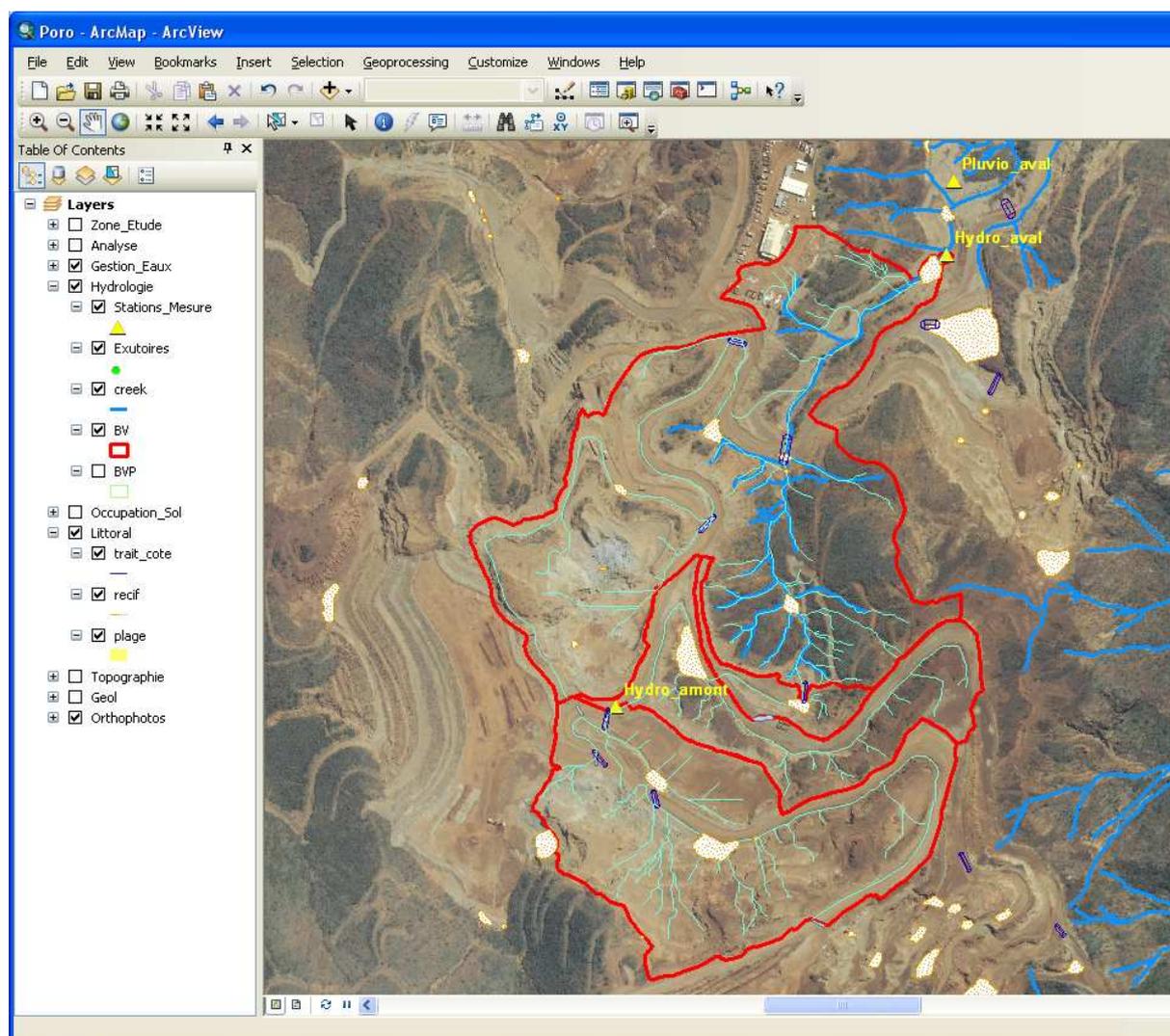


Figure 22 : Exemple de mise en forme thématique des couches SIG (Guyonneau 2012)

5.2 Exemples d'utilisation des données SIG

5.2.1 Analyses statistiques

Les outils SIG permettent de réaliser rapidement un certain nombre de calculs pour décrire les propriétés des bassins versants :

- calcul direct des surfaces dans le système de projection souhaité
- longueurs (périmètre par exemple) et distances pour toutes les couches existantes (par exemple longueur de réseau, distances entre appareils, etc...)
- pourcentages de surface pour différentes occupations du sol : recouvrement des affleurements géologiques, de la végétation, des plates formes de stockage et des décanteurs

5.2.2 Génération de Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Plusieurs techniques sont envisageables pour l'acquisition d'un modèle numérique de terrain : interférométrie radar, stéréoscopie, lidar, levé topographique classique ou au GPS... Dans ce projet, la génération de MNT a majoritairement été réalisée par numérisation des courbes de niveau fournies par les compagnies minières qui sont en mesure de fournir une topographie fine des terrains étudiés. Un certain nombre d'analyses hydrologiques et géographiques ont ensuite été réalisées. La Figure 23 donne un exemple des profils en long de talwegs extraits des MNT.

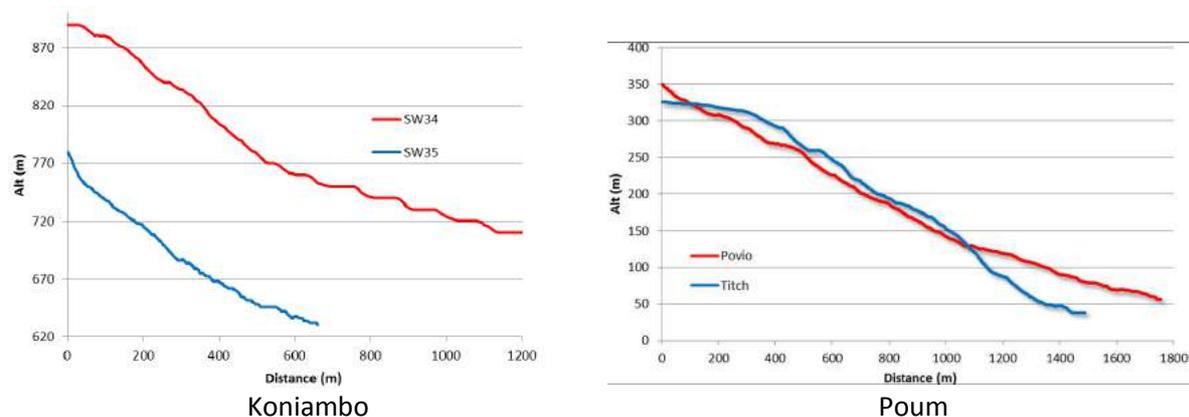


Figure 23 : Exemple d'utilisation du MNT, tracé de profils en long de talwegs (Motto, 2013)

5.2.3 Géo-traitements

Une série de traitements croisant les différentes couches disponibles a été ensuite réalisée pour répondre aux besoins des analyses. Compte-tenu de l'importance de la pente comme paramètre fondamental de l'érosion (Dumas, 2004), les **cartes de pentes** ont été établies pour tous les sites.

Les outils d'**analyse hydrologique** (directions de flux, accumulation de flux, calcul du **réseau de drainage**) ont également été systématiquement utilisés.

Enfin, les limites des bassins instrumentés ont été croisées avec les différentes couches d'occupation du sol pour obtenir par exemple les **taux de couverture végétale** des bassins versants. Compte-tenu de la rapidité de l'évolution du couvert végétal liée aux activités minières, cartes et calculs doivent être mis à jour pour rester pertinents.

Le Tableau 7 regroupe quelques caractéristiques morphométriques des bassins versants du projet issues des géo traitements effectués. Ces données sont nécessairement assorties d'une date car les éléments morphologiques comme la topographie, les réseaux hydrographiques, l'occupation du sol peuvent être profondément modifiés par l'exploitation minière ou les travaux liés à la gestion des eaux.

Des détails complémentaires de l'élaboration du SIG puis de son utilisation sont disponibles dans les mémoires de stage des trois années du projet :

- pour la construction du SIG : Alloin (2011), Guyonneau (2012), Motto (2013)

- pour les compléments "terrain" de Poro et son exploitation sur Poro : Carpentier (2011), Navarrot (2012), Freydier (2013)

La visualisation des données peut être réalisée sur le portail de l'UNC.

Tableau 7 : Principales caractéristiques morphométriques des bassins versants (2013)

Site minier	Poro		Poum		Koniambo		Goro	
Nom_BV	Poro amont	Poro aval	Pôvio	Titch	SW34	SW35	KN15	KO6
Surface (km ²)	0.304	0.090	0.995	0.778	0.482	0.366	2.110	3.840
Perimetre (m)	1518	6341	4994	4513	3556	2843	9369	9266
Altitude_min (m)	295	197	56	34	709	628	100	109
Altitude_moyenne (m)	321	286	246	265	790	705	215	240
Altitude_max (m)	366	366	384	354	898	788	412	467
Pente_moyenne (%)	36	41	37	30	36	42	30	21
Long_creek max (m)	790	1800	1750	1490	1240	660	3080	3950
% surface végétalisée	0	75	51	71	0	80	84	78

5.3 Conclusion du chapitre 5

Un SIG a pu être construit sur les quatre sites miniers du projet grâce aux couches d'information transmises par les compagnies minières et aux données disponibles auprès de la DITTT. Ces données ont été géo référencées dans le système RGNC Lambert 91 et sont consultables en ligne sur le portail de l'UNC, sous réserve des autorisations d'accès convenues avec les mineurs.

Ces données permettent d'extraire l'essentiel des informations disponibles pour l'analyse hydrologique. Leur exploitation dans l'avenir pose néanmoins le problème de leur actualisation dans la mesure où la situation évolue très rapidement en domaine minier.

6 Observations et résultats obtenus sur le site pilote de Poro

Comme indiqué au chapitre 4, le site de Poro constitue le site de référence du projet. Le projet CNRT-PBVM se superpose pour les années 2011 et 2012 au projet Hydromine. Puis, le CNRT, par un apport financier complémentaire a permis la prolongation du projet Hydromine. Les résultats présentés ci-dessous sont en partie issus du rapport Hydromine 2009-2012, complétés ou amendés des résultats obtenus au cours de l'année 2013.

6.1 Méthodes d'analyse utilisées

6.1.1 Echelles de temps de l'analyse

L'analyse des données produites sur le site a pour but de déterminer qualitativement et quantitativement la réponse hydrologique et sédimentaire des bassins versants aux précipitations, à différentes échelles de temps. Pour améliorer les techniques de gestion des eaux et ainsi réduire les impacts des activités minières sur les milieux en aval, il est nécessaire d'appuyer les règles de dimensionnement des ouvrages sur des mesures réalisées in situ. Pour répondre à cet objectif, c'est l'échelle de l'épisode pluvieux qui a été privilégiée. C'est également la bonne échelle temporelle pour raisonner en matière de fréquence et de risque. Cependant, l'échelle saisonnière et annuelle sera nécessaire pour compléter l'évaluation des exportations et de leurs impacts. Enfin, la durée d'observation (5 ans) permet d'aborder des comparaisons interannuelles et de situer les événements extrêmes dans la chronique générale.

6.1.2 Définition, découpage et caractérisation des épisodes

La première étape du travail a donc été de construire un **catalogue des épisodes** (dit catalogue P-Q). Dans son traitement de validation des données de pluie, la DAVAR utilise un critère de durée

d'interruption des précipitations (2h) pour séparer les épisodes pluvieux. Ce critère a été repris et on a défini un épisode comme une séquence continue de pluie de cumul supérieur à 5 mm. On a ensuite calculé à partir des données les paramètres descriptifs des entrées (précipitations) et des sorties (débits liquides et transports solides). Parmi ces paramètres, on peut citer (liste non exhaustive) :

* Pour les entrées (pour tous les épisodes)

• Le cumul de précipitation	pluie	mm
• La durée de l'épisode	durée, Dp	min
• L'intensité maximale observée en yy minutes	Imaxyy	mm/h
• La période de retour de cette intensité maximale	Taaa	année
• L'énergie cinétique calculée de la précipitation	ej00	J/m ²
• L'indice des pluies antérieures	IPA	mm
• La durée de temps sec avant l'épisode	Ts	jours

* Pour les sorties (pour les épisodes ayant occasionné un ruissellement)

• La lame ruisselée	Lr	mm
• Le coefficient d'écoulement	CE	
• Le temps de concentration	Tc	min
• Le débit de pointe	Qmax	m ³ /s
• La concentration moyenne	C	g/l
• La concentration maximale	Cmax	g/l
• Le flux de MES exporté	Flux	t

Les détails de calcul et la liste complète des variables sont donnés en Annexe 4.

Le cumul (Pluie) et la durée (Durée ou Dp) renseignent sur l'importance globale de l'épisode. Les paramètres d'intensité maximale permettent de caractériser le type d'épisode : les pluies longues et soutenues ont des faibles Imax sur les courts pas de temps mais de fortes Imax sur les durées plus longues tandis que les orages brefs et intenses ont des Imax forts sur les durées courtes.

Pour calculer les variables liées à l'écoulement, la difficulté principale réside dans le choix des dates de **début et de fin du ruissellement**, ce qui est un problème classique en hydrologie. Pour définir le début de ruissellement, on retient le début de la variation rapide de la hauteur d'eau qui est relativement facile à définir. Déterminer la fin du ruissellement demande une interprétation hydrologique qui est délicate et qui n'a pas pu être automatisée. De manière classique on a généralement utilisé une méthode graphique qui consiste à repérer dans la courbe de décrue (en échelle logarithmique) le changement de pente correspondant à la fin du ruissellement rapide de crue comme l'illustre la Figure 24.

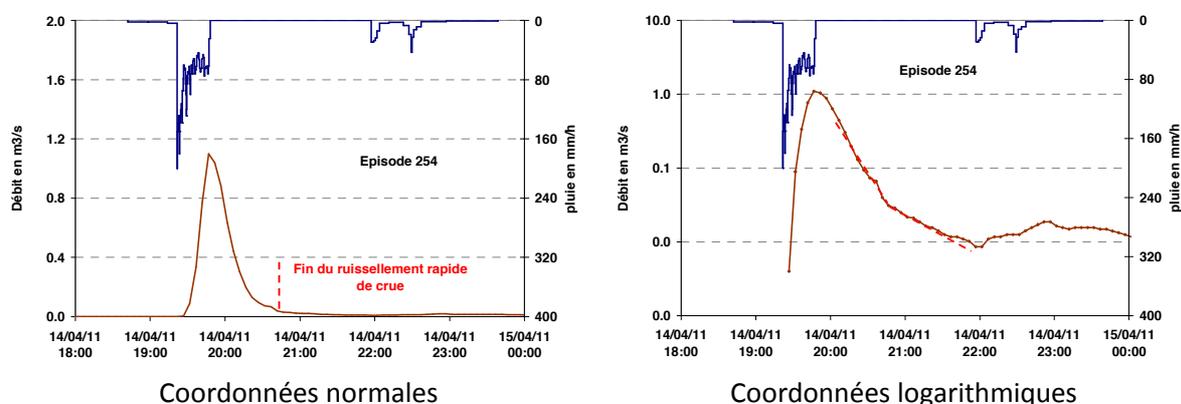


Figure 24 : détermination de la fin du ruissellement (exemple sur Poro amont)

La définition d'un début et d'une fin de ruissellement est rendue plus difficile encore par l'imprécision des sondes de niveau pour les faibles hauteurs d'eau, donc pour les faibles débits. De plus, les épisodes sont rarement simples et la reprise des précipitations peut masquer la fin du

ruissellement rapide d'une première crue. A Poro, l'exercice est plus facile sur la station de Poro amont car on revient rapidement à un niveau voisin de 0 après l'épisode pluvieux. A Poro aval, les écoulements retardés ne sont pas négligeables et l'incertitude sur la fin du ruissellement a un impact important sur le calcul de la lame ruisselée, et par conséquent sur le **coefficient d'écoulement**. Ce dernier est en effet défini comme le rapport entre la **lame écoulée** et la **pluie incidente** de l'épisode.

Le **temps de concentration** est un paramètre important du fonctionnement des bassins versants miniers qui est classiquement utilisé pour un certain nombre de dimensionnements d'ouvrages. Les formules de la littérature, souvent utilisées dans les études, ne sont pas adaptées à ce type de bassin versant. L'un des objectifs du projet est d'estimer ces temps de concentration à partir des mesures sur des bassins miniers de petite taille. Des tentatives de calcul automatique ont été faites mais n'ont pas été concluantes. Sur recommandation de la DAVAR le temps de concentration T_c a été déterminé graphiquement comme le décalage entre le centre de gravité du hétérogramme et le centre de gravité de l'hydrogramme.

Pour chaque épisode échantillonné, on dispose de la **concentration maximale** observée. Le détail de calcul du flux et de la concentration moyenne sera donné au paragraphe 6.3.

6.2 Résultats sur la relation pluie-débit

Un grand nombre de paramètres décrivant la relation pluie-débit, l'état initial des bassins, etc.... ont été déterminés sur les deux bassins pour les épisodes répertoriés et les matrices de corrélation entre paramètres ont été calculées afin d'analyser les liaisons entre paramètres de forçage et réponse hydrologique. Pour ce type d'analyse, l'épisode exceptionnel de décembre 2011 influence fortement les résultats et "tire" les corrélations vers le haut. Il est donc parfois nécessaire de l'exclure des analyses ou des graphes. Le Tableau 8 et le

Tableau 9 illustrent quelques résultats de ces corrélations qui seront commentés dans la suite du chapitre. Les variables et leurs unités sont décrites en Annexe 4.

Les principaux aspects de la relation pluie-débit ayant une importance opérationnelle seront abordés ci après : précipitations, débits de pointe, coefficient d'écoulement, temps de concentration.

Tableau 8 : Matrice de corrélation pour quelques paramètres hydrologiques (Poro amont, épisode 261 inclus)

	Pluie	ts	IPA	lmax60	htot15	t0	Po	Lr	CE	Qmax
Pluie	1.00	-0.05	-0.01	0.80	0.94	0.35	0.57	0.95	0.50	0.86
ts		1.00	-0.18	-0.09	-0.05	-0.07	-0.07	-0.07	-0.25	-0.11
IPA			1.00	0.07	0.00	-0.05	0.00	0.01	0.22	0.06
lmax60				1.00	0.85	0.24	0.51	0.71	0.46	0.83
htot15					1.00	0.23	0.47	0.93	0.43	0.89
t0						1.00	0.71	0.24	0.23	0.27
Po							1.00	0.44	0.29	0.46
Lr								1.00	0.55	0.89
CE									1.00	0.64
Qmax										1.00

Tableau 9 : Matrice de corrélation pour quelques paramètres hydrologiques (Poro aval, épisode 261 exclu)

	Pluie	ts	IPA	lmax60	htot15	t0	Po	Lr	CE	Qmax
Pluie	1.00	-0.06	0.01	0.73	0.93	0.54	0.69	0.87	0.45	0.75
ts		1.00	-0.19	-0.10	-0.09	-0.08	-0.04	-0.09	-0.21	-0.11
IPA			1.00	0.06	0.02	-0.03	-0.04	0.07	0.25	0.09

Imax60	1.00	0.86	0.35	0.52	0.54	0.42	0.83
htot15		1.00	0.40	0.58	0.79	0.46	0.85
t0			1.00	0.81	0.53	0.31	0.38
Po				1.00	0.61	0.31	0.42
Lr					1.00	0.58	0.69
CE						1.00	0.53
Qmax							1.00

6.2.1 Pluviométrie

Les cumuls annuels de précipitation sont calculés pour une année donnée n , du mois de décembre de l'année $n-1$ au mois de novembre de l'année n et sont découpés en deux saisons : cyclonique (décembre à mai) et sèche (juin à novembre). Sur la période d'observation, la **pluviométrie annuelle** s'étend de **1460 à 2720 mm**, la **moyenne** inter-annuelle étant respectivement de 2215 et **2210 mm** à Poro Amont et Aval. L'année 2010 a été particulièrement faible en précipitation pendant la saison cyclonique mais affiche des cumuls plutôt forts en période sèche (Figure 25).

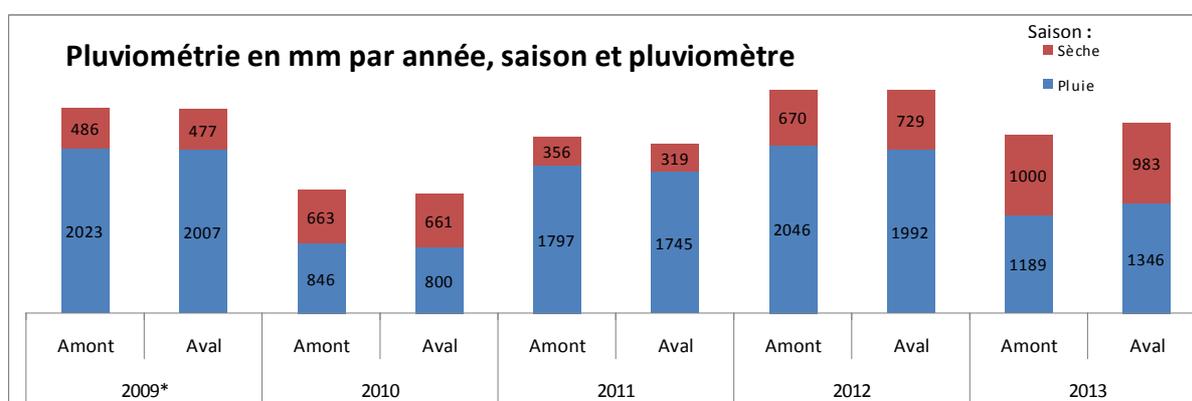


Figure 25 : Pluviométrie annuelle sur le site de Poro

Malgré la différence d'altitude (200m et 455 m respectivement), on observe une forte homogénéité entre les deux postes à toutes les échelles de temps : annuelle, journalière et de l'épisode, à de rares exceptions près pour les épisodes (Figure 27). Le **plus fort épisode enregistré**, à Noël 2011 (FINA), affiche un cumul de **513 mm** (moyenne des deux postes) en un peu plus de 24 h, pour une pluie journalière de 437 mm, soit près du quart de la moyenne annuelle (Figure 26). Cet épisode a fait l'objet d'une analyse détaillée.

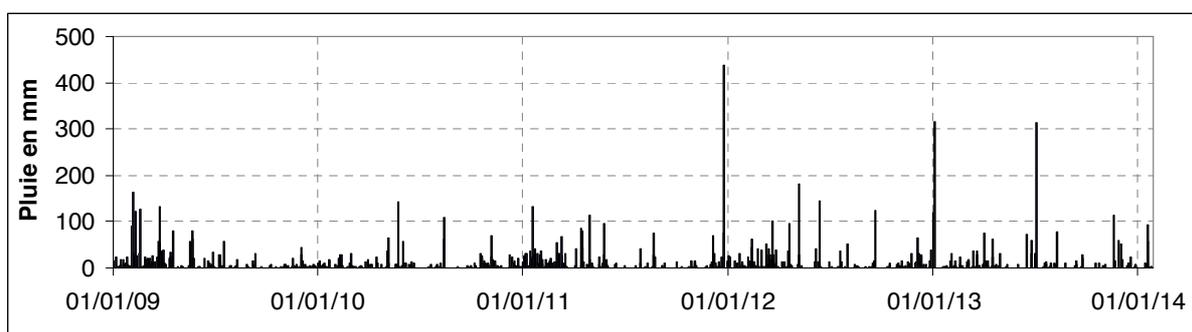


Figure 26 : Chronique 2009-2013 des pluies journalières de Poro

Deux autres épisodes remarquables sont à noter : l'épisode des **1 et 2 janvier 2013** (432 mm, dont 31 mm le 2) et ceux du **2-3 juillet 2013** (trois épisodes rapprochés cumulant **339 mm**) alors qu'il se situe en principe en saison "sèche". Ceci explique les forts cumuls de saison sèche de l'année 2013 (Figure 25).

Sur la période de décembre 2008 à novembre 2013, 416 épisodes ont été recensés. Différentes

analyses ont été réalisées pour classer ses épisodes en trois classes : faibles, moyens, forts. Le fait que des cumuls relativement modérés puissent donner des réactions notables dans les exutoires, assorties de dépassement des seuils de prélèvements, a notamment été pris en compte. On a donc défini les limites des trois classes avec les seuils suivants sur la pluie moyenne des deux postes (variable Pluie moy) :

- Episodes faibles pluie < 20 mm 296 épisodes
- Episodes moyens 20 mm <= pluie < 85 mm 98 épisodes
- Episodes forts pluie > 85 mm 21 épisodes

L'essentiel des analyses a porté sur les épisodes moyens et forts, avec une attention particulière pour les épisodes forts.

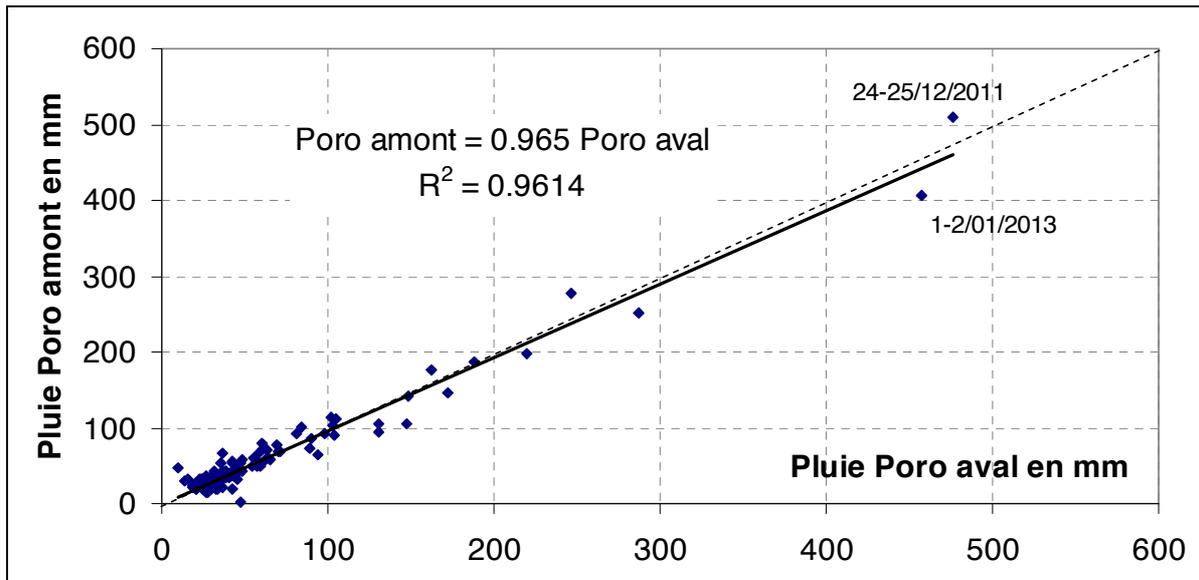


Figure 27 : Comparaisons des cumuls de pluie aux deux postes de Poro pour les épisodes moyens et forts

6.2.2 Relation pluie-débit

Formation du ruissellement

La saison des pluies (ou cyclonique) regroupe les trois quarts des épisodes pluvieux. Parmi ces épisodes, on a distingué ceux qui provoquaient un ruissellement (variable $R = 1$) de ceux qui ne provoquaient pas de réaction à l'exutoire ($R = 0$). Cependant, certains épisodes, sans provoquer réellement une crue provoquent un léger écoulement qui montre qu'au moins une partie des précipitations a ruisselé. Pour ces cas, la variable R a été affectée de la valeur 2. On constate qu'entre décembre et mai, 70% des épisodes à l'amont et 48% à l'aval produisent une réponse de crue à une averse de plus de 5 mm. En saison sèche, les épisodes sont beaucoup moins nombreux et seulement 45% à l'amont et 19% à l'aval d'entre eux provoquent une réponse mesurable dans les stations.

De manière classique, une courbe de "pluie limite" a été recherchée. Il s'agit de déterminer un seuil de pluie, variable en fonction de la durée du temps sec, au-delà duquel on observe toujours un ruissellement. La séparation a été difficile à établir et certains épisodes de pluie modérée ruissellent malgré des temps secs de plusieurs jours. L'intensité des pluies est dans ce cas déterminante pour expliquer la réaction du bassin. On peut néanmoins observer qu'à Poro amont, toute pluie supérieure à 15 mm provoque une réaction à l'exutoire et toute pluie supérieure à 55 mm provoque une crue notable. A Poro aval, aucune pluie inférieure à 20 mm ne provoque de réaction notable tandis que toutes les pluies supérieures à 35 mm provoquent une crue mesurable. La "**pluie limite**" pour initier les processus de ruissellement sur les deux bassins de Poro pourrait donc s'établir à 15-

20 mm. Ce seuil de précipitation a d'ailleurs été utilisé pendant la durée du projet pour servir d'alerte et provoquer un déplacement sur site des agents chargés du relevé des préleveurs.

Débits de pointe

Les coefficients de corrélation présentés dans le Tableau 8 et le

Tableau 9 montrent que le débit de pointe Q_{max} est essentiellement expliqué par le cumul de pluie (Pluie) et surtout par la fraction intense des précipitations (htot15). Il est également bien expliqué par la pluie maximale horaire. La prépondérance de ces facteurs a également été observée sur de petits bassins versants, anthropisés ou non, de l'île de Tahiti (Wotling, 2000).

Les graphes de la Figure 28, sur les seuls épisodes supérieurs à 20 mm, montrent que la fraction la plus intense des pluies détermine mieux la réponse que le simple cumul. Sur cet échantillon, la meilleure corrélation est obtenue avec l'intensité maximale horaire. Cependant, pour une même intensité, le débit peut varier dans un rapport de 1 à 2, voire 1 à 3. Un même débit de pointe peut être observé pour des intensités très variables.

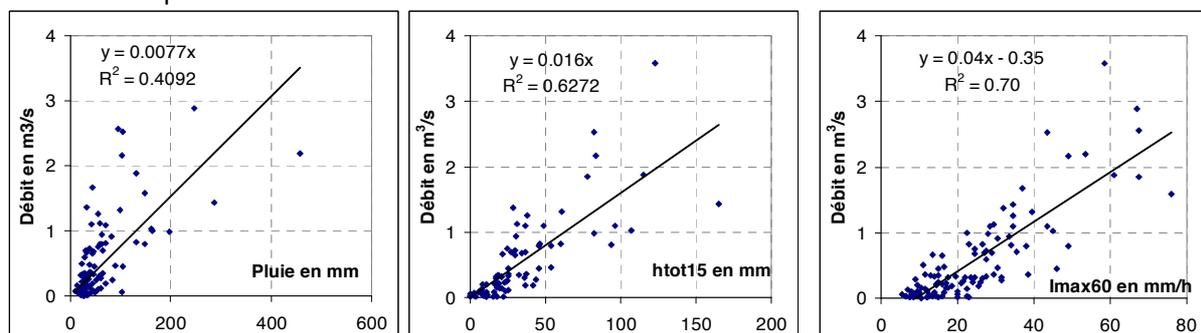


Figure 28 : Relation entre le débit de pointe et les paramètres de pluie incidente à Poro aval (période 2009-2013, épisodes supérieurs à 20 mm, 24 décembre 2011 exclu)

Les débits maximums de la période d'observation ont été enregistrés le 25 décembre 2011 et s'élèvent à $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$ à Poro Amont et de $9.2 \text{ m}^3/\text{s}$ à Poro aval soit respectivement 41 et $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$. Mais une analyse fine du déroulement de la crue (Freydier, 2013) a montré qu'une partie des écoulements avaient contourné la station aval. Cette analyse a permis de proposer une valeur corrigée de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $46 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$. Ces valeurs sont très élevées et nettement supérieures à ce qui s'observe sur les bassins plus grands de la région (DAVAR, 2006). Ceci confirme qu'il est indispensable de développer un réseau de mesure sur les tout petits bassins fournissant des chroniques de qualité afin d'obtenir des règles de dimensionnement adaptées à la gestion des eaux.

Lames écoulées et coefficients d'écoulement

Pour chaque épisode du catalogue, le volume écoulé a été calculé en intégrant le débit entre le début et la fin de la crue générée. La lame écoulée est obtenue en divisant ce volume par la superficie drainée (en projection horizontale). Ce choix de calcul permet de comparer dans les mêmes unités pluie incidente et lame écoulée. Le coefficient d'écoulement est le rapport entre lame écoulée et pluie incidente. La lame écoulée ayant été calculée sur **l'écoulement rapide de crue**, le **coefficient d'écoulement** peut être considéré comme équivalent au **coefficient de ruissellement**. Lorsqu'on reporte les lames écoulées en fonction de la pluie, on peut assimiler la pente de la droite de régression à un coefficient d'écoulement moyen (Figure 29). On note qu'à Poro Amont, ce coefficient s'élève à 0.82. Le rapport Hydromine 2009-2012 avait noté le rôle dominant de l'épisode du 24 décembre 2011. La survenue de deux autres épisodes fort en 2013 (janvier et juillet) confirme la tendance observée et la forte pente de l'ajustement (0.82). Si on retire cet épisode, la pente se maintient à 0.81.

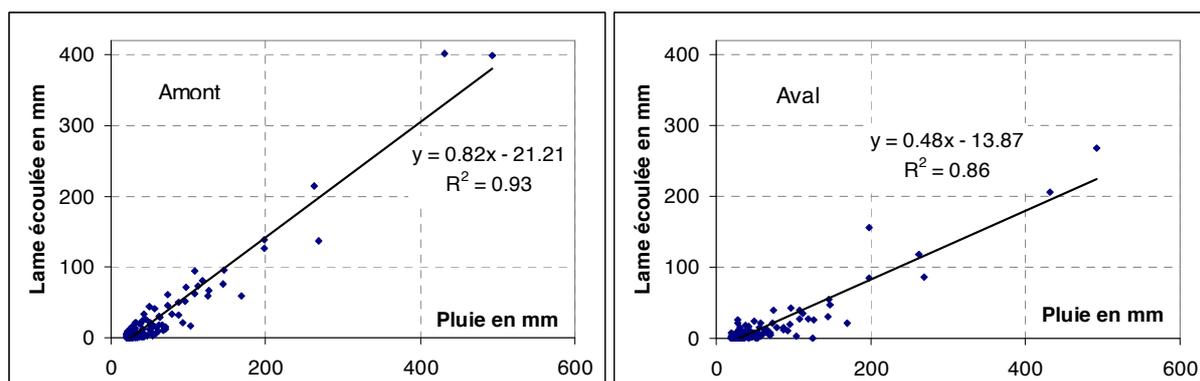


Figure 29 : Relation lame écoulée / pluie incidente pour les épisodes de pluie supérieure à 20mm

A Poro Aval, la pente n'est que de 0.48, mais l'analyse de l'épisode du 24 décembre 2011 a montré qu'une partie des écoulements avaient été détournés et non enregistrés dans la station. Les estimations de volumes ruisselés sur cet épisode conduisent à une majoration de la lame écoulée qui serait plutôt de l'ordre de 390 mm. De la même manière, les écoulements de la crue de janvier 2013 doivent être majorés car l'épisode a aussi enregistré des débordements. Ces modifications aboutissent à une majoration de la pente de 0.48 à 0.68.

Les relations représentées sur ces graphes peuvent être mises sous la forme

$$Lr = Ce \times (\text{pluie} - \text{pertes initiales})$$

Le Tableau 10 résume les différentes valeurs prises selon l'échantillon de calage et les éventuelles corrections des débordements à Poro aval. On a vu plus haut que la "pluie limite" se situait aux environs de 15-20 mm et les valeurs d'interception déterminées sur les couples averse-crue sont de l'ordre de 10-15 mm. Or, les pentes fortes associées à l'échantillon des épisodes supérieurs à 85 mm conduiraient à des pertes initiales de plus de 50 mm. Sur cet échantillon, le modèle ne permet donc pas d'assimiler la pente à un coefficient d'écoulement moyen. Les valeurs obtenues sur l'échantillon complet sont plus cohérentes avec les pertes initiales observées. Enfin, un calage du modèle en forçant les pertes initiales à 20 mm aboutit à des pentes de 0.75 (Poro amont) et 0.59 (Poro aval) après correction. On peut donc raisonnablement proposer une **fourchette de coefficient d'écoulement de 0.75 à 0.8 pour Poro amont et 0.5 à 0.6 pour Poro aval**.

Tableau 10 : paramètres du modèle $Lr = Ce \times (\text{pluie} - \text{pertes initiales})$

	Poro amont		Poro aval	
	CE moyen	Pertes initiales en mm	CE moyen	Pertes initiales en mm
Episodes > 20 mm (Figure 29)	0.82	25.9	0.48	28.3
Après correction Poro aval			0.68	33.5
Episodes > 85 mm	0.92	50.2	0.58	67.9
Tous épisodes	0.73	12.2	0.43	13.0
Avec pertes imposées	0.75	20.0	0.44	20.0
Après correction Poro aval			0.59	20.0

Les graphes de la Figure 30 montrent la grande dispersion observée sur les coefficients CE à l'échelle de l'épisode. En effet, ces coefficients varient entre 0.1 et 0.9, avec une dispersion particulièrement forte pour les pluies incidentes inférieures à 85 mm. Pour les fortes pluies supérieures à 125 mm, ils sont supérieurs à 0.5 à Poro amont (à une exception près en août 2010).

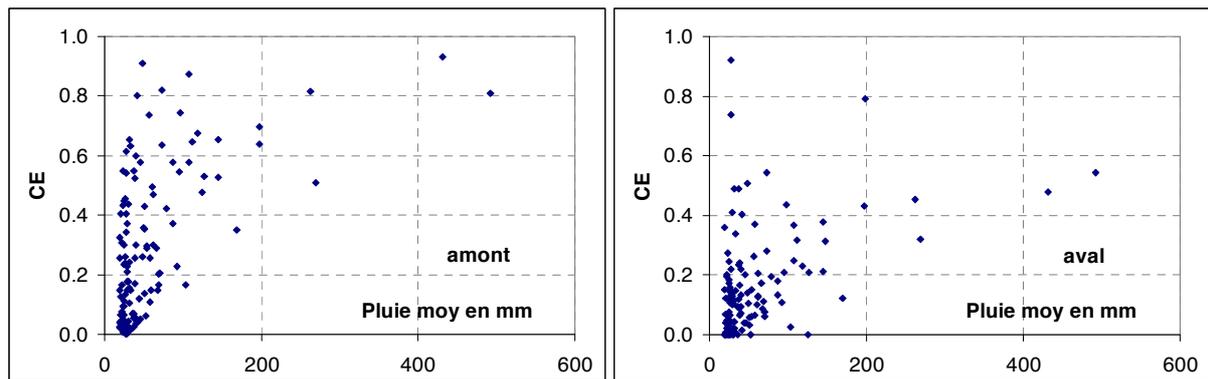


Figure 30 : Variabilité des coefficients d'écoulement des épisodes supérieurs à 20 mm

Temps de concentration

Les temps de concentration, calculés par méthodes graphiques sur les couples averse-crue, sont très variables, de quelques minutes à plusieurs dizaines de minutes. 9 à 16 minutes à Poro Amont et de 12 à 21 minutes à Poro Aval. Cette variabilité a été analysée et d'éventuelles relations avec les variables d'intensité des précipitations ou d'état initial du sol ont été recherchées, sans succès. On a cependant pu constater que la dispersion diminue pour les crues de fort débit de pointe. A l'amont comme à l'aval, les temps de réponse des crues à fort débit de pointe sont compris entre 10 et 20 minutes. En conclusion des valeurs du **Temps de Concentration Tc comprises entre 9 et 16 minutes à Poro Amont, 12 et 21 minutes à Poro Aval**, ont été proposées.

Les formules de la littérature, largement utilisées par les bureaux d'étude fournissent des valeurs supérieures à 3h. Elles sont donc complètement inadaptées à ce contexte. La formule développée par la SLN donne des résultats plus vraisemblables (29 et 37 minutes respectivement) mais qui sont encore trop élevés. Meunier et Mathys (1989, Irstea de Grenoble) ont développé, en simplifiant la méthode de Zeller, une formule de calcul de temps de concentration pour les bassins versants naturels ou anthropisés en montagne qui prend en compte la dégradation du bassin. La DAVAR a proposé une méthode de calcul, dite méthode des temps de transfert, qui considère une vitesse suivant le drain hydraulique le plus long. On retient 2 m/s si la pente du drain est entre 5 et 15% (dans les vallées) 4 m/s au-delà (sur les versants) et 1 m/s si la pente est inférieure (dans les plaines). Ces deux dernières méthodes donnent des résultats voisins (8-9 min pour Poro amont, 15-16 min pour Poro aval) cohérents avec les observations quoique se situant dans la fourchette basse.

6.3 Résultats sur les flux de sédiments

Concentrations observées et caractérisation des matières en suspension (MES)

Les **concentrations** mesurées varient **entre 0.001 g/l et 28 g/l**. Les concentrations sont en moyenne plus faibles à l'aval qu'à l'amont. A l'amont, la concentration maximale de 28 g/l a été obtenue pour une crue modérée de mars 2011 tandis que la valeur maximale de 21 g/l à l'aval a été mesurée pendant l'épisode exceptionnel de décembre 2011.

La **caractérisation granulométrique des matières en suspension** a été réalisée principalement au cours des campagnes 2011 et 2012. La taille des particules est déterminante pour leur capacité à être transportées en suspension et à sédimenter. De plus, l'évolution de la granulométrie au cours des crues peut renseigner sur les processus d'arrachement et de transport. Enfin, il était nécessaire de vérifier la représentativité de l'échantillonnage par les préleveurs. Le **granulomètre Laser Malvern** de l'UNC a été utilisé pour déterminer les distributions granulométriques des particules dans les échantillons des préleveurs automatiques ou dans des échantillons prélevés manuellement lors de campagnes de terrain. Une soixantaine d'échantillons ont été analysés au PPME par les stagiaires du projet. Quelques échantillons supplémentaires ont été traités à Grenoble.

Les **matériaux transportés** en suspension sont particulièrement **fins**, avec des **diamètres médians**

D50 de 4 à 13 μ à l'amont et 5 à 30 μ à l'aval (Figure 31). Les premiers tests ne mettent pas en évidence de ségrégation dans la verticale. Cependant, un autre test a montré des tailles de grains supérieures dans les prélèvements manuels (à l'aplomb de la crépine, mais plus en surface) que dans les prélèvements ISCO concomitants. Cette question de la variabilité verticale mériterait donc des tests complémentaires.

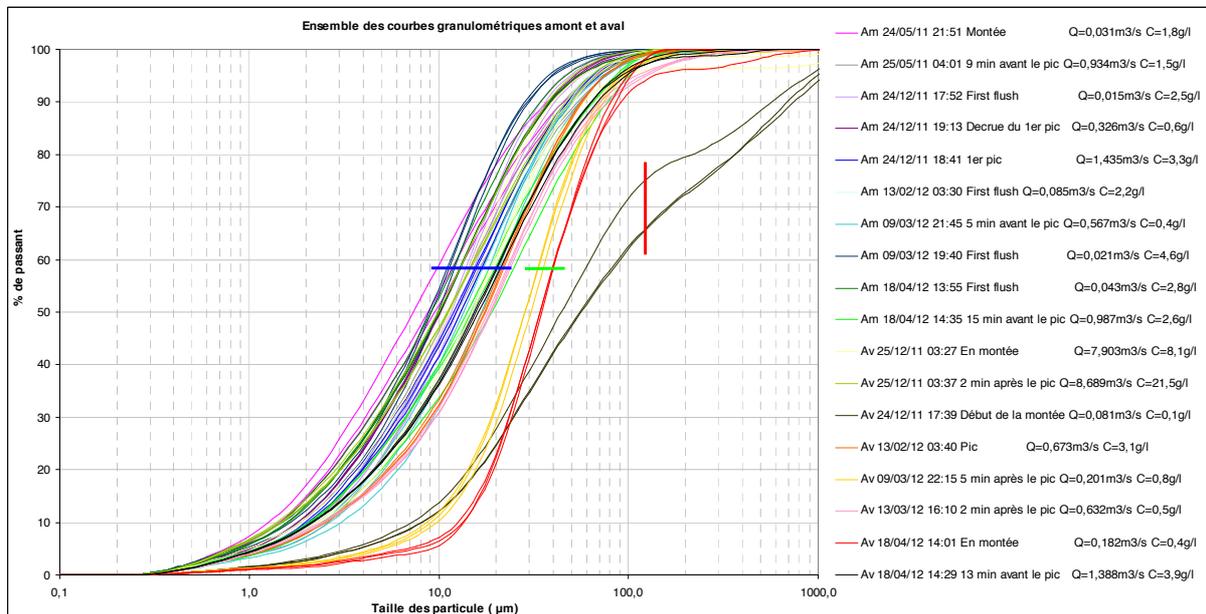


Figure 31 : Distribution granulométrique des échantillons de crue

A Poro amont, on a pu montrer qu'il existait globalement une relation croissante entre concentration et taille des grains : les échantillons les plus concentrés ont un diamètre plus élevé. A Poro aval, à l'inverse, au-delà de 0.6 g/l, les échantillons sont constitués de particules plus fines avec des D50 ne dépassant pas 15 μ , tandis que les échantillons plus faiblement concentrés contiennent des particules plus grossières.

Des courbes d'hystérésis dans la relation débit-taille des particules au cours des crues ont été observées. Par exemple pour la crue du 29 avril 2011, à Poro amont, les échantillons sont plus concentrés et plus grossiers à la montée en crue qu'à la décrue. A l'aval, les échantillons sont légèrement plus concentrés à la décrue (relation concentration-débit anti-horaire) mais avec un matériau plus fin qu'à la montée en crue. Ceci pourrait correspondre à la mobilisation de matériaux déposés dans le lit dans les derniers tronçons avant la station de mesure. Les suspensions piégées dans les lits et libérées par le transport feraient partie des particules les plus grossières des fins de crue précédentes qui se seraient déposées.

Relations entre concentration et débit

Lorsqu'on examine la relation entre la concentration de l'échantillon et le débit mesuré à l'instant du prélèvement (Figure 32), on note une absence de relation claire entre concentration et débit ce qui ne permet pas d'utiliser la méthode dite des "rating curve" souvent utilisée dans les publications sur les suspensions. Cette absence de relation est cependant classiquement observée sur les petits bassins versants en érosion active.

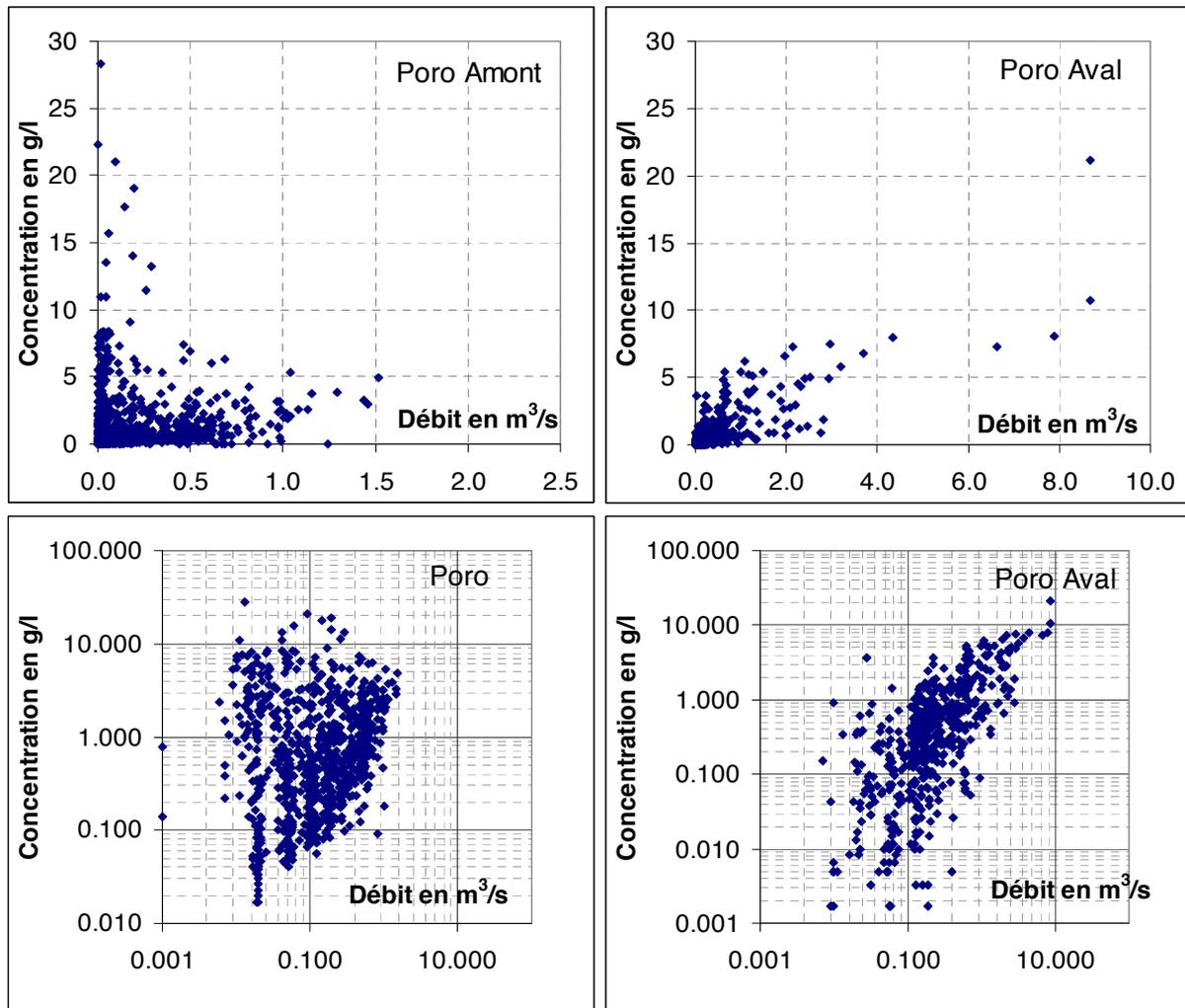


Figure 32 : Relation concentration/débit (échelle logarithmique en bas)

On note cependant une différence entre Poro Amont et Poro Aval. A Poro amont, la dispersion est très importante pour les faibles débits. Les fortes concentrations relevées sont dues au phénomène de chasse, dit "first flush" qui met en suspension des matériaux facilement mobilisables à proximité de la station. La Figure 33 illustre une chronique de Poro amont où la présence d'une chasse de MES en début de crue est notable. La dispersion des concentrations reste supérieure ou égale à deux ordres de grandeur jusqu'à 0.2 m³/s. La dispersion est plus faible à Poro Aval et on note une tendance globalement croissante avec le débit. Tous les échantillons à plus de 3 m³/s ont des concentrations supérieures à 5 g/l. On peut estimer qu'à Poro Amont, les mécanismes d'arrachement et de mobilisation sont dominants tandis que les mécanismes de transport sont dominants à Poro Aval. En effet, à Poro Amont, la station se trouve à proximité des versants dénudés par l'exploitation et de la plateforme de stockage de latérites.

Afin d'expliquer la variabilité des concentrations de Poro Amont, on a cherché les relations qui pourraient exister entre la charge en MES et l'intensité des précipitations au moment du prélèvement ou dans les minutes qui le précèdent. Ceci n'a pas permis d'expliquer les concentrations, sauf pour les valeurs fortes de pluie en 20 ou 25 minutes qui sont toujours à l'origine de fortes charges en MES.

A l'échelle de l'épisode, on observe des relations entre concentration et débit mais elles ne sont pas univoques et les courbes d'hystérésis sont fréquentes sur la relation/débit, ce qui est également un résultat classique sur les petits bassins versants. La Figure 34 présente deux courbes d'hystérésis pour le même épisode. A Poro amont, pour un même débit, la concentration est plus forte en

montée de crue qu'en décrue (courbe de sens horaire ou "clockwise") et c'est l'inverse à Poro Aval (antihoraire ou "unclockwise"). Certains auteurs (Lenzi et Marchi, 2000 ; Alexandrov et al., 2003 ; Soler et al., 2007) interprètent le sens de cette boucle en termes de fonctionnement hydro-sédimentaire. Les courbes de sens 1 (clockwise) seraient associées à la contribution de matériaux détritiques du lit ou des berges proches de l'exutoire. Les courbes de sens 2 (unclockwise) seraient associées à la contribution de sources sédimentaires plus éloignées. Ceci rejoint le commentaire fait au paragraphe précédent.

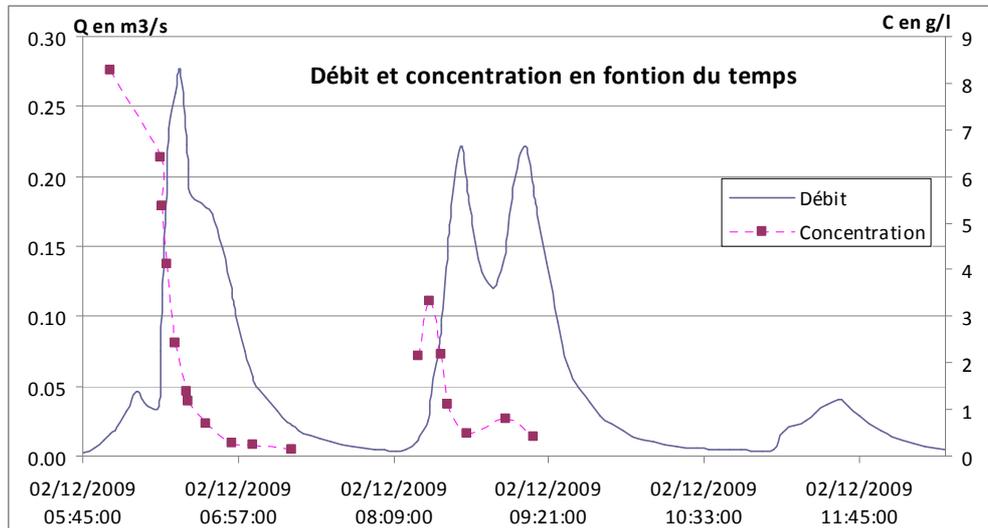


Figure 33 : Débit et concentration en fonction du temps (Poro amont)

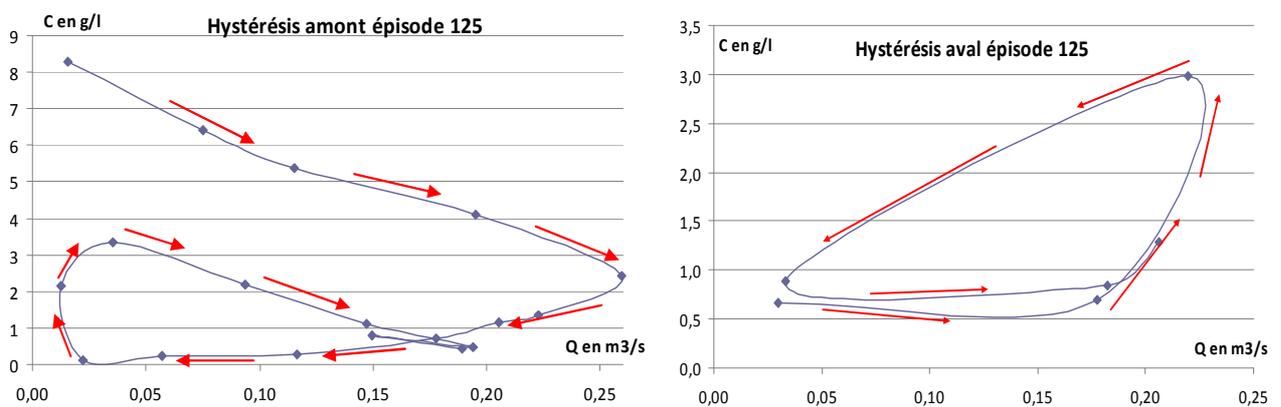


Figure 34 : Hystérésis dans la relation concentration-débit

Calcul des flux

Ces courbes d'hystérésis ont principalement été utilisées pour interpoler les concentrations en cours de crue et permettre le calcul des flux. En effet, tous les points de l'hydrogramme ne sont pas assortis d'une valeur de concentration. Pour calculer le flux transporté, on a donc estimé la concentration de chaque point en s'appuyant sur la relation concentration-débit construite sur les valeurs mesurées. En l'absence d'une relation concentration-débit claire, on a parfois fait une interpolation proportionnelle au temps écoulé entre deux prélèvements successifs. Dans certains cas, la partie non échantillonnée est importante (préleveur plein ou plus rarement anomalie de fonctionnement). Les hypothèses faites pour les interpolations sont plus hasardeuses. L'expérience acquise par le traitement des épisodes bien échantillonnés a été exploitée.

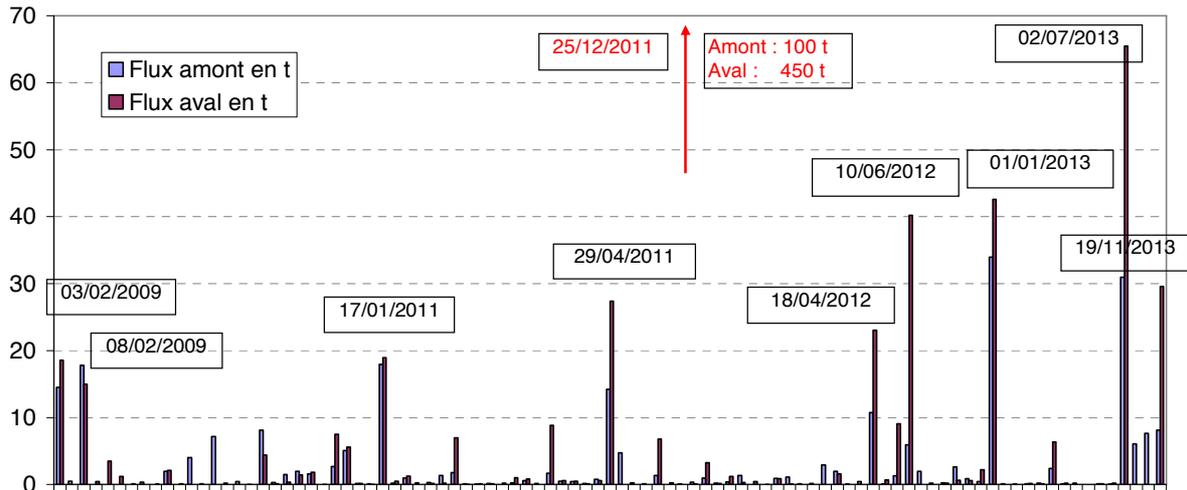


Figure 35 : flux en tonnes des épisodes échantillonnés soit 93 épisodes classés par ordre chronologique (abscisse = rang de l'épisode dans la série)

Sans l'épisode du 25 décembre 2011 (FINA), le flux total calculé des épisodes échantillonnés est de 240 t pour Poro Amont et 350 t pour Poro Aval. Mais ces deux chiffres ne sont pas comparables car toutes les crues n'ont pas été échantillonnées de manière concomitante sur les deux stations. Sur les 55 épisodes communs, ces cumuls s'élèvent à 204 et 361 t. Sur les épisodes moyens à forts, **le flux amont représente donc 56 % du flux aval, alors que la superficie du bassin amont ne représente que 30 %**. Plusieurs explications peuvent être invoquées :

- sur les épisodes faibles, une rétention notable des MES s'opère dans les bassins de décantation
- le bassin amont est totalement dénudé, tandis que le bassin aval est végétalisé sur environ 20% de sa superficie
- pour les épisodes les plus forts, les débordements qui se produisent dans les fossés conduisent à une sous-estimation des flux à Poro aval

A l'inverse, pour l'épisode **FINA**, malgré de fortes incertitudes car la totalité de la crue n'a pu être échantillonnée, **le flux amont a été estimé à 100 t tandis que le flux aval dépassait les 400 t**. La durée et l'intensité de l'épisode a conduit à **rendre rapidement inefficace l'ensemble des décanteurs** et à **mobiliser l'ensemble des matériaux disponibles**, y compris dans les dépôts dans les lits, a été massive.

Pour calculer les flux annuels exportés, il est nécessaire d'**estimer les flux des épisodes qui n'ont pas été échantillonnés**. Pour combler ces lacunes, des modèles statistiques globaux, reliant les valeurs de flux à des variables hydrologiques descriptives de l'épisode ont été élaborés. Cette démarche permet en outre de mettre en évidence les facteurs de l'érosion sur ces bassins.

6.4 Modélisation statistique globale

6.4.1 Variables explicatives des transports solides

Les coefficients de corrélation entre les variables descriptives des transports solides et les variables hydrologiques décrivant l'épisode sont donnés, pour Poro amont, dans le Tableau 11. Comme déjà évoqué plus haut, l'épisode 261 (25 décembre 2011, FINA) influe fortement sur les résultats. Les calculs ont donc été fait également en excluant cet épisode.

L'excellent coefficient de corrélation entre le flux et le débit de pointe Q_{max} ou la lame ruisselée est surfait : en effet, le flux est obtenu en intégrant sur la totalité de l'hydrogramme le produit de débit par la concentration instantanée (débit solide). Le flux est donc par construction relié au débit. La concentration moyenne est obtenue en divisant le flux par le volume écoulé (ou aux unités près, par

la lame ruisselée).

Tableau 11 : Coefficients de corrélation (R²) entre paramètres de flux solide et variables hydrologiques (Poro amont, 2009-2012, n = 60)

Nom		pluie	Ts	Imax 15	Imax 60	Imax 1440	htot15	Po	Lr	CE	Qmax
Cmax	tout	0,29	0,12	0,51	0,38	0,25	0,29	0,36	0,22	0,02	0,31
	-261	0,36	0,12	0,58	0,45	0,34	0,49	0,35	0,28	0,00	0,36
Cmoy	tout	0,14	0,04	0,32	0,32	0,17	0,23	0,19	0,14	-0,23	0,27
	-261	-0,03	0,05	0,26	0,26	-0,01	0,12	0,16	-0,06	-0,29	0,18
Flux	tout	0,87	-0,02	0,73	0,80	0,92	0,96	0,30	0,93	0,40	0,88
	-261	0,65	-0,05	0,57	0,59	0,66	0,74	0,32	0,72	0,55	0,89

On note que **la pluie incidente explique 65 % de la variance des flux**. Ce coefficient s'élève à **74 %** si on retient seulement la **fraction la plus intense des précipitations** (supérieures à 15 mm/h, htot15). A Poro aval, les relations sont moins bonnes et les coefficients de corrélation tombent à 0.43 (Pluie) et 0.65 (hot15).

On note que la concentration maximale observée est assez bien corrélée à l'intensité maximale en 15 minutes (Imax15). Mais A Poro Aval, les coefficients de corrélation tombent à 0.25 avec Imax15 et 0.29 avec Imax60. Ici encore, les transports en suspension s'expliquent mieux par l'érosivité des pluies à Poro amont qu'à Poro aval.

6.4.2 Modèles simples de prédiction des flux à partir du débit de pointe

Le débit de pointe est une variable qui est disponible pour tous les épisodes. Estimer le flux des épisodes non échantillonnés à partir de cette variable est donc apparu comme une démarche utile. La Figure 36 illustre le calage d'un modèle non-linéaire sur les données de Poro amont. Deux ajustements ont été réalisés, selon que l'on inclut ou pas l'épisode 261.

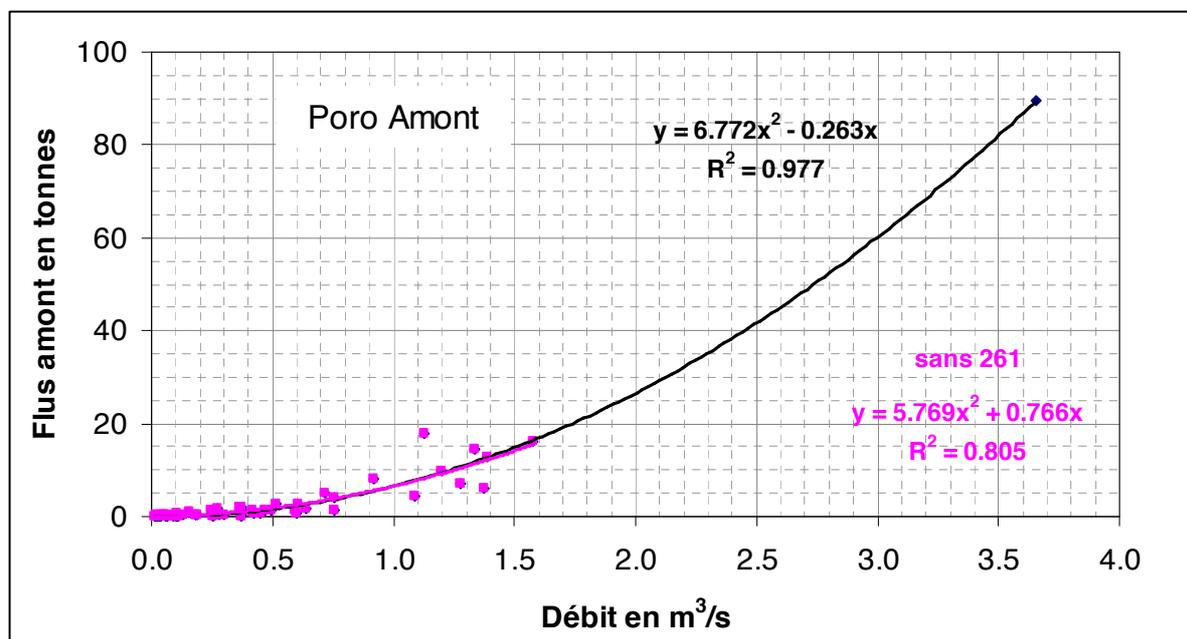


Figure 36 : Calage d'un modèle simple pour l'estimation des flux à partir du débit de pointe

La **validation** de ce modèle sur les crues de 2013 à **Poro amont** n'ayant pas servi au calage donne des **résultats mitigés** : sur cette période le **coefficient de détermination** est correct (**R² = 0.64** pour les deux modèles) mais le modèle surestime les épisodes moyens et sous-estime fortement les épisodes forts, dans un rapport de 1 à 2 pour juillet 2013 et de 1 à 3 pour Freda (janvier 2013). Cependant, l'incertitude sur les flux de ce dernier épisode est très forte car la partie principale de la crue n'a pas été échantillonnée. Enfin, sur le cumul des épisodes de 2013, le flux modélisé sous-

estime de 23 % le flux calculé à partir des données.

Sur Poro Aval, ce modèle est très fortement dépendant de l'épisode 261. Il a donc été proposé deux modèles, l'un pour les débits inférieurs à 1 m³/s, l'autre pour les débits supérieurs. En validation sur les 15 épisodes 2013 n'ayant pas servi au calage, le coefficient de détermination est de 0.95 mais les flux des trois épisodes les forts sont sous-estimés (de 16 à 44 %). Le flux cumulé des 15 épisodes est sous-estimé de 43 %.

Poro amont	Flux = 6.772 Q _{max} ² - 0.263 Q _{max}	
Poro aval	Flux = 5.596 Q _{max} ² - 2.922 Q _{max}	pour Q _{max} > 1 m ³ /s
	Flux = 2.054 Q _{max} ² + 4.093 Q _{max}	pour Q _{max} ≤ 1 m ³ /s

6.4.3 Modèles de régression simple ou multiple

Plusieurs modèles de prédiction des flux ont été testés (Logiciel Statistica). L'épisode 261 a été éliminé de l'élaboration des modèles mais, pour chaque modèle testé, le résultat du modèle sur cet épisode a été discuté. Dans la plupart des cas, les modèles non linéaires, notamment les modèles puissance, donnent des résultats plus satisfaisants que les modèles linéaires.

De nombreuses variables ont été testées pour établir ces modèles de régression. Les seules **variables pertinentes** sont le débit de pointe **Q_{max}** et les variables décrivant le cumul et/ou l'intensité de la pluie. Parmi celles-ci, la variable **Htot15** donnant le cumul de pluie au-dessus du seuil d'intensité 15 mm/hl est pertinente et aisée à calculer. Ces résultats sont voisins de ce qui a pu être observé sur les bassins de Tahiti (Wotling et Bouvier, 2002) où le débit de pointe et la durée de dépassement du seuil d'intensité (donc fortement liée au cumul au-dessus de ce seuil) étaient les variables des modèles de prédiction. Dans un contexte différent, avec un transport solide très intense, les modèles calés sur les bassins de Draix dans les Alpes du Sud retenaient également ces variables Q_{max} et Htot15 (Mathys, 2006).

A Poro amont, trois modèles ont des performances voisines, faisant intervenir Q_{max} seul, Htot15 seule, ou une combinaison de ces deux paramètres. Les résultats sont moins satisfaisants à Poro aval.

6.4.4 Estimation des flux annuels

Les différents modèles élaborés ont été utilisés pour estimer les flux des épisodes non échantillonnés. On a ensuite calculé les flux annuels (de décembre de l'année n-1 à novembre de l'année n) en retenant la valeur déduite des mesures pour les épisodes échantillonnés et la valeur déduite des modèles statistiques globaux. Le Tableau 12 présente ces résultats en utilisant le modèle simple décrit au paragraphe 6.4.2.

Tableau 12 : Flux annuels de MES sur les stations de Poro

année	Poro Amont			Poro Aval		
	mesuré	Complété modèle	Q _{max}	mesuré	Complété modèle	Q _{max}
2009	59	77	76%	47	80	59%
2010	14	19	72%	8	15	53%
2011	42	44	97%	61	76	81%
2012	120	121	99%	537	553	97%
2012 sans 261	30	31	95%	87	103	84%
2013	94	98	97%	149	200	75%
total	329	359	92%	803	924	87%

Les pourcentages indiquent la fraction du flux annuel qui correspond aux épisodes échantillonnés

Les pourcentages indiquent la fraction du flux annuel qui correspond aux épisodes échantillonnés. On note qu'à partir de 2011, cette fraction est supérieure à 95 % à Poro Amont et 80 % à Poro Aval. Les incidents matériels ont été très peu nombreux après les deux premières années de mise en service et la présence fréquente des stagiaires sur les sites a permis une gestion optimale des préleveurs. Sur l'ensemble de la période, **les flux des crues non échantillonnées** ne représentent

que **8 à 13 % du total**. Compte-tenu de toutes les autres incertitudes sur les calculs de flux, même quand on dispose d'échantillons, ceci apparaît comme négligeable.

Les autres modèles d'évaluation testés donnent les mêmes ordres de grandeur des résultats. Les modèles faisant intervenir la variable Htot15, disponible en cas de lacune de débit, donnent des résultats assez voisins.

Le flux total sur la période est de 360 t à l'amont et 920 t à l'aval, soit en moyenne 72 et 185 t par an respectivement. Mais la **variabilité** d'une année à l'autre est **considérable** et les années **2012 et 2013 sont particulièrement productives**. Ainsi, si on avait arrêté le suivi à la fin de la saison cyclonique 2011 (durée initiale du projet Hydromine), on aurait considérablement sous-estimé les exports de MES. Dans cette chronique, les épisodes forts (plus de 85 mm de pluie) représentent 75 % des flux à l'amont et 90 % à l'aval. A lui seul, l'épisode FINA représente 25 % du flux amont et 50 % du flux aval. Ceci confirme la nécessité d'avoir des mesures sur les épisodes extrêmes, ce qui impose un certain nombre de contraintes : avoir des stations suffisamment dimensionnées et des appareils placés en lieu sûr par rapport au niveau des plus hautes eaux, utiliser une programmation pertinente des préleveurs asservis sur les niveaux d'eau, prévoir une relève fréquente de ces préleveurs, se rendre sur les sites avant une alerte météo, etc...

Le flux moyen spécifique interannuel exporté à Poro aval, pour la période 2009-2013, atteint 230 t/km²/an sans l'épisode du 24 décembre 2011 et dépasse 530 t/km²/an avec cet épisode. On retrouve ici des ordres de grandeur voisins de ce qui a été observé à Tahiti sur un bassin soumis à d'intenses travaux de terrassement (Wotling, 2002). La prédominance d'un épisode exceptionnel y avait également été mise en évidence.

6.5 Modélisation pluie-débit-transport en suspension

6.5.1 Contexte et choix du modèle utilisé

Une analyse bibliographique des modèles pluie-débit-érosion qui seraient utilisables a été conduite en plusieurs étapes (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le modèle ETC, envisagé au stade de la proposition de 2009, s'est avéré non pertinent car il est essentiellement dédié au transport solide par charriage qui a été exclu de cette étude. Ses fonctionnalités de modélisation pluie-débit seraient adaptées mais on trouve des approches assez voisines dans le modèle HEC-HMS qui sera présenté ci-dessous. Ce modèle a été privilégié car il offre plusieurs possibilités de modèles élémentaires dans la relation pluie-débit. Son module de transport solide en suspension est encore en phase de test mais a pu être obtenu au début du stage 2014 dédié à la modélisation (Aksoy, 2014). HEC-HMS présente l'avantage d'être un logiciel libre d'accès (développé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine), largement utilisé par le monde et facilement accessible pour les compagnies minières ou les bureaux d'étude calédoniens.

6.5.2 Présentation du modèle HEC-HMS

Dans un premier temps, on s'est attaché à rechercher les modélisations qui reproduisaient au mieux la relation pluie-débit, puis la modélisation de l'érosion a été réalisée pour les choix de modèles élémentaires et les paramétrisations les mieux adaptés pour reproduire les débits liquides. En effet, pour chacune de ses composantes, HEC-HMS offre le choix entre plusieurs fonctions de production et de transfert et plusieurs modèles de routage des débits liquides et solides.

Modélisation pluie-débit

HEC-HMS, selon le modèle élémentaire retenu, peut prendre en compte les différents processus intervenant dans la formation des débits : le ruissellement direct de surface, l'infiltration dans le sol, l'évapotranspiration, les écoulements de subsurface et les interactions avec la nappe phréatique. Le bassin versant est représenté par un assemblage d'éléments assumant chacun un des processus de la transformation de la pluie en débit. Les modules élémentaires font appel à différents types de représentation des processus, des modèles empiriques aux modèles à base physique.

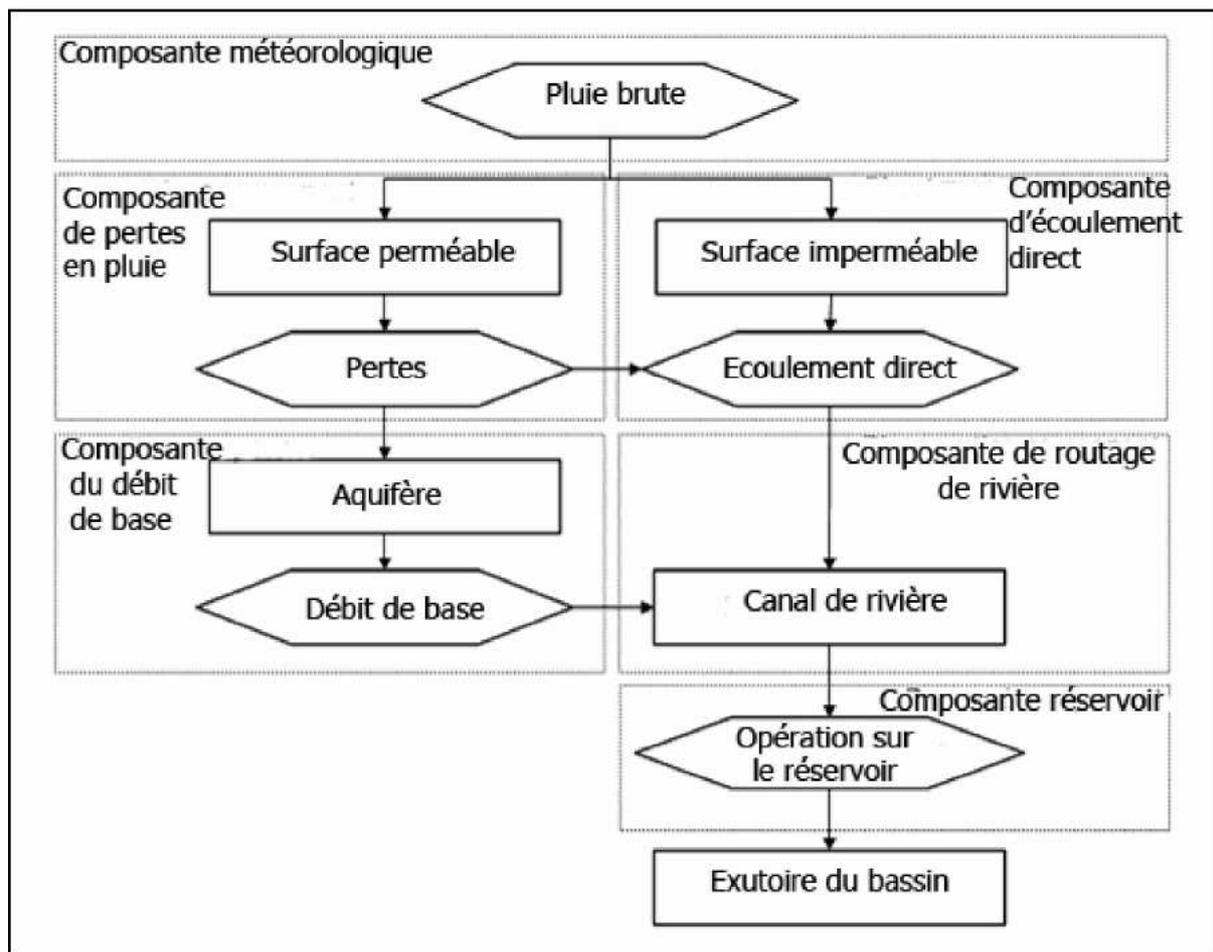


Figure 37 : Interactions entre les différents composants d'HEC-HMS (Cunderlik et Simonovic, 2004 in Aksoy, 2014)

Différentes méthodes sont disponibles pour la représentation spatiale de la pluie. Parmi celles-ci, compte-tenu de la faible superficie des bassins à modéliser et de l'homogénéité des précipitations, la méthode "specified hyetograph" a été adoptée. Elle permet d'attribuer un pluviographe à chacun des sous-bassins.

Un certain nombre de travaux de modélisation événementielle sur des petits bassins versants ont montré que l'association de la méthode du SCS-CN (Soil Conservation Service-Curve Number) comme fonction de production à l'hydrogramme de Clark comme fonction de transfert, pouvait donner de bons résultats (Tramblay, 2012, Carre, 2010).

La fonction de production détermine la pluie nette (ou pluie efficace) à partir de la pluie brute. La pluie nette est la fraction de la pluie qui participe au ruissellement. La méthode du SCS est associée à la notion de "Curve Number", CN permet de prendre une augmentation de la fraction ruisselée au cours du temps. CN, nombre adimensionnel compris entre 0 et 100, dépend de la nature du sol et de son état hydrique. Dans le présent travail, il a été utilisé comme paramètre de calage dépendant de la durée de temps sec précédant l'évènement.

La fonction de transfert permet de répartir au cours du temps la pluie nette pour former le débit. L'hydrogramme unitaire de Clark, fréquemment utilisé dans les modélisations événementielles combine deux processus pour transformer la pluie nette en hydrogramme :

- l'atténuation : processus de stockage temporaire de la pluie nette dans le bassin versant qui cause une baisse de l'ampleur du débit.
- La translation : processus représentant le mouvement de la pluie nette le long du réseau de drainage depuis son origine jusqu'à l'exutoire.

Modélisation de l'érosion et du transport solide

La modélisation de l'érosion à l'échelle événementielle est faite en utilisant une adaptation du modèle USLE qui évalue l'apport sédimentaire d'un événement donné en utilisant les données de débit de l'épisode considéré. Les autres facteurs pris en compte sont les facteurs classiques des modèles USLE et RUSLE : l'érodabilité des sols, les facteurs d'occupation du sol et de pratiques de protection, la longueur et l'inclinaison de la pente. L'équation est détaillée en Annexe 5.

L'apport sédimentaire est ensuite injecté dans le réseau hydrographique proportionnellement au débit du sous-bassin puis il est propagé en utilisant différentes fonctions de routage des sédiments détaillées en Annexe 5.

- Linear reservoir
- Uniform equilibrium
- Volume ratio

6.5.3 Représentation du bassin de Poro dans le modèle

Le bassin de Poro est schématisé par deux sous-bassins, un bassin amont, correspondant à la zone drainée par la station de Poro Amont et un bassin complémentaire représentant les superficies qui rejoignent l'exutoire principal avant la station de Poro Aval. Dans un premier temps, les bassins sont représentés de manière globale et le réseau hydrographique n'est pas isolé. Dans un second temps, le réseau est schématisé par des biefs dont les caractéristiques ont été déduites du SIG. Le coefficient de Manning a été fixé à 0.04.

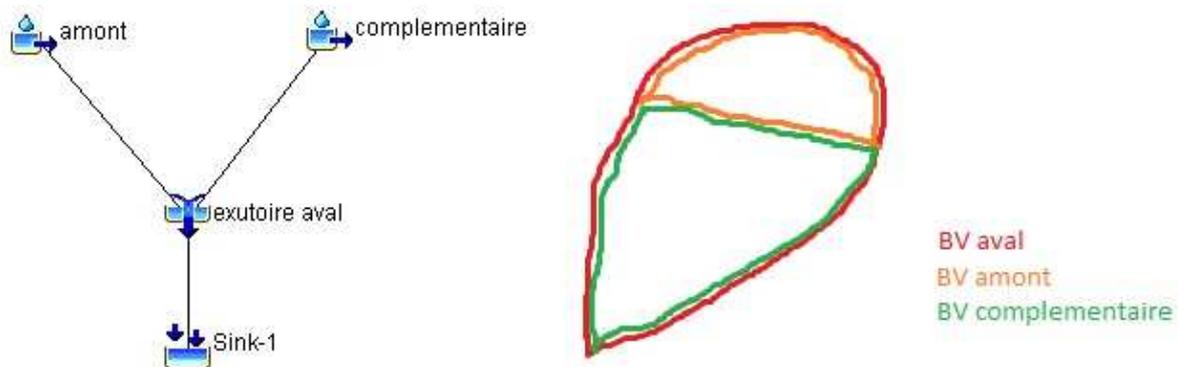


Figure 38 : Schématisation du bassin sous HEC-HMS

6.5.4 Sélection des épisodes à modéliser et options de modélisation pluie-débit

L'essentiel de la production sédimentaire s'effectuant pendant les épisodes forts (cf 6.3), les 14 épisodes le plus productifs ont été retenus dans un premier temps. Puis, pour tester le modèle sur des épisodes modérés, quelques épisodes supplémentaires moins productifs ont été ajoutés à l'échantillon. La liste des épisodes avec leurs principales caractéristiques est donnée dans le Tableau 13.

Dans un premier temps, chaque épisode a été calé indépendamment afin d'obtenir pour chacun le jeu de paramètres qui permettait d'obtenir la meilleure reproduction du débit. Le critère de Nash a été utilisé mais également l'examen visuel des deux hydrogrammes observé et modélisé. On a alors observé des groupes d'épisodes pour lesquels les paramètres hydrologiques tels que le temps sec avant l'averse étaient corrélés avec les paramètres de calage. A partir de ces premiers résultats des classes, établies selon des critères hydrologiques ont été constituées.

Tableau 13 : Episodes sélectionnés pour la modélisation HEC-HMS

N°	Date	Pluie mm	Poro amont				Poro aval				
			Ts h	I _{max15} mm/h	Flux t	Q _{max} m ³ /s	Ts h	I _{max15} mm/h	Flux t	Q _{max} m ³ /s	
15	03/02/2009	251	177	82	14	1.3	287	205	82	19	1.4
19	08/02/2009	91	1	76	18	1.1	104	30	84	15	2.5
60	16/04/2009	58	5	40	8	0.9	56	6	58	4	1.3
123	06/05/2010	68	47	52	3	0.5	71	48	80	7	1.1
175	17/01/2011	94	11	64	16	1.6	131	11	110	17	1.9
196	02/03/2011	50	13	76	2	0.4	59	13	80	6	0.8
215	14/04/2011	55	4	94	2	0.5	43	8	90	8	1.1
223	29/04/2011	113	4	118	13	1.4	102	287	122	25	2.2
255	05/12/2011	72	2489	62	1	0.4	63	2490	66	6	0.8
261	24/12/2011	510	84	186	90	3.7	476	84	178	453	9.2
287	12/02/2012	61	24	40	1	0.4	65	20	42	3	0.7
315	18/04/2012	73	4	68	10	1.2	73	540	112	21	1.9
320	05/05/2012	198	32	36	1	0.8	198	343	48	9	1.1
325	10/06/2012	146	93	58	6	1.4	146	94	98	40	3.6
361	01/01/2013	406	108	62	34	1.3	458	112	62	43	2.2
379	02/04/2013	92	209	58	2	0.6	82	82	48	6	0.9
397	02/07/2013	278	139	86	31	1.6	247	141	96	65	2.9
415	19/11/2013	106	363	70	8	1.4	148	1357	112	30	1.6

Dans un second temps, un épisode de référence a été recherché dans chaque groupe. Par rotation à l'intérieur du groupe, on a appliqué aux autres épisodes le jeu de paramètre optimal de l'épisode testé et dans chaque groupe on a retenu l'épisode dont le calage donne les meilleurs résultats en moyenne pour les autres épisodes du groupe (Aksoy, 2014).

Le paramètre de calage des modélisations pluie-débit sont les variables CN (Curve Number) et PI (Pluie d'interception). Le principal critère de classement est le temps sec (Ts) mais pour la classe des Ts<10h, il a été nécessaire d'introduire un critère supplémentaire de classement, l'intensité maximale de pluie en 15 minutes, I_{max15}. On obtient ainsi 5 classes dont la dernière est classée en deux groupes.

La structure utilisée pour classer les épisodes est représentée sur la Figure 39.



Figure 39 : Représentation schématique des classes (Aksoy, 2014)

6.5.5 Résultats de la modélisation Pluie-Débit

Le Tableau 14 résume la répartition des épisodes par classe de modélisation, les paramètres utilisés et la qualité des résultats, résumée par le critère de Nash. Pour chaque classe, un épisode est retenu

pour le calage et les autres sont simulés avec le même jeu de paramètres (PI et CN).

Tableau 14 : Répartition des épisodes par classe et paramètres de calage de chaque classe

Classe	5a	5b	4	3	2	1
Ts (h)	0-10	0-10	10-24	24-55	55-110	>110
Imax15 mm/h	<90	>90				
PI	10	10	10	15	15	15
n° épisode calage	60	223	175	123	325	397
CN amont	78	90	90	80	85	80
CN aval	30	47	35	35	25	20
Critère de Nash amont	0.85	0.71	0.92	0.85	0.90	0.97
aval	0.92	0.59	0.63	0.93	0.73	0.92
n° épisodes validation	19, 315	215	196, 287	320	261, 361	15, 155, 379, 415
Critères de Nash amont	0.50-0.69	0.72	0-0.76	0.71	0.88-0.96	0.72, 0, 0.82, 0.62
Critères de Nash aval	0.82-0.78	0.87	0.70-0.82	0.35	0.93-0.65	0.31, 0.22, 0.84, 0.79

La classe 1 regroupe les épisodes très secs. Pour le calage, la forme générale de l'hydrogramme a été privilégiée en partie au détriment du volume total à l'aval. Les épisodes de validation sont globalement bien modélisés avec un critère de Nash supérieur à 0.6 et une erreur sur le volume inférieur dans tous les cas à 40 %. Les épisodes de la classe 2 sont correctement reproduits avec des critères de Nash supérieurs à 0.6 et des erreurs sur le volume écoulé inférieures à 20 %. Les erreurs sur le débit de pointe sont comprises entre 14 et 33 %. Dans la classe 3, le faible critère de Nash de l'épisode 320 est lié à une sous-estimation des pics secondaires de débit, mais le débit de pointe et le volume sont modélisés avec des erreurs n'excédant pas 20 % (Figure 40). Les résultats de la classe 4 sont globalement bons sauf pour l'épisode 196 à Poro amont qui est très fortement sous-estimé. Pour les deux groupes de la classe 5, les critères de Nash sont supérieurs à 0.78 à Poro aval. Les résultats de Poro amont sont moins bons car les pics de débit successifs sont reproduits médiocrement.

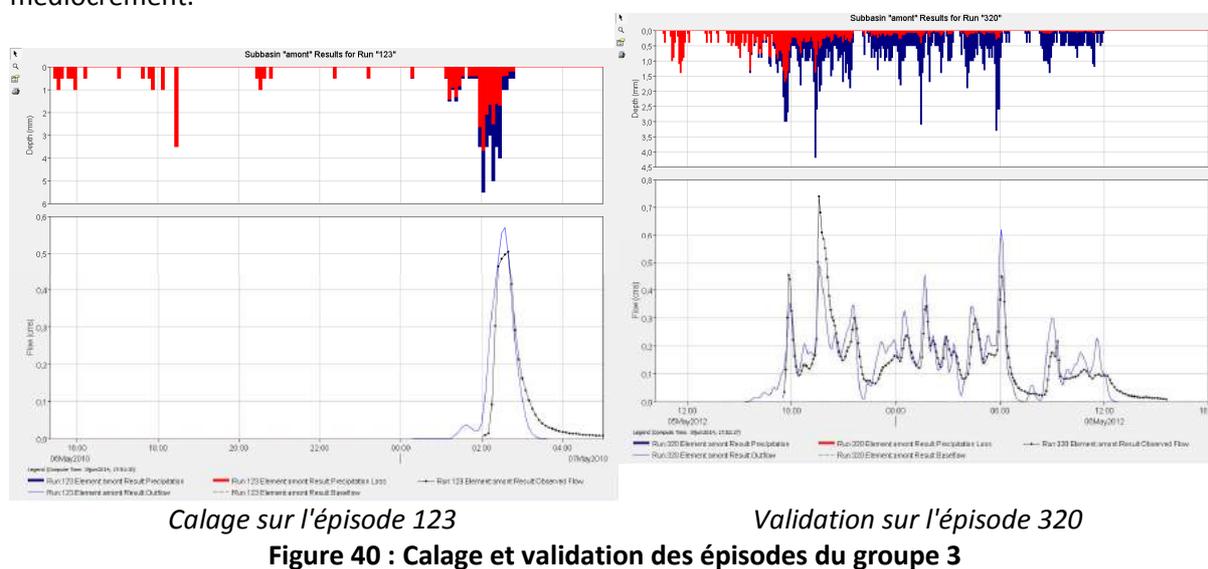


Figure 40 : Calage et validation des épisodes du groupe 3

6.5.6 Modélisation de l'érosion

Détermination des paramètres du modèle MUSLE

Dans le cadre du projet CNRT, l'IRD a conduit une étude sur l'utilisation de la télédétection pour analyser les effets de précipitations extrêmes sur l'occupation du sol. L'étude a été conduite sur Poro et parmi les résultats de l'étude, on dispose de cartographies des paramètres du modèle USLE. (Levermann, 2013). Ces cartographies sont disponibles sous ArcGIS.

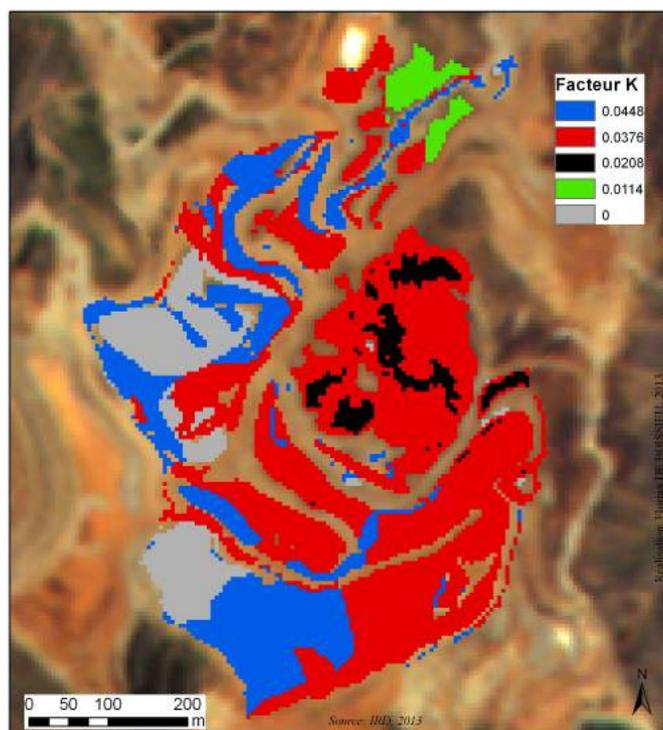


Figure 41 : Carte de la répartition du facteur K à Poro

A l'aide de l'outil Spatial Analyst les statistiques zonales ont été réalisées pour chacun des paramètres et une moyenne a été retenue pour chaque sous-bassin. Pour l'ensemble des modélisations les paramètres C, L, S, P ont été considérés comme constants et le paramètre K, facteur d'érodabilité des sols a été utilisé comme paramètre de calage. La même démarche que pour les débits liquides a été utilisée afin de choisir l'épisode de référence. L'épisode 397 a été retenu. La Figure 42 illustre les résultats sur le sédimentogramme. Il est particulièrement bien reproduit à Poro amont, les ordres de grandeur sont respectés à Poro aval mais les pics sont décalés.

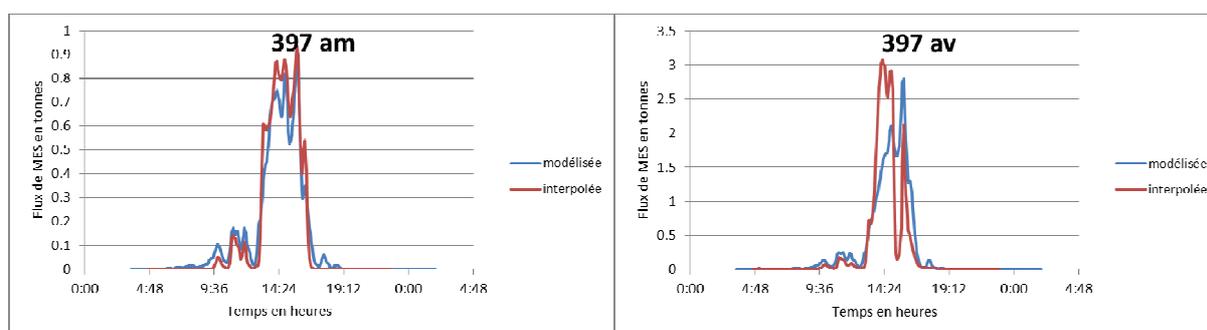


Figure 42 : Modélisation de l'érosion pour l'épisode 397 (flux en tonnes par pas de calcul de 5 min)

Seulement quatre des dix-sept épisodes de validation offrent une bonne représentation du flux global. Ce sont les événements 123, 223, 261 et 315, l'évènement 315 présentant toutefois une surestimation du flux à l'aval. Seuls les événements 123, 261 et 315 offrent une bonne représentation globale des pics de flux, l'évènement 223 sous-estimant le first flush. Dans HEC-HMS, l'équation du MUSLE fournit la quantité totale de sédiments produits au cours de l'épisode. Un algorithme interne permet de calculer à partir de la répartition temporelle de la lame d'eau ruisselée, la répartition du flux sédimentaire au cours du temps. A titre d'exemple, deux modélisations sont représentées sur la Figure 43. Elles représentent toutes deux correctement le flux total mais la répartition temporelle est respectée pour l'épisode 123 alors que le premier pic (first flush) de l'épisode 223 n'est pas modélisé et que le flux est réparti sur les deux pics de crue.

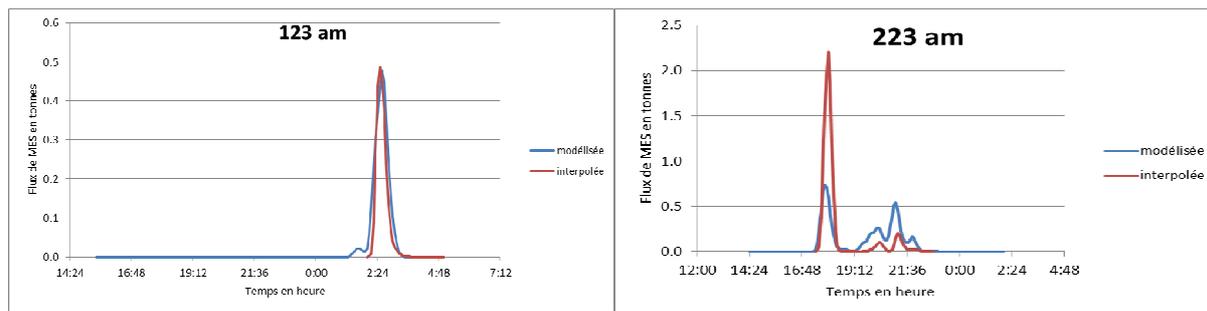


Figure 43 : Répartition temporelle des flux observés et modélisés

Une disposition du modèle comprenant un bassin de décantation à la sortie du bassin amont a également été testée. HEC-HMS permet d'introduire ce type de réservoir intermédiaire et propose plusieurs modèles de transfert des flux d'eau et de sédiments dans ce réservoir. La méthode "*outflow curve routing*" a été retenue pour les débits liquides. Elle correspond à un réservoir dont la relation d'évacuation en fonction du niveau de stockage est connue. Pour les sédiments, la fonction "*zero sediment trap*" a été sélectionnée. Les sédiments entrant avec le volume d'eau stocké sont piégés. A partir du déversement, les sédiments entrant sont relargués avec le débit sortant. Plusieurs tentatives ont été effectuées, sur des épisodes faibles, dont la rétention était proportionnellement importante dans le bassin, et sur des épisodes forts, au cours desquels le bassin est en déversement pour une grande partie de la crue. Cette démarche n'a pas permis d'améliorer les résultats.

L'introduction du réseau hydrographique dans la modélisation a produit des résultats probants pour la modélisation pluie-débit. Dans dix cas sur dix-huit soit dans 55 % des cas, on note une réduction de l'erreur sur le volume. On obtient également dans quatorze cas sur dix-huit, soit dans 77 % des cas une amélioration du critère de Nash. La modélisation des débits solides dans cette configuration a été un échec et a produit des résultats aberrants. La mise en ligne du module sédimentaire de HEC-HMS étant récente et peu testée, des échanges ont été initiés avec les concepteurs du logiciel mais les doutes n'ont pas pu être levés dans les délais impartis à cette tâche (stage de mars à juillet 2014).

6.5.7 Conclusion sur la modélisation sur les bassins de Poro

Le modèle **HEC-HMS** est un modèle **libre d'accès et facile à mettre en œuvre**. La fonction de production **SCS-CN** associée la fonction de transfert de **l'hydrogramme unitaire de Clark** s'est révélée bien adaptée pour la modélisation pluie-débit de ces petits bassins à réponse rapide. Les paramètres **d'interception PI** et le **"Curve Number" CN** sont déterminés en fonction de la **durée de temps sec Ts** (et de l'intensité maximale en 15 min, I_{max15}). Les résultats de cette modélisation pluie-débit sont encore améliorés lorsqu'on ajoute le réseau hydrographique et la fonction de **l'onde cinématique** pour le routage. Les résultats sur la modélisation sédimentaire sont plus mitigés. Le **paramètre K de l'équation MUSLE** a été utilisé comme paramètre de calage. On obtient de bons résultats en validation sur 4 épisodes seulement. De plus, les coefficients K qui donnent les meilleurs résultats ne sont pas cohérents avec la réalité des états de surface car dans le jeu de paramètres optimal les valeurs de K sont plus faibles pour Poro amont que pour Poro aval.

D'autres types de modèles mériteraient d'être testés, notamment le modèle **KINEROS** qui a donné de bons résultats en modélisation événementielle sur de petits bassins versants (Jaoued et al. 2005, Lajili-Ghezal et al. 2003). Cependant, ce modèle nécessite un plus grand nombre de paramètres (tels que la conductivité hydraulique à saturation effective, la tension capillaire nette effective au niveau du front d'humectation, la teneur en eau initiale du sol, la porosité totale du sol, les saturations relatives initiale et maximale ainsi que la teneur en cailloux du sol) qui ne sont pas aisément disponibles sur ces bassins. D'autres tentatives de modélisation ont été réalisées par Bluecham dans le cadre de ce projet et sont présentées dans une autre composante du rapport final du projet CNRT-PBVM.

6.6 Discussion sur le fonctionnement des décanteurs

Caractéristiques des décanteurs

Deux décanteurs sont suivis dans le cadre du projet Hydromine, FRN01 et FRN18 (cf Figure 10). Leurs caractéristiques sont données dans le Tableau 15. Mais le volume utile du décanteur FRN01 est entaché de nombreuses incertitudes, notamment parce que la géométrie de l'ouvrage est modifiée après chaque curage. Le volume utile quand il est vide (de l'ordre de 2800 à 4000 m³), est nettement inférieur au volume théorique résultant de la charte des bonnes pratiques (dit "2h/2ans"). Au cours de la période 2009-2013, les volumes écoulés à Poro amont (qui draine 70 % du bassin de FRN01) ont dépassé 3500 m³ pour 22 épisodes, soit en moyenne 4 fois par an. Le volume ruisselé de la crue du 24 décembre 2011 atteint 36000 m³ à Poro amont soit environ 52000 m³ pour le bassin drainé par FRN01, c'est-à-dire 15 fois son volume.

Tableau 15 : Caractéristiques des décanteurs FRN01 et FRN18 de Poro

Décanteur	Superficie	Superficie drainée par le décanteur	Volume à la cote de la surverse (2013)	Volume estimé en 2011	Volume théorique 2h/2ans
	m ²	km ²	m ³	m ³	m ³
FRN01	940	0.130	3500	2850	10800
FRN18	170	0.139	---	340	---

Les perches installées pour le suivi des décanteurs (cf Figure 17 et paragraphe 4.3.4) sont des systèmes rustiques de relevé des dépôts qui ont pour inconvénient de n'être pas lisibles immédiatement après une crue puisqu'ils sont immergés dans une eau trop turbide pour permettre de voir la limite supérieure des dépôts. Il faut attendre l'assèchement au moins partiel des décanteurs pour en faire le relevé. Le décanteur FRN01 est curé en principe une fois par an au mois de novembre, juste avant la saison pluvieuse. Son remplissage a été suivi en détail au cours des saisons cycloniques 2011 à 2013.

Suivi des décanteurs au cours de la saison cyclonique 2011

FRN01 avait été curé en novembre 2010, juste avant le début de la saison cyclonique 2011. Un bloc de dépôt a été prélevé en avril 2011, lors d'une période sèche et on a pu y repérer des lamines de dépôt assez nettes (Figure 44). Dans le même temps, les crues ont été échantillonnées à Poro amont et les flux exportés pour chaque épisode ont été calculés. Une tentative de correspondance entre les couches identifiables et les séquences de crue est proposée sur la Figure 44 et les estimations de volume correspondant aux couches ont été comparées aux flux de la station. La première séquence qui exporte 76 % des flux mesurés à l'amont, ne représente que 33 % des volumes stockés dans le décanteur, ce qui signifierait qu'au cours de cette période une forte proportion des matériaux transportés n'a fait que transiter par le décanteur sans s'y déposer. Cependant, les données de volume converties en tonnages de matériaux (par application d'une valeur de densité sèche apparente de 1.8) sont surprenantes car les tonnages déposés (51 t) sont supérieurs aux tonnages transités dans la station amont (18 t). Le décanteur FRN01 draine une superficie (13 ha) supérieure à celle de la station amont (9 ha) mais dans des proportions qui ne justifient pas cette différence : le tonnage de MES corrigé du rapport des surfaces serait de 26 t. L'excès de dépôts par rapport aux volumes transités en suspension pourrait s'expliquer par une contribution non négligeable de matériaux transportés par charriage dans les dépôts des décanteurs. Il est donc difficile de comparer les tonnages déposés dans les décanteurs et les tonnages transités en suspension (MES). Il faudrait pour cela échantillonner les dépôts lors d'un curage et établir des courbes granulométriques complètes (matériaux fins et grossiers) pour déterminer la fraction des dépôts assimilables aux MES. Des mesures de granulométrie par tamisage pour la fraction grossière et par laser pour la fraction fine ont été réalisées sur des prélèvements de matériaux du décanteur en 2012 (Chillou, 2012). On sait que les MES ont un diamètre maximum de l'ordre de 0.1 mm (D90 = 20 à 100 µ). Cette fraction ne représente que 5% des matériaux à l'entrée du décanteur et 30 % au milieu. En effet, on observe une certaine variabilité spatiale dans la taille des matériaux déposés. Si on admet une proportion de

20 à 25 % de fines assimilables à de la suspension, on obtient une fraction déposée de 10 à 13 t, pour un flux exporté de 18 t. Au cours de cette période, l'hypothèse que le piégeage des MES n'a été que partiel est confirmée.

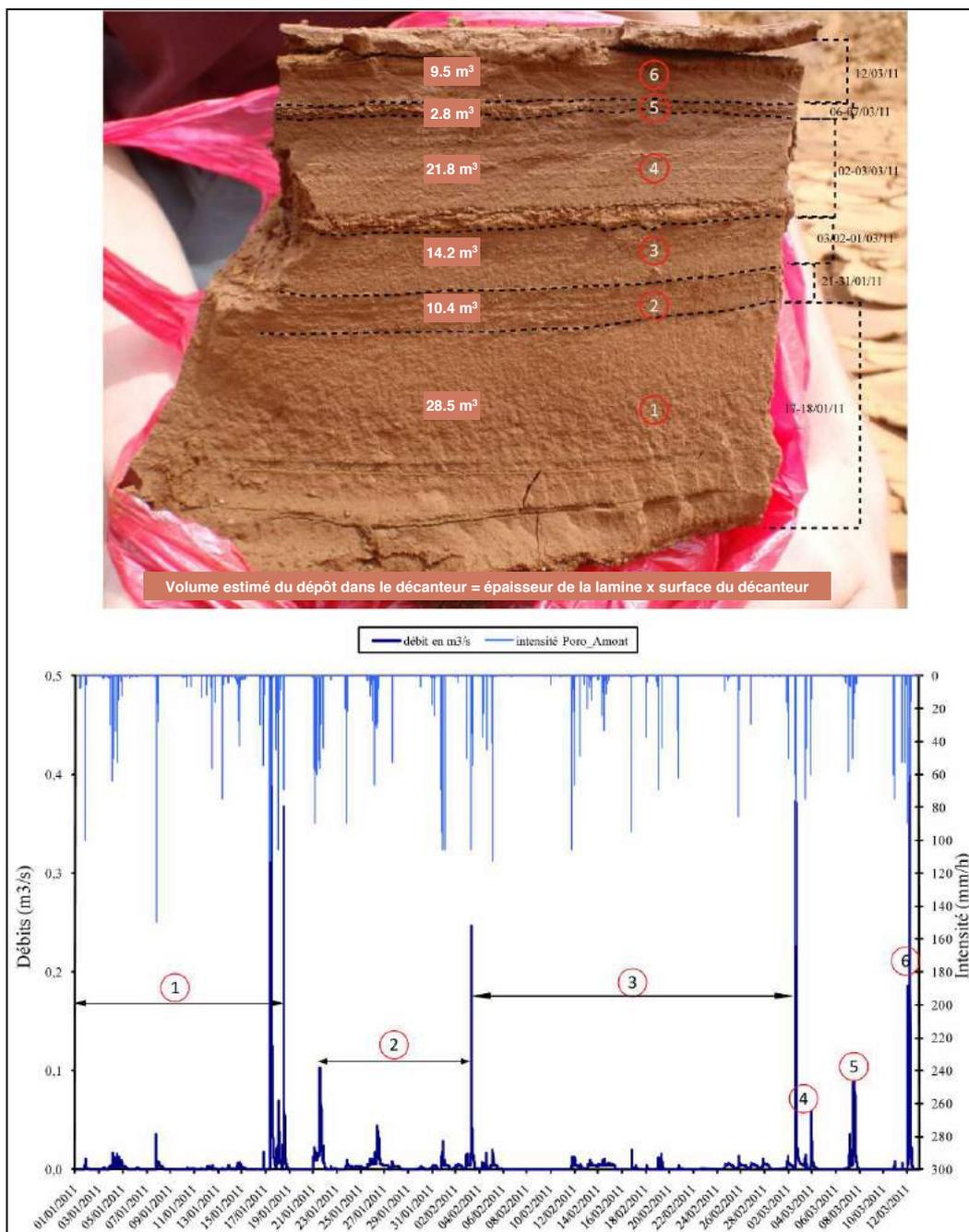


Figure 44 : Essai d'interprétation sédimentologique d'une carotte de sédiments prélevés en 2011 dans le décanteur FRN01

Au cours d'une crue ayant déversé à l'aval de FRN01, des prélèvements manuels ont été faits aux entrées et sorties des décanteurs. Concentration et granulométrie de ces échantillons ont été traitées. La concentration en MES est nettement plus élevée à l'amont qu'à l'aval. Sur les trois échantillons mesurés, les concentrations à l'aval sont 5 à 7 fois plus faibles. Les prélèvements d'eau à l'amont du décanteur FRN01 présentent une granulométrie plus grossière qu'à l'aval. Les D50 mesurés à l'amont sont compris entre 5 et 13 μm tandis qu'à l'aval les D50 varient de 4 à 9 μm . On peut donc considérer que les plus grosses particules ont sédimenté dans le décanteur mais les écarts restent modérés.

Suivi des décanteurs au cours de la saison cyclonique 2012

Le décanteur FRN01 a été curé le 29-30 novembre 2011. Le volume curé est de 490 m³. Le décanteur était donc vide lors de l'épisode du 24-25 décembre 2011. Selon les données de 2012 du CFTMC le décanteur n'a pas été curé au début de 2012. Lors du passage de la Davar début janvier (et du passage des stagiaires Irstea début février, le décanteur était également vide. On doit donc faire l'hypothèse que les décanteurs n'ont pu retenir des matériaux pendant la crue de décembre car les forts débits y ont entraîné des temps de séjour trop courts.

Des relevés dans le décanteur FNR01 ont été effectués, lors de la crue du 18/04/12 (Chillou, 2012). Ces relevés en entrée, centre et en sortie de bassin au moment du pic de crue (15h00) puis le jour suivant donnent une idée de l'évolution de la concentration en MES au cours de la crue puis de la décantation effectuée par FRN01. En 24h, les concentrations ont chuté de 3.35 g/l à 0.013 g/l qui est une valeur de concentration des eaux de rejet acceptable. Cette efficacité est toutefois limitée aux événements peu importants, la transparence des ouvrages par saturation de leur capacité de stockage étant remarquable pour les plus grosses crues.

6.7 Résumé et conclusion du chapitre 6

Entre **décembre 2008 et novembre 2013**, 415 épisodes pluvieux supérieurs à 5 mm ont été recensés à Poro. Ils sont répartis en trois groupes dans un catalogue des épisodes pluvieux :

- Les faibles : pluie entre 5 et 20 mm (299 épisodes)
- Les moyens : pluie entre 20 et 85 mm (95 épisodes)
- Les forts : pluie supérieure à 85 mm (21 épisodes)

Les **116 épisodes moyens et forts** ont fait l'objet d'analyses graphiques et statistiques détaillées.

De 2009 à 2013, la **pluviométrie annuelle**, en moyenne de **2200 mm**, a varié pratiquement du simple au double (1460 mm en 2009 et 2720 mm en 2012). Les valeurs sont calculées de début décembre à fin novembre et l'année 2012 inclut l'épisode de **Noël 2011** qui, avec **plus de 500 mm en 40 heures**, représente à lui seul 23 % de la pluviométrie moyenne annuelle. A toutes les échelles de temps, les différences entre les deux pluviomètres de Poro amont et Poro aval sont minimes (inférieures ou égales à 6 %). La "**pluie limite**" pour initier les processus de ruissellement sur les deux bassins de Poro s'établit autour de **15-20 mm**.

Les **débits maximums observés** sont de 3.6 m³/s à l'amont et de 9.2 m³/s à l'aval soit respectivement **41 et 30 m³/s/km²**. Ces valeurs extrêmement élevées comparativement à ce qui s'observe sur les bassins plus grands de la région (DAVAR, 2006) confirment la nécessité de disposer de mesures pour les tous petits bassins afin d'obtenir des règles de dimensionnement adaptées. Seule la poursuite des mesures sur le long terme permettra de réaliser des analyses fréquentielles. A Poro les événements les plus importants se sont produits pour les saisons cycloniques 2012 et 2013, soit plus de trois ans après le début des mesures. La pluie et surtout la fraction intense des précipitations sont les variables qui expliquent le mieux le débit de pointe. Les conditions climatiques antérieures aux épisodes de crues remarquables ne semblent pas influencer significativement les réponses des bassins versants.

A l'échelle de l'épisode pluvieux, les **coefficients de ruissellement** (ou écoulement rapide de crue) sont **extrêmement variables** et peuvent s'observer dans une **fourchette comprise entre 0.1 et 0.9**, à Poro Amont comme à Poro Aval. Le **coefficient d'écoulement moyen**, estimé par la pente de la relation pluie incidente/lame ruisselée est de **0.75 à 0.8 pour Poro amont et 0.5 à 0.6 pour Poro aval**. Les débordements qui s'observent en cas de fortes crues ne permettent pas de conclure sur les coefficients d'écoulement des épisodes forts à Poro aval. Pour la **crue de décembre 2011**, des observations détaillées des résultats des débordements ont permis de corriger les surfaces contribuant au débit de la station et le coefficient de ruissellement est certainement de l'ordre de **0.7 à 0.8** et non 0.56 calculé initialement sur les relevés de débit.

Les **temps de concentration sont très variables : 9 à 16 mm à Poro amont et 12 à 21 min à Poro**

aval. Les **formules de la littérature** couramment utilisées par les bureaux d'étude s'avèrent fortement **inadaptées** et fournissent des valeurs allant de deux à dix fois les valeurs observées. Les méthodes de calcul proposées par Irstea pour les bassins de montagne ou par la Davar pour les bassins à forte pente fournissent des résultats légèrement inférieurs aux valeurs observées, mais dans le même ordre de grandeur.

Pour l'étude des transports en suspension (**MES**), sur la période 2009-2013, 973 échantillons ont été traités à Poro amont et 647 à Poro aval (**1620 analyses**), représentant 95 crues échantillonnées dont 57 échantillonnées aux deux stations. Dans la plupart des cas, l'absence d'échantillons en cours de crue est due au fait que les 24 flacons disponibles étaient déjà pleins et les défauts de prélèvements par panne du matériel sont très rares. Les **concentrations** mesurées varient entre **0.002 g/l et 28 g/l**. Les concentrations sont en moyenne **plus faibles à l'aval qu'à l'amont, sauf pour la crue du 25 décembre 2011**. Les matériaux en suspension sont **extrêmement fins** avec des diamètres médians (D50) s'étagant entre **4 et 13 µ à l'amont, 5 et 30 µ à l'aval**

De manière classique, on n'observe **pas de relation claire entre concentration et débit** sur l'ensemble des échantillons mais des relations avec courbes **d'hystérésis à l'échelle de la crue** : à Poro amont, les crues sont généralement plus chargées en montée qu'en décrue. La situation inverse s'observe à Poro aval. On peut en déduire que les phénomènes d'arrachement dominant à Poro amont, ceux de transport dominant à Poro aval.

A l'échelle événementielle, il apparaît que **le flux total de MES** peut être **correctement estimé à partir du débit maximum de la crue**. L'association avec la fraction intense des précipitations améliore encore la prédiction.

Pour calculer les **flux annuels**, les flux des épisodes non échantillonnés ont été estimés à l'aide du débit de pointe de l'épisode. Sur l'ensemble de la période, les flux des crues non échantillonnées ne représentent que 8 à 13 % du total. **Le flux total sur la période est de 360 t à l'amont et 920 t à l'aval**, soit en moyenne 72 et 185 t par an respectivement. Les épisodes forts (plus de 85 mm de pluie) représentent 75 % des flux à l'amont et 90 % à l'aval. **A lui seul, l'épisode FINA représente 25 % du flux amont et 50 % du flux aval**. Ceci confirme la nécessité de réaliser des suivis dans la durée et de se donner les moyens d'obtenir des mesures sur les épisodes extrêmes.

Les **modélisations pluie-débit** avec le modèle HEC-HMS ont donné de **bons résultats**. Les paramètres PI et CN peuvent être déterminés en fonction de la durée de temps sec T_s et de l'intensité maximale I_{max15} . Les résultats sur les **modélisations sédimentaires** sont **plus mitigés**. Le paramètre K de l'équation MUSLE a été utilisé comme paramètre de calage et on obtient de bons résultats en validation sur 4 épisodes seulement. **D'autres types de modèles** devraient être testés **pour la modélisation de l'érosion**.

Les décanteurs situés entre les deux stations ont des volumes faibles au regard de la règle 2h/2ans. Au cours de la période 2009-2013, les volumes écoulés à Poro amont ont dépassé la capacité de FRN01 au moins 22 fois, soit en moyenne 4 fois par an. Ces **ouvrages sont efficaces sur les petites crues seulement**. Lors de la crue exceptionnelle du **24 décembre 2011**, l'ouvrage n'a assuré **aucune rétention des sédiments**.

7 Observations et résultats sur les autres sites

Les méthodes mises au point sur le site de Poro ont été appliquées aux données disponibles sur les autres sites. Cependant, comme cela a été indiqué au chapitre 4.3, les données sur ces sites sont souvent partielles et, très fréquemment, ne sont pas validées. Dans le cadre des stages conduits sur le projet de 2011 à 2013, les stagiaires ont interagi avec les responsables des suivis sur les mines pour traiter les données communiquées. Du fait des lacunes nombreuses dans les séries, certains traitements n'ont pu être effectués et en particulier, il ne sera pas possible de caler des modèles prédictifs ni de calculer des flux annuels.

7.1 Poum

7.1.1 Relation Pluie-Débit

Les précipitations sont connues au poste Salamandre de Météo-France depuis septembre 2008. Les précipitations annuelles (décembre à novembre) s'élèvent à 2230 mm en 2009 et 1150 mm en 2010. Les données de hauteur d'eau aux stations Povio et Titch sont disponibles à partir d'août 2010. Un premier examen de ces données en 2011 a montré des réactions assez contrastées sur certains épisodes entre les deux bassins. Il a donc été nécessaire d'analyser l'origine des discordances, entre un comportement différent des bassins et une exposition différente aux précipitations. Un poste journalier est disponible en bord de mer à Poum et les cumuls journaliers de ces deux postes ont été comparés. La Figure 45 identifie les épisodes pour lesquels les réactions des bassins Povio et Titch étaient très différentes et mettent en évidence des situations pluviométriques contrastées entre le bord de mer et le sommet du massif minier. C'est cette situation qui a conduit à équiper le massif de deux postes supplémentaires à partir de mars 2012.

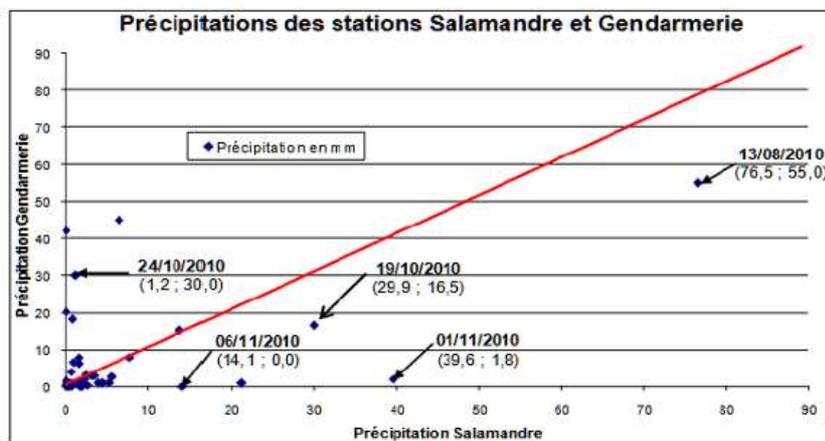


Figure 45 : Comparaison des pluies journalières aux deux stations Salamandre et Gendarmerie

L'incertitude sur les débits et par conséquent sur les volumes écoulés est forte car la seule relation hauteur/débit disponible est la courbe de tarage théorique des seuils dit "en aile d'avion" installés à Povio et Titch. Il n'a, jusqu'ici, pas été possible de réaliser des jaugeages.

La Figure 46 représente la lame écoulée en fonction de la pluie incidente pour le bassin de Titch. On observe un effet de seuil jusqu'à 24 mm de précipitations : quasiment aucune réponse en volume ruisselé n'est enregistrée. Au-delà, la lame écoulée suit proportionnellement la lame précipitée (Motto, 2013). L'équation de la droite de régression peut se mettre sous la forme :

$$\text{Lame} = 0.29 * (\text{Pluie} - 24)$$

Le coefficient d'écoulement moyen s'élèverait donc à 0.29 avec une interception initiale de 24 mm. L'examen des couples averse-crue met également en évidence une "pluie initiale" de l'ordre de 20 à 25 mm. Les coefficients d'écoulement des épisodes supérieurs à 20 mm s'étagent entre 0.06 et 0.30.

La même tendance s'observe sur le bassin Povio, mais le coefficient d'écoulement moyen est plus élevé (0.39) et la relation se met sous la forme :

$$\text{Lame} = 0.39 * (\text{Pluie} - 27)$$

Cette différence de coefficient d'écoulement moyen est cohérente avec le fait que le bassin Povio est plus impacté par l'activité minière que Titch.

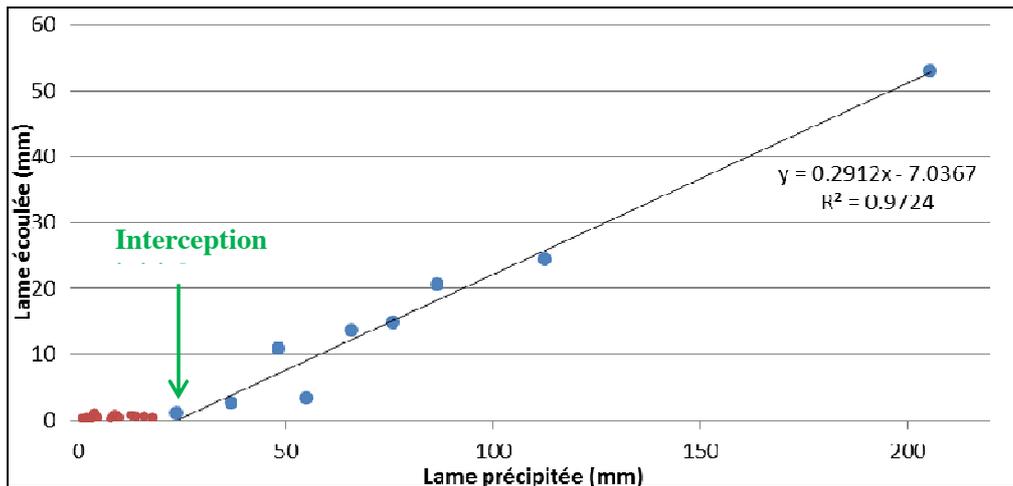


Figure 46 : Lame écoulée en fonction de la lame précipitée Titch

Les temps de concentration estimés à partir des couples averse-cru (décalage entre le centre de gravité des hyétogrammes et des hydrogrammes) se trouvent dans la fourchette 12-59 min à Titch et 15-76 min à Povio avec des médianes de 21 et 32 min, respectivement. Mais ces valeurs ont été calculées sur relativement peu d'épisodes de la période mars 2012-avril 2013 et mériteraient d'être complétées avec les données des épisodes plus récents.

7.1.2 Résultats sur les matières en suspension (MES)

Pour des raisons de difficulté d'accès, les crues échantillonnées en MES sont plus rares à Titch qu'à Povio. La concentration maximale atteinte à Povio est de 8.1 g/l tandis qu'elle n'est que de 2.8 g/l à Titch. Mais la crue (15/6/2013) qui a produit la plus forte concentration à Povio n'a pas été échantillonnée à Titch. Pour les crues échantillonnées simultanément sur les deux bassins, les concentrations sont en général moins élevées à Titch, sauf pour deux épisodes, avril et juillet 2013.

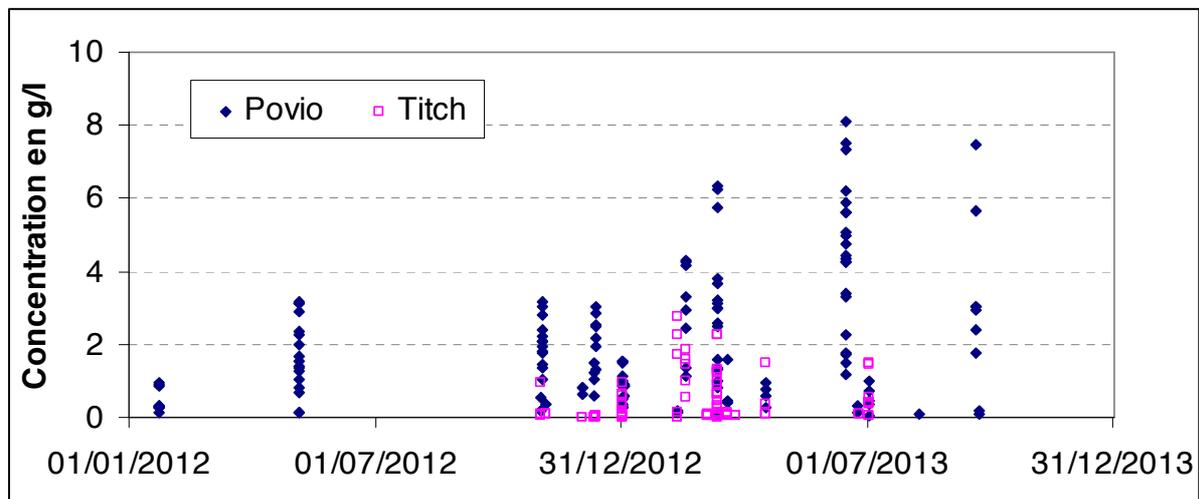
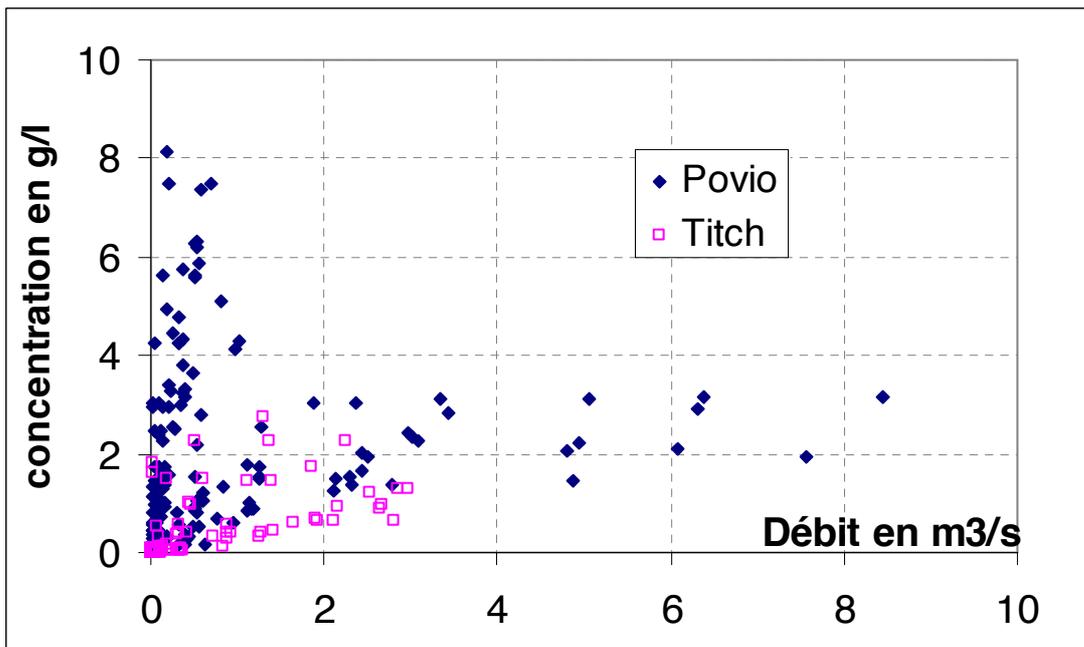


Figure 47 : Concentration mesurée aux stations de Poum

La Figure 48 montre que, comme à Poro, on ne trouve pas de relation entre concentration et débit. Les plus fortes concentrations à Povio s'observent pour des débits relativement faibles (inférieurs à $1 \text{ m}^3/\text{s}$). On peut estimer qu'au-delà, on assiste à un effet de dilution par les forts débits liquides des matériaux mobilisables. Cependant, on note également qu'au-delà de $3 \text{ m}^3/\text{s}$, les concentrations ne sont pas inférieures à 2 g/l. Ces fortes concentrations associées à de forts débits produisent des flux importants.



nt

Figure 48 : Relation Concentration-Débit pour les bassins de Pouvion

A l'échelle de l'épisode, on observe des hystérésis dans les relations concentration/débit. La Figure 49 illustre cette relation sur la crue du 5 mai 2012 qui est bien échantillonnée. Cet épisode a enregistré une pluie de 76 mm à Titch et 59 mm à Povio. La lame écoulee s'élève à 17.4 mm soit un coefficient d'écoulement de 0.26. Cette crue a exporté 28,6 t de MES avec une concentration de 1.8 g/l.

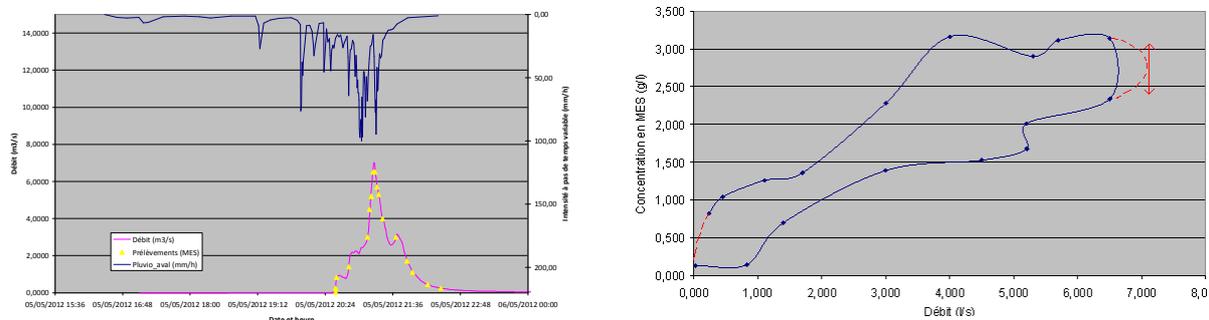


Figure 49 : Graphe Pluie-Débit et Relation Concentration-Débit pour la crue du 5 mai 2012 à Povio (Guyonneau, 2012)

7.2 Koniambo

Remarque : Comme indiqué aux paragraphes 4.1.2 et 4.3.2, les difficultés de choix des stations et les modifications subies par les sites ont rendu difficile l'obtention de chroniques suffisamment documentées pour permettre une analyse complète. Néanmoins, des analyses d'épisodes ponctuelles permettent d'aborder le fonctionnement hydrologique des petits bassins miniers du Koniambo.

En fin de projet, on peut considérer que le couple SW34 et SW38 constitue un jeu de sites satisfaisant. Les améliorations successives apportées depuis 2012 sur l'équipement et la gestion des stations, sur l'archivage et la critique des données laissent espérer des chroniques exploitables en hydrologie minière.

7.2.1 Relation Pluie-Débit

La Figure 50 présente la relation pluie/lame écoulée pour les événements de l'année 2012 (et début 2013) sur SW34 et SW35 (Motto 2013). On note que les écoulements sont très faibles au regard des pluies incidentes, sauf pour les événements les plus forts. Le point extrême sur ces graphes correspond à l'évènement FREDA de janvier 2013 qui sera détaillé au paragraphe 7.4. L'interception initiale est élevée, de l'ordre de 30 mm sur les deux bassins. Ces deux bassins ont subi des transformations entre 2011 et 2012. A l'amont de SW34, le bassin de sédimentation a été recreusé. Les petites crues sont complètement stockées dans ce bassin et le début des écoulements dans la station sont fortement retardés pour les crues plus importantes. A l'amont de SW35, une grande verse a été aménagée. Pour les épisodes faibles et moyens, le ruissellement à l'aval de cet ouvrage est très limité. On note que les coefficients de ruissellement restent inférieurs ou égaux à 20% pour les épisodes faibles et moyens mais peuvent devenir très élevés pour les épisodes très forts (FREDA).

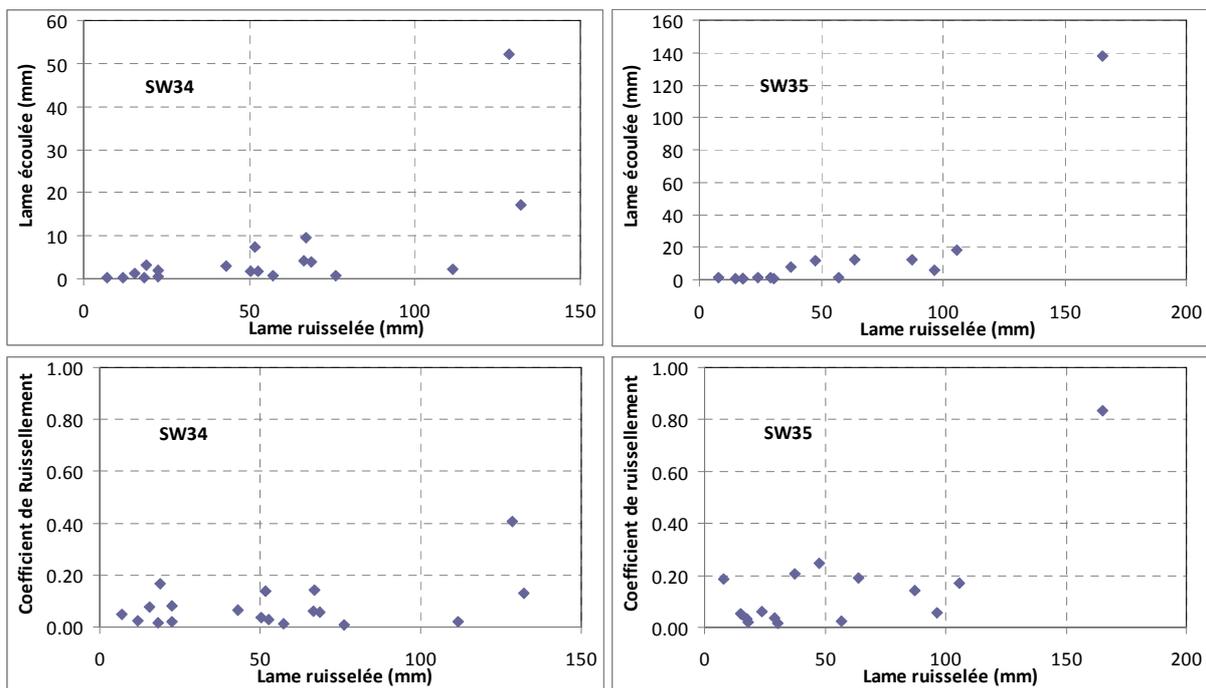


Figure 50 : Relation Pluie/Lame écoulée et coefficient de ruissellement à Koniambo (année 2012)

7.2.2 Résultats sur les matières en suspension (MES)

Des mesures de concentration en MES sont disponibles sur le bassin SW34 pour des périodes antérieures au projet. Elles sont reportées sur la Figure 51. Il est difficile d'associer de manière fiable des débits à ces concentrations car les doutes sur le calage du zéro dans les canaux jaugeurs occasionnent une grande incertitude sur les débits (Guyonneau, 2012 ; Motto, 2013). Les concentrations maximales observées dépassent fréquemment 1 g/l et la valeur maximale enregistrée est de 5.7 g/l en janvier 2014.

Les concentrations mesurées sur la station SW35 sont nettement plus élevées avec une concentration maximale de 34 g/l atteinte au cours de la crue du 12 mars 2012. Cette crue est intervenue après une période d'activité intense dans le bassin versant : décapage, ouverture de pistes, construction de verses, etc... comme le montrent les images de la Figure 53.

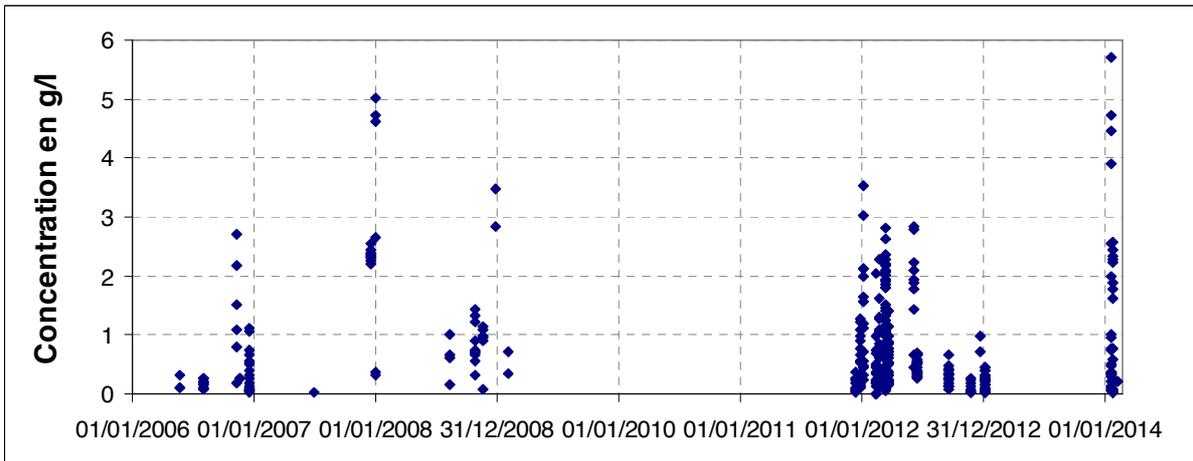


Figure 51 : Mesures de concentration disponibles sur le bassin SW34

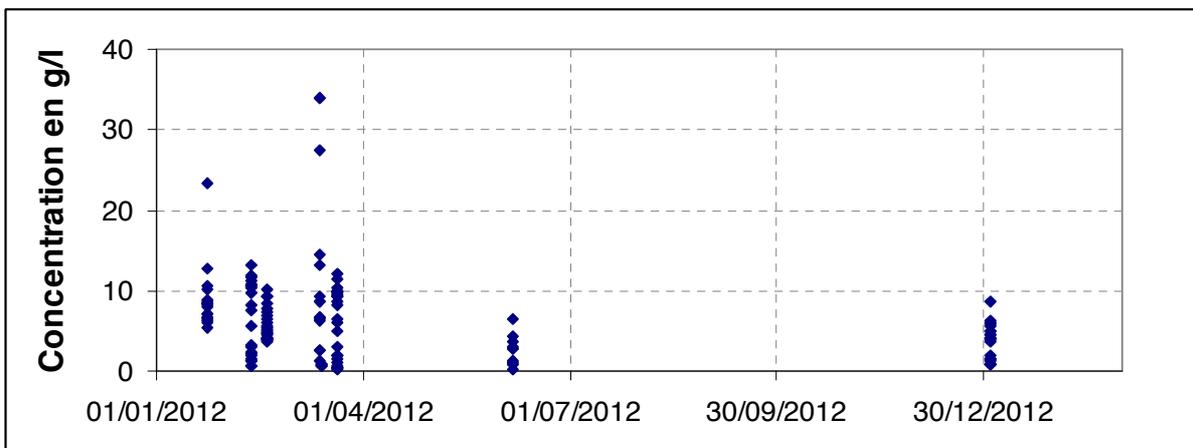


Figure 52 : Concentrations mesurées sur le bassin SW35



Figure 53 : Terrassements dans le bassin versant SW3, Photo KNS, Mars 2012

7.3 Goro

Les difficultés de création, d'équipement et de gestion des stations ont été décrites aux paragraphes 4.1.1 et 4.3.1. De plus, sur les stations KN15 et KO6 finalement incluses dans le projet, les chroniques disponibles sont limitées. Ce paragraphe donnera donc seulement quelques résultats partiels.

7.3.1 Relation Pluie-débit

La Figure 54 résume les résultats obtenus pour les crues de 2011 et 2012 sur le bassin KN15. Les données de l'épisode FINA du 4 décembre 2011 n'ont pas été reportées car elles ne peuvent être validées en l'état. Pour une pluie incidente de 455 mm, la lame écoulee calculée sur les données de hauteur converties en débit n'est que de 86 mm, alors qu'un épisode de 168 mm (4 février 2012) a produit une lame écoulee de 89 mm.

On observe deux groupes d'épisodes sur la relation lame écoulee/pluie. Les épisodes faibles s'aligneraient sur une droite de pente 0.25, tandis que la relation se redresse fortement pour les pluies supérieures à 80 mm, avec une pente de l'ordre de 0.8. Sur cet échantillon, les coefficients de ruissellement sont dispersés mais restent inférieurs à 0.30 pour les pluies inférieures à 80 mm. Ils dépassent 0.5 pour les pluies les plus fortes. Cependant, aucune pluie supérieure à 200 mm ne figure dans cet échantillon, ce qui limite la portée de l'analyse.

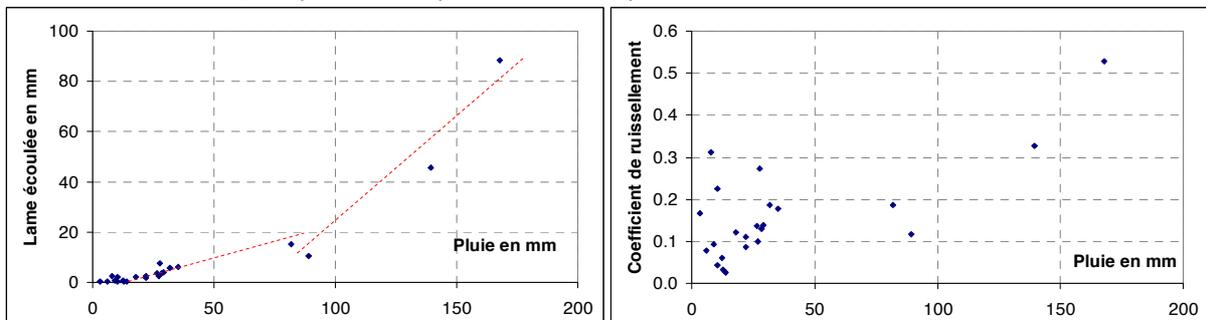


Figure 54 : Relation Pluie/Lame écoulee et coefficients de ruissellement, bassin KN15 de Goro

On retrouve la même anomalie sur KO6 pour l'épisode FINA, mais le faible coefficient d'écoulement (0.37) se retrouve également sur cette station pour l'épisode FRED A (0.30). Ces anomalies pourraient être dues à des mesures erronées pour les grandes hauteurs d'eau ou une inadéquation de la courbe de tarage. Cette analyse mériterait d'être complétée avec les hydrologues de Vale. Si on exclut ces deux épisodes, on retrouve deux groupes d'épisodes avec un seuil entre les deux populations autour de 80 mm mais des pentes légèrement plus faibles (0.18) et (0.75).

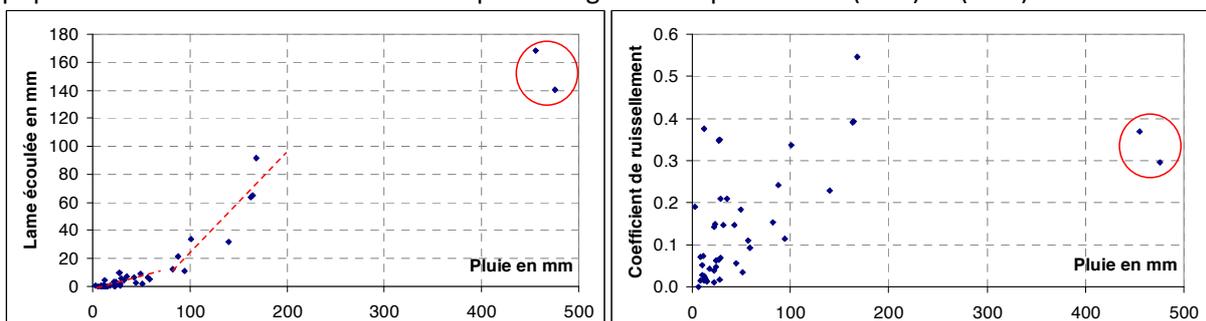


Figure 55 : Relation Pluie/Lame écoulee et coefficients de ruissellement, bassin KO6 de Goro

7.3.2 Résultats sur les matières en suspension (MES)

Les données disponibles pour les deux stations montrent des valeurs maximales de 0.08 g/l pour KN15 et 0.2 g/l pour KO15 mais les crues fortes ne sont en général pas échantillonnées. De plus, ces valeurs sont surprenantes car les préleveurs sont déclenchés sur des seuils de turbidité qui devraient correspondre à des concentrations plus élevées

7.4 Comparaisons entre les sites pour l'épisode Freda

7.4.1 Conditions météorologiques de l'épisode

Le début du mois de janvier 2013 a été marqué par le passage de la dépression tropicale modérée FREDa sur la Nouvelle-Calédonie, du Nord de la Grande Terre aux Iles Loyauté dans la nuit du 2 au 3 janvier avant de s'évacuer vers l'est le 3 janvier en fin de matinée. FREDa a engendré des pluies diluviennes qui ont occasionné localement des dégâts importants. A Houailou, 425 mm de pluie ont été recueillis en 24 heures au plus fort de l'épisode. Cette quantité de précipitations est exceptionnelle, bien qu'elle soit en dessous du record établi le 25 décembre 2011 (528 mm. Dans la région de Goro, on a mesuré jusqu'à 438 mm en 24 heures, soit 40 mm de moins que pendant le passage de la dépression tropicale forte Vania en janvier 2011. Sur la côte Ouest de la Grande Terre, en plaine, les pluies ont été soutenues, dépassant les 100 mm en 24 heures en de nombreux endroits, sans toutefois revêtir un caractère exceptionnel en termes d'intensité. Néanmoins, les précipitations importantes qui se sont produites sur la chaîne ainsi que leur caractère généralisé ont pu favoriser le débordement de certains cours d'eau. (D'après Météo France Nouvelle-Calédonie, 2013).

7.4.2 Pluies

Le Tableau 16 rassemble les informations pluviométriques sur les sites de Poro, Koniambo et Poum. A la date de la rédaction de cette synthèse, les données de Goro n'étaient pas disponibles (Motto, 2013). Ces données sont cohérentes avec celles de Météo France NC. Le pluviographe aval de Poro proche de Houailou enregistre 458 mm de cumuls pluvieux sur 24 heures. Les cumuls enregistrés sur les sites de Koniambo et Poum sont respectivement comparables à ceux enregistrés sur Koné et Poingam / Koumac.

La période de retour annoncée par Météo France de 20 ans à Houailou est largement supérieure sur le site de Poro avec les 40 ans calculés à Poro amont, et près de 100 ans pour la pluie de 24 h à Poro aval. Les périodes de retour calculées sur des faibles durées restent petites : entre 1 et 6 ans, alors que les périodes de retour pour les pluies d'un jour sont nettement supérieures à Poro. La pluie de l'évènement Freda est donc caractérisée par des intensités instantanées moyennes, mais des volumes précipités particulièrement conséquents sur 24 heures.

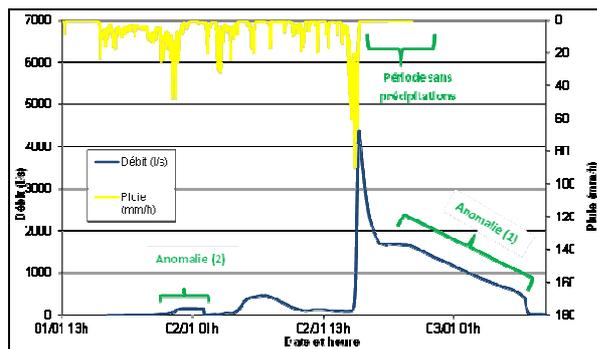
Au sein mêmes des sites miniers la variabilité de la pluie est forte : 48 mm et 45 mm de différence sur les cumuls entre les pluviographes de Poro et Poum respectivement. La tendance du pluviographe Titch à recevoir systématiquement plus de pluie que celui de Povio est donc bien respectée. Les intensités maximales rapportées à des pas de temps faibles (6 minutes et 15 minutes) sont comparables pour les 3 sites. Pour des pas de temps plus élevés, Poro majore largement les intensités maximales.

Tableau 16 : Caractéristiques des épisodes pluvieux

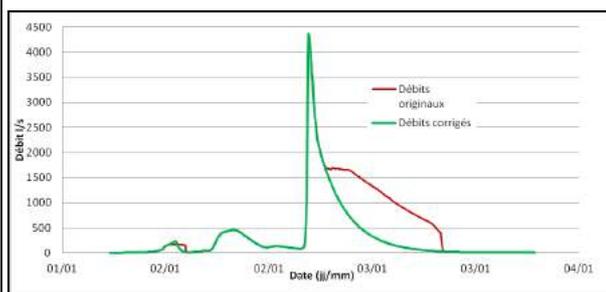
Site	BV	Pluie (mm)	Intensité maximale				Période de retour			
			15min	1h	2h	24h	15min	1h	2h	24h
Poro	<i>Amont</i>	406			47	17	1	2	4	41
	<i>Aval</i>	458	62	54	52.5	19			6	92
Koniambo	<i>SW34</i>	136	59	47	26	5	1	2	1	2
	<i>SW35</i>	165	50	37	21	6	1	1	1	2
Poum	<i>Povio</i>	161	36	19	19	6	1	1	1	2
	<i>Titch</i>	206	58	26	23	8	1	1	1	4

7.4.3 Débits

A Koniambo, cet évènement fait partie de ceux qui ont mis en évidence l'influence de la digue du barrage situé en aval sur les hauteurs enregistrées. La Figure 56 illustre les anomalies constatées et la correction appliquée sur la courbe de décrue.



Graphe pluie-débit de SW35



Hydrogramme corrigé

Figure 56 : Correction de la décrue sur SW35 pour l'épisode FREDA (Motto, 2013)

Le Tableau 17 regroupe les résultats sur les caractéristiques des réponses des bassins versants. Il faut rappeler qu'en dehors de Poro, les bassins n'ont pas fait l'objet de jaugeages et que les débits sont entachés d'une grande incertitude. A Poro Amont, le canal est en débordement dans la section non bétonnée et à Poro Aval les débordements sur les pistes détournent une partie des écoulements.

Tableau 17 : Caractéristiques hydrologiques des réponses des bassins versants

Site	BV	Pluie (mm)	Lame écoulée (mm)	Cr (%)	Tc (min)
Poro	<i>Amont</i>	406	402	99	13
	<i>Aval</i>	458	206	45	23
Koniambo	<i>SW34</i>	128	52	41	12
	<i>SW35</i>	165	138	83	20
Poum	<i>Povio</i>	161	61	38	36
	<i>Titch</i>	206	53	26	19

Le coefficient d'écoulement à Poro amont est proche de 1. A Poro aval il est certainement fortement sous-estimé à cause des débordements. Les temps de concentration sont tous proches du minimum de la fourchette observée sur les autres couples averse-crue.

7.4.4 MES

Les préleveurs automatiques ont fonctionné sur les trois sites miniers (Poro, Koniambo et Poum). Sur les trois sites, les prélèvements se cantonnent aux débuts de crues, le premier pic est en général correctement échantillonné, mais la majeure partie de l'évènement, en particulier les débits les plus forts ne sont pas représentés. Sur la station SW35, les horaires de prélèvements ont été perdus par les opérateurs. Des horaires supposés de prélèvements ont été conjecturés au vu de la programmation de l'échantillonneur.

Pour les bassins de Poum et Koniambo le flux solide total généré par l'évènement a été approximé par deux méthodes :

- Les flux solides et liquides sont calculés sur les périodes correctement échantillonnées et une concentration moyenne de la partie échantillonnée est déterminée. Cette concentration moyenne est appliquée au flux liquide total de l'évènement. Seuls les premiers pics de débits étant échantillonnés, on peut penser que la concentration en MES sera plus forte pour les très forts débits. Cette méthode pourrait sous-estimer le flux sédimentaire. Mais on peut aussi penser qu'une dilution intervient lorsque les volumes écoulés sont importants.
- Une relation concentration / débit est établie à partir des prélèvements. Cette relation est appliquée à tous les débits mesurés de l'hydrogramme.

Le Tableau 18 regroupe les résultats obtenus. On note que l'incertitude liée à la méthode d'interpolation est forte. A cela s'ajoute l'incertitude sur les valeurs des débits.

Tableau 18 : Concentrations observées et flux calculés pour l'épisode FREDA

Site	BV	C max g/l	Flux en t		Incertitude %	Flux spécifique t/km ²
			Méthode Concentration moyenne	Méthode Concentration Débit		
. Poro	<i>Amont</i>	1,4		34		378
	<i>Aval</i>	0,7		42		140
Koniambo	<i>SW34</i>	0,5	6	33	82	[12,68]
	<i>SW35</i>	8,7	149	73	51	[199,407]
Poum	<i>Povio</i>	1,5	52	67	22	[52,67]
	<i>Titch</i>	1	21	15	29	[19,27]

Le flux solide sur la station Poro aval est nettement plus faible que sur la station amont et devrait être corrigé pour tenir compte des débordements. Il est de plus très possible que la relation concentration-débit établie sur le début de la crue ne soit pas adaptée aux forts débits enregistrés par la suite. Il est possible également que le flux soit surestimé à Poro amont. En effet, les observations sur les décanteurs ont montré que les décanteurs n'avaient pas piégé de sédiments pendant cet épisode. On peut donc estimer que la totalité du flux amont a traversé la station aval. Un supplément de matériaux de seulement 12 t pour le reste du bassin versant semble peu probable.

A Koniambo, le bassin SW35 génère considérablement plus de sédiments que le bassin SW34, quelle que soit la méthode de calcul utilisée. Ceci est cohérent avec le niveau de décapage et l'activité minière de ces bassins.

7.4.5 Conclusion sur l'épisode FREDA

L'épisode **Freda** a été beaucoup plus actif sur la côte est et sur le sud de la Grande Terre. L'absence de données disponibles pour cet évènement à Goro n'a pas permis la comparaison entre les sites les plus touchés. **Les périodes de retour** sur les courtes durées de pluie sont **comparables pour tous les sites** mais le caractère soutenu des précipitations a rendu **l'évènement plus exceptionnel à Poro**. Les exportations de matériaux sont nettement plus modérées à Poum et Koniambo, sauf pour SW35 qui était soumis à une intense activité de terrassement pendant cette période.

Les difficultés d'estimation des débits et des flux solides confirment la nécessité d'adapter les dispositifs de mesure et les stratégies de suivi pour pouvoir observer les évènements extrêmes. Enfin, l'ajout de turbidimètres, en parallèle des préleveurs, permettrait de limiter les incertitudes sur les calculs de flux.

7.5 Essais de transfert des modélisations réalisées à Poro

Un premier essai de transposition à Koniambo des modélisations avec HEC-HMS a été tenté (Aksoy, 2014). Les mêmes modèles élémentaires et les mêmes fonctions de transfert ont été utilisés (méthode du SCS-CN pour la fonction de production, et l'hydrogramme unitaire de Clark pour la fonction de transfert, modèle MUSLE pour l'érosion). La modélisation a porté sur 6 épisodes bien échantillonnés en MES.

7.5.1 Modélisation pluie-débit

La pluie d'interception (Initial abstraction) a été fixée à 12 mm, le temps de concentration (Tc) a été évalué par méthode graphique et fixé à 30 min. La méthode de calage validation est la même que celle utilisée lors de la première modélisation pluie-débit pour le BV de Poro mais étant donné le faible effectif, une seule classe a été établie. Après des tests sur les six épisodes, un épisode a été retenu comme référence et le Curve Number CN fixé à 30. Cette valeur est dans l'ordre de grandeur des valeurs adoptées pour Poro aval avec des temps secs relativement longs.

Pour les 5 épisodes restant en validation, les débits sont correctement reproduits pour trois

épisodes. Pour les deux autres épisodes, les chroniques sont apparues comme douteuses, soit en précipitation (20 mars 2012), soit en débit (18 janvier 2014). Sur ce dernier épisode, la pluie très importante n'a quasiment pas enregistré de variation de hauteur d'eau à la station. La Figure 57 illustre la modélisation de l'épisode FREDA. Les pics de débit sont correctement reproduits et chronologiquement bien calés.

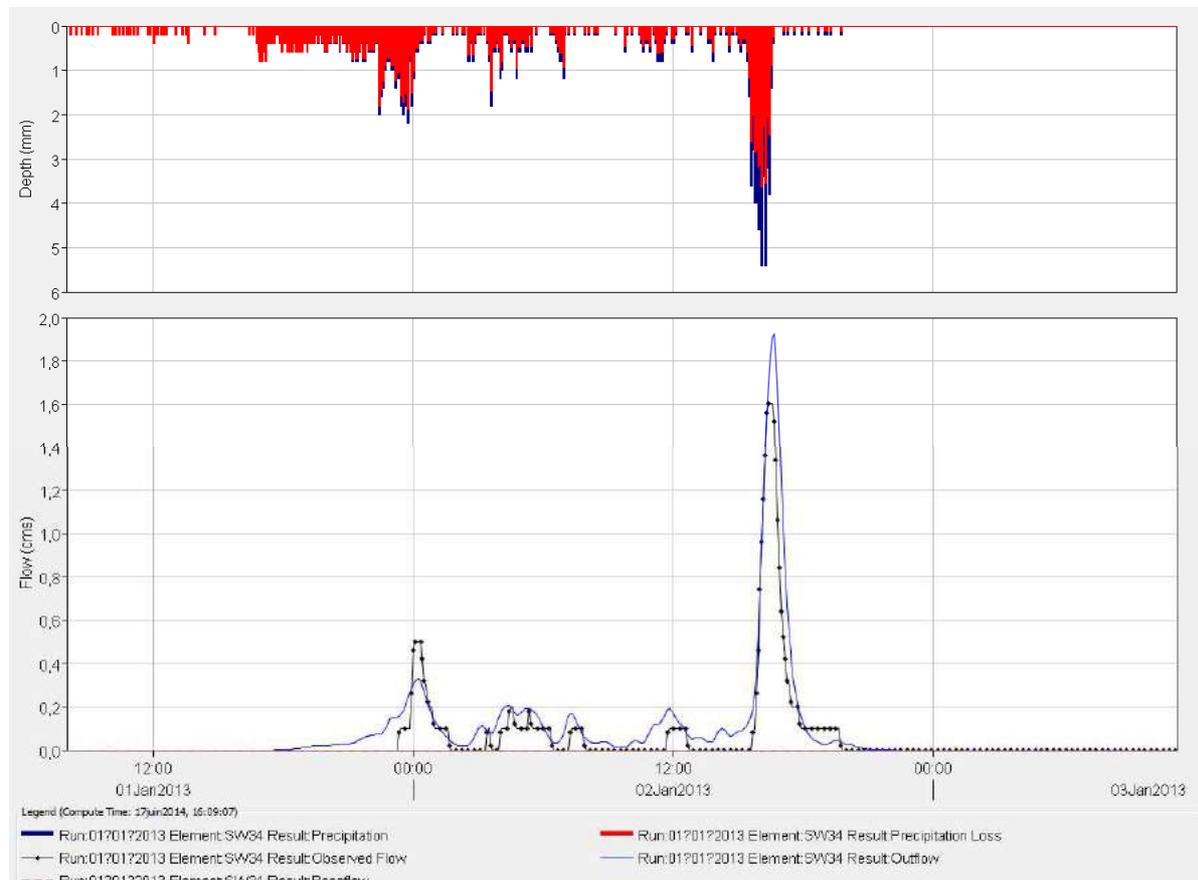


Figure 57 : Modélisation HEC-HMS (Pluie-Débit) sur le bassin SW34

7.5.2 Modélisation de l'érosion

Dans un premier temps, le calcul des débits solides observés a été effectué avec une interpolation proportionnelle au débit. Cette interpolation a permis d'obtenir les flux et les concentrations (au pas de temps de 5 minutes) nécessaires à la mise en œuvre du modèle. Les différents paramètres de l'équation d'érosion ont été estimés en fonction des données disponibles et de la littérature

- Erodibility factor (K) 0.0015 (valeur initiale pour le calage)
- Topographic factor (LS) 5.5
- Cover factor (C) 0,5
- Practice factor (P) 1

La définition et les unités sont les suivantes :

- K : facteur d'érodabilité des sols [$t.h.MJ^{-1}.mm^{-1}$]
- C : facteur adimensionnel de la couverture végétale et des pratiques culturales
- L : longueur de pente [m],
- S : inclinaison de pente [%]
- P : facteur adimensionnel lié aux pratiques de conservation des sols

Seuls les évènements ayant produit des résultats convenables lors de la modélisation pluie débit ont été retenus, soit un épisode en calage et trois épisodes en validation. Le paramètre de calage reste le facteur K, comme à Poro. La valeur initiale de 0.0015 a été conservée car elle produisait les meilleurs résultats. Deux des épisodes de validation reproduisent parfaitement le flux total mesuré

avec une erreur de moins d'une tonne (Exemple du 12/03/2013 sur la Figure 58). Pour le dernier épisode (1/1/2013) le modèle surestime le flux total. Il reproduit parfaitement le pic principal, mais produit des pics secondaires de concentration absents des données observées.

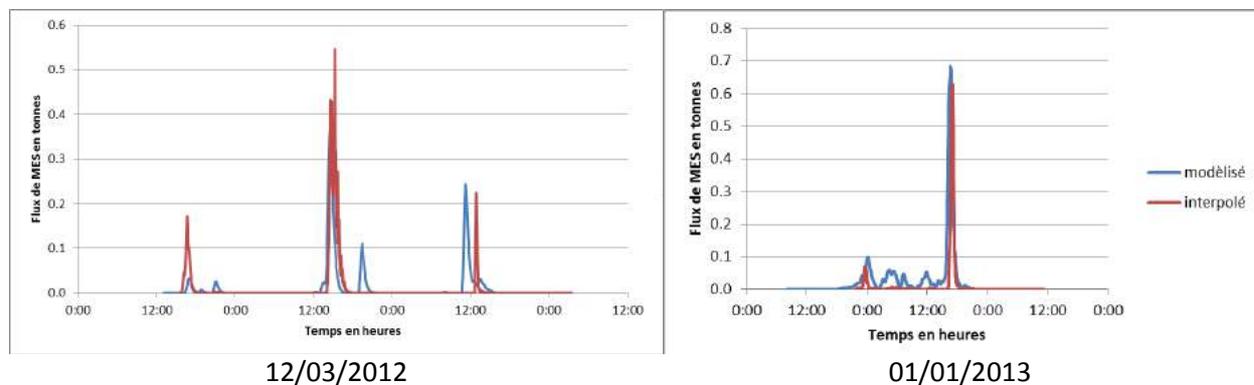


Figure 58 : Résultats des modélisations sédimentaires sur Koniambo (bassin SW34)

7.5.3 Conclusion sur la modélisation HEC-HMS à Koniambo

La modélisation sédimentaire effectuée sur le BV SW34 de Koniambo semble donc relativement plus concluante que la modélisation effectuée à Poro. Il est toutefois à noter que l'on ne dispose que de quelques épisodes et ces résultats certes encourageants sont à tempérer. Une modélisation plus poussée avec une palette d'évènements couvrant les différents états hydriques possibles du sol serait nécessaire pour confirmer cette tendance. Il serait souhaitable également de tester ce modèle sur les données de Poum.

8 Le fonctionnement des décanteurs sur les sites miniers

8.1 Un point crucial dans la gestion des eaux sur mine

La problématique environnementale des "eaux rouges" est particulièrement aigüe en Nouvelle-Calédonie à l'aval des sites miniers. Les particules fines entraînées par les écoulements lors des évènements pluvieux impactent les milieux en aval, des cours d'eau jusqu'au lagon. En effet, les activités minières à ciel ouvert décapent des surfaces importantes où les particules fines sont aisément mobilisables. Le problème d'entraînement de sédiments par les pluies est particulièrement accentué par le contexte hydrologique et climatique (climat subtropical associé à des pluies soutenues sur de courtes durées).

Depuis longtemps les sites miniers se sont équipés de bassins de décantation afin de limiter les phénomènes d'érosion et de transfert en aval de ces sédiments. L'effet de ces bassins semble toutefois limité en cas de forte crue, traduisant la nécessité d'élargir les connaissances autour de la problématique des décanteurs.

Au vu des problèmes environnementaux générés par l'exploitation minière et de l'absence d'étude de référence sur cette question, le gouvernement calédonien et les structures rattachées dont la DAVAR et la DIMENC, ont mis en place des critères généraux communs de conception d'ouvrages, regroupés dans la Charte des Bonnes Pratiques Minières. Ces critères ne prennent cependant pas en compte les spécificités de chaque site et correspondent toujours à des situations extrêmes, pour des raisons de sécurité. Le coefficient de ruissellement est par exemple imposé à un minimum de 0,8, représentant une situation de ruissellement sur sol nu et sans infiltration. La DAVAR est également à l'origine du choix de dimensionnement de la capacité des ouvrages selon le principe dit des "2h/2ans" (retenir deux heures de précipitation d'un évènement de récurrence 2 ans). Dans la pratique, ce sont souvent les contraintes locales (espace disponible, pentes) qui imposent ce qui peut concrètement être réalisé et les mineurs sont tenus de justifier les volumes de rétention

lorsqu'ils sont inférieurs à 100% de la capacité théorique (2h/2ans). L'ensemble de la profession comme les autorités de tutelle sont en demande de méthodes de conception et de dimensionnement qui s'appuient sur des données et des observations locales. C'est dans ce contexte que l'équipe ETNA d'Irstea a réalisé une étude exploratoire sur le fonctionnement des décanteurs qui a été effectuée dans le cadre d'un stage de fin d'études d'ingénieur ENGEES (Andrey Chillou, mars à juillet 2012).



Figure 59 : Illustrations du phénomène des eaux rouges et des ruissellements sur mine

8.2 Etude exploratoire sur le fonctionnement des décanteurs et la faisabilité d'une modélisation

Cette étude fait l'objet d'un mémoire de stage qui s'articule en 4 Parties :

- Contexte minier et logiques de gestion de l'eau
- Etat de l'art des connaissances concernant les décanteurs
- Données disponibles et générées au cours du stage
- Tests des modèles de décantation avec les données d'entrée acquises

On se reportera à ce document pour le détail de l'étude (Chillou, 2014). Seules quelques observations et mesures seront rappelées ci-dessous.

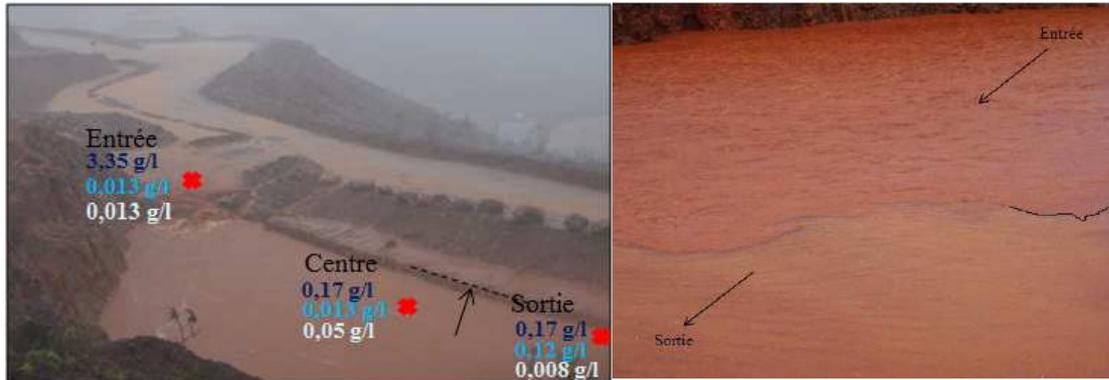
8.2.1 Mesure des concentrations en MES au sein d'un décanteur

Des relevés ont donc été effectués, lors de la crue du 18/04/12 à Poro, sur FRN01. Ces relevés en entrée, centre et en sortie de bassin au moment du pic de crue (15h00) puis le jour suivant (prélèvements à 08h30 puis 15h00) donnent une idée de l'évolution de la concentration en MES au cours de la crue puis de la décantation effectuée par FRN01. On remarque une forte disparité entre les mesures effectuées le 18/04 en entrée de FRN01, où l'eau chargée arrive, et en son centre, où l'eau de la crue précédente a commencé à décanter. Cette disparité est visible à l'œil nu sur le terrain, comme le montre la figure 60 ci-dessous. Le flux arrivant dans le bassin a tendance à mélanger les eaux décantées avec les nouvelles eaux chargées. Un système de vidange aurait permis d'éviter ce phénomène en évacuant les eaux déjà décantées. On remarque d'autre part que le 19/04 à 15 h, les valeurs de concentration ont augmenté en entrée et au centre du bassin. L'existence d'une marche, visible le long du bassin sur la figure 59 peut être source de remous et de reprise de sédiments lorsque le niveau de l'eau baisse jusqu'à l'atteindre. Cela expliquerait une augmentation locale de la concentration aux prélèvements en entrée et au centre.

Cette mesure renseigne sur l'efficacité du bassin en termes de décantation, malgré la zone de reprise observée. En 24 h, les concentrations ont chuté de 3.35 g/l à 0.013 g/l qui est une valeur de concentration des eaux de rejet acceptable selon la norme NF T 90105. L'efficacité des bassins de décantation est également une conclusion de L. Carpentier (2011). Cette efficacité est toutefois limitée aux événements peu importants, la transparence des ouvrages par saturation de leur

capacité de stockage étant remarquable pour les plus grosses crues.

Ces valeurs de prélèvements ponctuels ont été mises en relation avec les concentrations en MES mesurées au seuil amont et aval lors de la crue du 18/04/12 mais il est cependant peu aisé de tirer des conclusions car on observe un décalage temporel des courbes de concentration. Les données évoquées ci-dessus donnent une idée de la quantité de sédiments piégée dans les bassins et circulant sur bassin plus généralement mais elles ne sont cependant pas suffisantes pour rendre compte des différents facteurs intervenant dans l'érosion des bassins versants et dans le transport solide. Afin de déterminer quel type de matériaux, fins ou grossiers, se déposent, il faut associer des mesures de granulométrie aux données de concentration et flux MES afin d'avoir des données exploitables pour les modèles de décantation.



Localisation des prélèvements au sein de FRN01

Observation de 2 phases dans FRN01

Figure 60 : Observations dans le décanteur FRN01 de Poro pour la crue du 14/04/2012

8.2.2 Granulométrie des dépôts dans les décanteurs

Prélèvements et hypothèses

Des prélèvements en entrée et en sortie ont été réalisés au sein d'un ou plusieurs bassins de décantation de chaque mine. Ces relevés en entrée et en sortie ou centre du bassin sont réalisés dans le but d'avoir une idée de la répartition horizontale de la granulométrie dans un décanteur. On s'attend en effet à ce qu'il y ait des matériaux grossiers de charriage en entrée et des matériaux plus fins transportés par suspension plus au centre et en sortie de bassin. On a cherché d'autre part à avoir une idée de la répartition verticale de la granulométrie à chaque point de prélèvement. Des prélèvements plus précis ont ainsi été réalisés afin d'analyser les différentes couches observées (prélèvement avec un tube selon les conditions de terrain). Pour les sites où les conditions de prélèvement étaient les meilleures (épaisseur et humidité des couches de dépôts), on a en effet pu observer une stratification.

L'alternance de couches claires et de couches sombres permet d'émettre l'hypothèse de dépôt de particules selon leur vitesse de chute et selon les conditions hydrauliques de l'écoulement. Ces couches correspondraient selon la même hypothèse à des fines latéritiques (10 à 20 µm) pour les couches les plus claires et à de la grenaille (matériaux plus grossiers) pour les couches les plus sombres. On ne peut cependant pas écarter l'hypothèse selon laquelle la couleur des différentes couches pourrait être due à d'autres phénomènes. Une analyse fine de la granulométrie de ces différentes couches a donc été nécessaire.

Méthodes d'analyses

Des analyses au tamis ont d'abord été réalisées mais elles sont imprécises pour les fractions inférieures à 100 µm. Or les D50 des particules se trouvent souvent en dessous de 100 µm. Les analyses ont donc ensuite été complétées par des mesures au granulomètre Laser, soit à l'UNC soit à Grenoble.

Résultats

D'un point de vue global, les fines ($< 100 \mu\text{m}$) représentent la fraction granulométrique dominante dans les dépôts (plus de 50 %, souvent 80 à 90 % des échantillons). Ces analyses couplées aux observations de terrain (présence de gros blocs et galets en entrée) permettent de conclure qu'il y a un dépôt de matériel plus grossier (voire de matériel de charriage) en entrée par rapport au centre ou en sortie de décanteur. Les matériaux rencontrés dans les bassins de Koniambo semblent plus fins que ceux rencontrés dans le bassin B18 de Poum ou dans les bassins de Poro.

Les granulométries des différentes couches, sur les bassins où une stratification a pu être observée (SW34, SW35), ont été réalisées. Pour SW34 en entrée comme au centre, les D50 des couches claires sont compris entre 10,5 et 15,6 μm tandis que les D50 des couches sombres sont compris entre 20,9 et 42,9 μm soit près de deux fois plus. La différence de granulométrie relatée entre les couches claires et les couches sombres peut être expliquée par la dynamique des crues. Les éléments les plus gros se déposeraient en premier, formant une couche sombre et les éléments plus fins se déposeraient ensuite, après un certain temps d'arrêt de l'écoulement, formant une couche plus claire. La différence d'épaisseur peut être un argument à l'idée qu'il y ait davantage de matériaux très fins (de diamètre de l'ordre de 10 à 20 μm) transportés au sein des bassins versants durant la plupart des crues. Aussi l'alternance des couples couche sombre – couche claire correspondrait aux différentes crues de l'année.

Cette alternance n'est cependant pas systématique. Au niveau de SW35, toujours à Koniambo, on ne peut pas clairement distinguer une alternance de couches de fines et de grossiers et les couches ne sont pas moins fines plus en profondeur (à part la couche de grenaille, en dernier). Il semble au regard des épaisseurs des couches que les quantités de matériaux transportés au cours d'un événement soient importantes. Une des hypothèses explicatives serait la non-production de matériaux grossiers par l'activité minière en amont. Le bassin versant amont de ce décanteur est en effet une zone de chantier de création de versée récemment ouvert qui génère beaucoup de matières superficielles latéritiques. L'inexistence de matériaux grossiers ne permettrait pas la formation de dépôts en couche sombre et on n'aurait de ce fait que des couches de fines. La présence de strates peut cependant être le reflet de dynamiques de dépôt différentes pour chaque couche. Ces couches peuvent correspondre à des crues différentes mais peuvent aussi justifier que l'écoulement n'est pas trop perturbé puisqu'il permet le dépôt en strate. L'homogénéité au sein d'une couche traduit soit une vitesse de chute identique pour toutes les particules soit une turbulence trop forte pour qu'il y ait stratification au sein d'une couche.

8.3 Conclusion et propositions sur l'étude des décanteurs

8.3.1 Résumé et conclusions de l'étude de 2012

Les entreprises minières des quatre sites étudiés (Poro, Poum, Koniambo et Goro) adoptent plusieurs stratégies selon les conditions d'écoulement sur site. La pluviométrie, la topographie, la taille des bassins versants ou encore l'espace disponible sur mine sont autant de paramètres variables selon les sites qui conditionnent la mise en place d'ouvrages de gestion des eaux.

Le suivi hydrologique réalisé sur Poum et Poro ainsi que des données obtenues pour Goro et Koniambo ont permis d'illustrer les disparités de précipitations sur mine. Les résultats du suivi hydrologique de Poro ont permis de disposer d'éléments sur les débits de pointe, les volumes ruisselés et la forme des hydrogrammes indispensables pour les études sur les décanteurs. Sur ce bassin l'abattement des MES observé entre l'amont et l'aval est principalement lié à l'occupation du sol et aux caractéristiques des bassins versants. Le rôle des décanteurs dans cet abattement est indéniable mais seulement sur les crues faibles et moyennes.

Les études granulométriques menées dans différents décanteurs montrent que les matériaux piégés sont, pour la majeure partie (50 à 80%), constitués de fines latéritiques. Ces fines sont d'un diamètre de 5 à 20 μm selon les situations et l'activité minière en amont des bassins où les prélèvements ont été réalisés. C'est pourquoi les systèmes de filtration ou de décantation lamellaire

sont difficilement envisageables du fait du risque de colmatage.

Bien que les diamètres considérés soient très fins, il semble que la décantation soit efficace en condition non déversante. L'abattement maximum recensé en 2011 à Poro était en effet une chute de concentration de 21 g/l à l'amont à 5 g/l au seuil aval. L'observation par la mesure directe des concentrations en MES dans les bassins justifie cette bonne décantation (clarification des eaux en moins de 24 h). La charge en MES a tendance à diminuer moins rapidement au-delà de ce délai et est d'autre part potentiellement perturbée par les arrivées d'eau de ruissellement de nouvelles pluies.

Le problème actuel principal des bassins réside dans les volumes réellement mis en place, très inférieurs aux volumes estimés par les calculs. Quelle que soit la méthode de dimensionnement, l'espace disponible sur mine est le facteur limitant. L'occurrence des pluies accentue le problème car les bassins ne semblent pas avoir le temps de se vider entre deux crues malgré l'efficacité de décantation relatée ci-avant.

La recommandation la plus pertinente à ce stade des observations des sites miniers semble être l'équipement systématique des bassins avec des systèmes de vidange et la réactivité après une crue pour vider le bassin une fois que les solides sont suffisamment décantés pour que la concentration des eaux de rejet soit acceptable.

Des études de suivi environnemental et hydrologiques sont entamées sur les quatre mines par mise en place de matériel. En dépit du nombre important d'appareils de mesure mis en place sur les sites, toutes les données ne sont pas exploitables. L'absence de suivi en continu ou bien la production de données brutes non expliquées et/ou non traitées ne permet pas de déterminer des gammes de données représentatives de scénarios-type. L'initiative Hydromine est un bon exemple puisque ce projet mené depuis à présent 5 ans fournit des résultats permettant de donner des coefficients d'écoulement et des gammes de débits à prendre en compte dans les modèles comme paramètres de calage.

Les modèles ainsi présentés et testés en exemple sur Poro fournissent des résultats concordants par rapport à l'efficacité de rétention et de décantation des bassins. Il peut en outre être mis en évidence, par l'exemple d'utilisation de la méthode du Mélange Intégral, que tous les écoulements ne passent pas par les décanteurs et que certains de ces écoulements contribuent fortement à la charge en MES encore élevée à l'aval.

On peut enfin évoquer les limites des bassins de décantation et les risques qu'ils représentent en termes d'effondrement ou bien de reprise de sédiments. Les risques d'effondrement sont déjà pris en compte et gérés par les mineurs, cependant la reprise des sédiments en cas de forte crue est un phénomène encore peu étudié. L'absence d'abattement des concentrations en MES, et même d'augmentation des concentrations maximales d'amont en aval, pour la crue exceptionnelle de décembre 2011 à Poro, dénotent la réalité de cet aléa.

8.3.2 Proposition de recherche appliquée sur la problématique des décanteurs

Les résultats de l'étude exploratoire réalisée en 2012 et les échanges avec les partenaires miniers au cours du projet, ont conduit à concevoir un projet d'action de recherche appliquée sur le fonctionnement des bassins de décantations sur sites miniers en Nouvelle-Calédonie (Recking, 2013). Cette action s'articule avec deux autres actions complémentaires, la caractérisation du fonctionnement hydrologique des bassins miniers, qui a fait l'objet de ce programme et qui devra être poursuivie, et le développement de modélisations hydrologique et sédimentologique, qui ont été initiées dans le programme.

L'objectif de cette action serait de proposer des outils simples pour estimer l'efficacité des bassins de décantation (définis par leur géométrie), pour un évènement hydrologique donné et pour les matériaux caractéristiques présents sur sites. L'expérimentation et l'outil numérique peuvent être

utilisés pour cela. Une première étape consisterait à valider l'outil sur la base de mesures de sédimentation et de champs de vitesses, réalisés in situ et /ou au laboratoire. Dans une seconde étape, le modèle pourra être utilisé pour tester l'influence des différents paramètres, et pour proposer, sur la base d'un panel de tests, des formulations simples d'abattement en MES.

La première étape consistera à produire les données de validation. Les caractéristiques physico-chimiques des sédiments (densité, courbe granulométrique, pouvoir d'adsorption...) devront être disponibles. La validation d'un outil numérique nécessitera de connaître, au moins pour un des bassins sur site minier et pour plusieurs évènements, la capacité de rétention, déduite d'un suivi des MES en entrée et sortie de ce bassin. La phase de mesures devra permettre également de caractériser la turbulence associée à ces écoulements très chargés et les vitesses de sédimentation au sein de ces écoulements. L'idéal serait de pouvoir réaliser des mesures in situ, ce qui semble peu réaliste pendant un évènement naturel. Il faudrait donc pouvoir organiser la mise en eau d'un bassin à l'aide de citernes disposées à cet effet. Une autre alternative serait de réaliser des mesures en laboratoire avec des sédiments prélevés sur les sites. Les mesures consisteraient en des mesures ADCP, associées à un traçage au colorant (bien que la couleur déjà très prononcée des sédiments naturels puisse rendre un traçage visuel difficile).

La deuxième étape consistera à construire et valider un outil numérique. Selon la caractérisation du type d'écoulement principal, un modèle 2D (type télémac) ou 3D (type fluent) sera mis en œuvre. Les principaux paramètres de contrôle seront étudiés par une analyse dimensionnelle et en similitude. Les mesures réalisées à l'étape 1 serviront à la validation. Le modèle numérique sera considéré comme valide lorsqu'il pourra reproduire correctement les principaux champs de vitesse, les profils de concentration, et la décantation pour les cas mesurés. Le modèle numérique sera ensuite testé en variant chaque paramètre de contrôle sur la base d'un panel de tests représentatif de ce qui existe sur site.

La troisième étape consistera à produire une fonction de décantation. L'objectif ne sera pas de proposer un modèle numérique qui sera adapté à chaque nouveau cas d'études mais plutôt de fournir une (ou des) fonction simple, utilisant un nombre réduit de paramètres, pour estimer l'efficacité de décantation d'une géométrie de bassin soumise à un évènement donné. Cet outil prédictif sera volontairement « dégradé » en comparaison au modèle numérique, mais c'est la condition nécessaire pour pouvoir l'utiliser ultérieurement dans un schéma de fonctionnement hydrologique global des sites miniers. On essaiera d'attacher une fonction d'erreur à au modèle prédictif.

Etant donnée la forte composante en modélisation et mécanique des fluides, il est souhaitable que le travail soit effectué en métropole, à Irstea Grenoble, avec des missions de terrain à prévoir en Nouvelle-Calédonie. Ce travail de recherche pourrait convenir à un Doctorant (sur 3 ans) ou à un Post-Doctorant (sur 2 ans). Dans les deux cas le candidat devra avoir une très solide formation en Mécanique des Fluides.

Une estimation du coût de ce projet a été faite, incluant les salaires du jeune chercheur (doctorant ou post-doc), les missions, les coûts de logiciel et d'expérimentations : 150 k€ soit environ 18 000 000 CFP sur 3 ans donc 6 M CFP par an en cas de thèse et 9 M CFP par an en cas de post-doc sur 2 ans.

9 Conclusion générale

9.1.1 Déroulement des missions d'irstea dans le projet

L'Unité de recherche "Erosion Torrentielle, neige et avalanches" (ETNA) d'Irstea avait plusieurs missions au sein du projet CNRT-PBVM.

- Assurer l'assistance technique pour le choix, l'instrumentation, la maintenance et le suivi des bassins et sites de mesure

- Analyser et interpréter les données disponibles ou recueillies dans le cadre du programme puis mettre en œuvre des modélisations hydro-sédimentaires
- Participer à la formation des partenaires calédoniens et transférer les compétences acquises dans le domaine du suivi des petits bassins versants miniers.

La **participation d'Irstea** au projet s'est étalée sur la période 2010-2014, principalement au cours de **missions sur le territoire** (15 missions en tout) complétées par des **activités scientifiques au centre Irstea de Grenoble**. Les chercheurs d'Irstea ont encadré les **deux stages** de niveau Master prévus dans leur proposition et **six stages** financés par l'UNC (trois stagiaires du projet Hydromine et trois stagiaires du présent programme).

Ces activités techniques et scientifiques ont été complétées par des **actions d'animation et de formation**. La création d'un **groupe "instrumentation"** à partir de janvier 2012 a permis de mettre en commun les expériences ou les difficultés rencontrées par les différents acteurs des suivis en milieu minier. Ce groupe a permis des échanges entre praticiens sur les sites, des visites réciproques d'installation et même des prêts de matériel. Il s'est réuni cinq fois entre 2012 et 2014.

Les **séminaires de formation en hydrologie appliquée aux petits bassins versants** miniers ont été réalisés en mars 2013 et novembre 2014 et ont concerné une cinquantaine de participants pour chaque session. Les documents pédagogiques du séminaire sont disponibles en ligne sur le portail de l'UNC, de même que l'enregistrement vidéo des présentations de mars 2013.

Un **séminaire de formation sur le transport solide** est prévu pour fin novembre 2014. Il devrait rassembler 40 à 50 participants également.

Irstea a présenté l'avancement de ses travaux au moins une fois par an **au comité de pilotage**, soit à Nouméa, soit en visio-conférence depuis Grenoble.

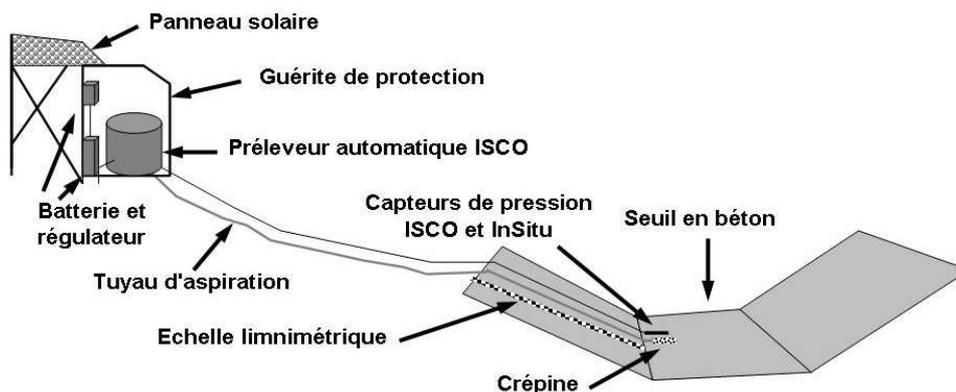
Les missions sur le territoire ont été majoritairement consacrées au choix des sites d'études, à la définition des équipements à prévoir ou à améliorer, au recueil des données auprès des compagnies minières ou de leurs sous-traitants, aux travaux en commun avec les partenaires du projet, ainsi qu'à l'encadrement des stagiaires pendant leur séjour sur le Territoire.

9.1.2 Choix et équipements des sites pour le projet

Pour atteindre les objectifs du projet, il était nécessaire de mettre en place des mesures des différentes composantes des crues torrentielles sur un bassin versant minier. Le site de Poro, déjà instrumenté dans le cadre du projet Hydromine constituait le site pilote du projet, mais était complété par plusieurs petits bassins versants équipés par les sociétés minières, sur la base du volontariat de ces compagnies (KNS, SLN, VALE). Les sites retenus finalement sont Poro (site pilote), Goro (VALE), Koniambo (KNS), Poum (SLN). Ils sont suffisamment bien répartis sur la Grande Terre pour aborder la diversité des contextes climatiques et géomorphologiques des sites miniers du Territoire. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des bassins retenus.

Site minier	Poro		Poum		Koniambo			Goro	
gestionnaire minier	CFTMC		SLN		KNS			Vale	
Nom_BV	Poro amont	Poro aval	Pôvio	Titch	SW34	SW35	Wadjana	KN15	KO6
superficie (km ²)	0.090	0.304	0.995	0.778	0.482	0.366	2.720	2.110	3.840

Une "station type" a été définie pour le suivi des débits et des transports en suspension (MES). Elle est résumée sur le schéma ci-dessous. Un turbidimètre, une mesure en continu des vitesses (doppler) et une transmission GSM (ne figurant pas sur le schéma) sont des compléments qui améliorent la qualité des données produites. Le site doit de plus comporter un ou plusieurs pluviographes selon la taille du bassin.



Un SIG a pu être construit sur les quatre sites miniers du projet grâce aux couches d'information transmises par les compagnies minières et aux données disponibles auprès de la DITTT. Ces données ont été géo référencées dans le système RGNC Lambert 91 et sont consultables en ligne sur le portail de l'UNC, sous réserve des autorisations d'accès convenues avec les mineurs. Elles permettent d'extraire l'essentiel des informations disponibles pour l'analyse hydrologique. Leur exploitation dans l'avenir pose néanmoins le problème de leur actualisation dans la mesure où la situation évolue très rapidement en domaine minier.

9.1.3 Résultats obtenus sur le site pilote de Poro

Entre **décembre 2008 et novembre 2013**, 415 épisodes pluvieux supérieurs à 5 mm ont été recensés à Poro. Les **116 épisodes moyens et forts** (pluie supérieure à 20 mm) ont fait l'objet d'analyses graphiques et statistiques détaillées.

De 2009 à 2013, la **pluviométrie annuelle**, en moyenne de **2200 mm**, a varié pratiquement du simple au double (1460 mm en 2009 et 2720 mm en 2012). L'épisode de **Noël 2011**, avec **plus de 500 mm en 40 heures**, représente à lui seul 23 % de la pluviométrie moyenne annuelle. A toutes les échelles de temps, les différences entre les deux pluviomètres de Poro amont et Poro aval sont minimales (inférieures ou égales à 6 %). La "**pluie limite**" pour initier les processus de ruissellement sur les deux bassins de Poro s'établit autour de **15-20 mm**.

Les **débites maximums observés** sont de 3.6 m³/s à l'amont et de 9.2 m³/s à l'aval soit respectivement **41 et 30 m³/s/km²**. Ces valeurs extrêmement élevées comparativement à ce qui s'observe sur les bassins plus grands de la région (DAVAR, 2006) confirment la **nécessité de disposer de mesures pour les tous petits bassins** afin d'obtenir des règles de dimensionnement adaptées. Seule la **poursuite des mesures sur le long terme** permettra de réaliser des analyses fréquentielles. A Poro les événements les plus importants se sont produits pour les saisons cycloniques 2012 et 2013, soit plus de trois ans après le début des mesures. La pluie et surtout la fraction intense des précipitations sont les variables qui expliquent le mieux le débit de pointe

A l'échelle de l'épisode pluvieux, les **coefficients de ruissellement** (ou écoulement rapide de crue) sont **extrêmement variables** et peuvent s'observer dans une **fourchette comprise entre 0.1 et 0.9**, à Poro Amont comme à Poro Aval. Le **coefficient d'écoulement moyen**, estimé par la pente de la relation pluie incidente/lame ruisselée est de **0.75 à 0.8 pour Poro amont et 0.5 à 0.6 pour Poro aval**. Les débordements qui s'observent en cas de fortes crues ne permettent pas de conclure sur les coefficients d'écoulement des épisodes forts à Poro aval.

Les **temps de concentration** sont très variables : **9 à 16 min à Poro amont et 12 à 21 min à Poro aval**. Les **formules de la littérature** couramment utilisées par les bureaux d'étude s'avèrent fortement **inadaptées** et fournissent des valeurs allant de deux à dix fois les valeurs observées. Les méthodes de calcul proposées par Irstea pour les bassins de montagne ou par la Davar pour les bassins à forte pente fournissent des résultats légèrement inférieurs aux valeurs observées, mais

dans le même ordre de grandeur.

Pour l'étude des transports en suspension (**MES**), sur la période 2009-2013, 973 échantillons ont été traités à Poro amont et 647 à Poro aval (**1620 analyses**), représentant 95 crues échantillonnées dont 57 échantillonnées aux deux stations. Dans la plupart des cas, l'absence d'échantillons en cours de crue est due au fait que les 24 flacons disponibles étaient déjà pleins mais les défauts de prélèvements par panne du matériel sont très rares. Les **concentrations** mesurées varient entre **0.002 g/l et 28 g/l**. Les concentrations sont en moyenne **plus faibles à l'aval qu'à l'amont, sauf pour la crue du 25 décembre 2011**. Les matériaux en suspension sont **extrêmement fins** avec des diamètres médians (D50) s'étageant entre **4 et 13 µ à l'amont, 5 et 30 µ à l'aval**

De manière classique, on n'observe **pas de relation claire entre concentration et débit** sur l'ensemble des échantillons mais des relations avec courbes **d'hystérésis à l'échelle de la crue** : à Poro amont, les crues sont généralement plus chargées en montée qu'en décrue. La situation inverse s'observe à Poro aval. On peut en déduire que les phénomènes d'arrachement dominant à Poro amont, ceux de transport dominant à Poro aval.

A l'échelle événementielle, il apparaît **que le flux total de MES** peut être correctement **estimé à partir du débit maximum de la crue**, l'association avec la **fraction intense des précipitations** améliorant encore la prédiction.

Pour calculer les **flux annuels**, les flux des épisodes non échantillonnés ont été estimés à l'aide du débit de pointe de l'épisode. Sur l'ensemble de la période, les flux des crues non échantillonnées ne représentent que 8 à 13 % du total. **Le flux total sur la période est de 360 t à l'amont et 920 t à l'aval**, soit en moyenne 72 et 185 t par an respectivement. **Les épisodes forts (plus de 85 mm de pluie) représentent 75 % des flux à l'amont et 90 % à l'aval. A lui seul, l'épisode FINA représente 25 % du flux amont et 50 % du flux aval.** Ceci confirme la nécessité de réaliser des suivis dans la durée et de se donner les moyens d'obtenir des mesures sur les épisodes extrêmes.

Les **décanteurs** situés entre les deux stations ont des volumes faibles au regard de la règle 2h/2ans. Au cours de la période 2009-2013, les volumes écoulés à Poro amont ont dépassé la capacité de FRN01 au moins 22 fois, soit en moyenne 4 fois par an. Ces **ouvrages sont efficaces sur les petites crues seulement**. Lors de la crue exceptionnelle du **24 décembre 2011**, l'ouvrage n'a assuré **aucune rétention des sédiments**.

9.1.4 Résultats obtenus sur les autres sites

L'analyse et l'interprétation des résultats sur les autres sites souffrent du **manque de données validées sur des chroniques suffisantes**. En particulier, lorsque les **événements forts** ne sont pas mesurés, il est difficile de conclure car les résultats de Poro ont mis en évidence la **non-linéarité des réponses** tant en débit liquide qu'en débit solide.

On a globalement obtenu des **coefficients d'écoulement plus faibles sur les sites miniers de Koniambo et de Poum**. Ils s'expliquent à la fois par les différences morphologiques et par des différences météorologiques. Cependant, sur ces sites, on observe également une **forte augmentation des coefficients d'écoulement pour les crues fortes**.

Les concentrations mesurées sont dans le même ordre de grandeur qu'à Poro, sauf pour le bassin SW35 de Koniambo, soumis à d'intenses travaux de terrassement à partir de 2012, qui enregistre des concentrations plus fortes.

L'épisode **Freda** permet de procéder à des comparaisons entre sites. L'absence de données disponibles pour cet événement à Goro n'a pas permis la comparaison entre les sites les plus touchés. Les périodes de retour sur les courtes durées de pluie sont comparables pour tous les sites mais le caractère soutenu des précipitations a rendu l'événement plus exceptionnel à Poro. Les exportations de matériaux sont nettement plus modérées à Poum et Koniambo, sauf pour SW35 qui était soumis à une intense activité de terrassement pendant cette période.

Les **difficultés d'estimation des débits et des flux solides** confirment la nécessité **d'adapter les dispositifs de mesure et les stratégies de suivi pour pouvoir observer les évènements extrêmes**. Enfin, l'ajout de **turbidimètres, en parallèle des préleveurs**, permettrait de limiter les incertitudes sur les calculs de flux.

9.1.5 Modélisations Pluie-débit-érosion

A Poro, les **modélisations pluie-débit** avec le modèle HEC-HMS ont donné de **bons résultats**. Les paramètres PI et CN peuvent être déterminés en fonction de la durée de temps sec T_s et de l'intensité maximale I_{max15} . Les résultats sur les **modélisations sédimentaires** sont **plus mitigés**. Le paramètre K de l'équation MUSLE a été utilisé comme paramètre de calage et on obtient de bons résultats en validation sur 4 épisodes seulement.

Les premiers tests sur **Koniambo** ont donné de **bons résultats**, qui sont même meilleurs qu'à Poro pour la **modélisation du transport solide** mais ces tests ne portent que sur quelques épisodes, ce qui vient tempérer ces résultats certes encourageants. Il serait souhaitable également de tester ce modèle sur les données de Poum. D'autres types de modèles devraient être testés pour la modélisation de l'érosion.

9.1.6 Conclusion générale

Au terme des quatre années du projet, le bilan est certes mitigé mais les avancées sont notables. Les résultats obtenus sur Poro ont montré l'intérêt de mesures en continu et de suivis hydro-sédimentaires sur les sites miniers. Ce n'est qu'au prix d'un suivi sérieux pendant la saison cyclonique et d'une analyse fine des données que des résultats exploitables peuvent être obtenus. Ceci implique une critique et une validation dans des délais courts après le recueil des données.

Le projet a souffert de certains retards dans la mise en place et la gestion des stations, ainsi que dans la production de chroniques exploitables. Néanmoins, la situation s'est fortement améliorée en fin de projet et les données qui sont maintenant produites vont fournir des chroniques exploitables pour l'analyse hydro-sédimentaire des bassins versants miniers. Toutefois, une coordination est nécessaire pour harmoniser les pratiques entre les différents sites et produire des données qui permettront des analyses comparables entre elles.

Enfin, la question du dimensionnement, de la conception et de la gestion des décanteurs est apparue comme une question cruciale pour la gestion des eaux et des sédiments sur mine. L'étude exploratoire qui a été menée a conclu à la nécessité de suivis et de mesures en entrée et sortie des décanteurs pour permettre de modéliser leur fonctionnement. Un programme de recherche appliquée, réalisable dans le cadre d'une thèse dédiée à cette question a été élaboré.

Références

- AKSOY H., KAVVAS L., 2005, A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models, *Catena*, 64:247-271
- Alexandrov, Y., Laronne, J.B. and Reid, I., 2003. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. *Journal of Arid Environments*, 53(1): 73-84.
- Alloin PE., 2001. Recueil et analyse de données géologiques, géographiques et hydrologiques sur les bassins versants équipés dans le cadre du projet CNRT, IRSTEA/UNC, 129 p;
- Amoros, C. and Petts, G.E., 1993. *Hydrosystèmes Fluviaux*. Masson, Paris, 300 pp.
- BAHAREH KAMALI, S. JAMSHID MOUSAVI et K. C. ABBASPOUR, Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms, *Hydrological Processes*, 2013, 27:4028-4042

- Baltzer F. et Tescases J.J, 1971. Erosion, transport et sédimentation liés aux cyclones tropicaux dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Cah. ORSTOM, Sér. Géol., III, 2, 221-244.
- Batti A. et Depraetere C. (2007), Panorama des méthodes d'analyse de l'érosion dans un contexte insulaire, IRD, CRISP, 28 p.
- Beauvais, A., Parisot, J.C. and Savin, C., 2007. Ultramafic rock weathering and slope erosion processes in a South West Pacific tropical environment. *Geomorphology*, 83(1-2): 1-13.
- BJØRN KLØVE, Erosion and sediment delivery from peat mines, *Soil & Tillage Research*, 1998, 45:199-216
- Carpentier L., 2011. Mesure et analyse des flux d'eau et de sédiments sur le site de Poro [Nouvelle-Calédonie], IRSTEA/UNC, 178 p, 2011
- Caudmont S. et Maitrepierre L., 2007. Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie, Météo France – ISBN 978-2-9527921, 127 p.
- Chillou A., 2012. Etude de gestion des flux sédimentaires par bassin de décantation en contexte minier : cas de la Nouvelle-Calédonie, IRSTEA, 100 p.
- CNRT (2010), Réponse conjointe Université de la Nouvelle-Calédonie, Cemagref, Météo-France (DIRNC), IRD, Université de la Réunion et A2EP à l'appel à projet : « Fonctionnement des petits bassins versants miniers », 158 p.
- D. C. GOODRICH, I. S. BURNS, C. L. UNKRICH, D. J. SEMMENS, D. P. GUERTIN, M. HERNANDEZ, S. YATHEENDRADAS, J. R. KENNEDY et L. R. LEVICK, *Kineros2/Agwa: Model Use, Calibration, And Validation*, Transactions of the ASABE, 2012, vol. 55, 4:1561-1574
- D. R. MOLIERE, K. G. EVANS, M. J. SAYNOR et W. D. ERSKINE, Estimation of suspended sediment loads in a seasonal stream in the wet-dry tropics, Northern Territory, Australia, *Hydrological Processes*, 2004, 18:531-544
- Danloux J., 1985. Contribution à l'étude hydrologique du Haut-bassin de la Pouembout. . Rapport ORSTOM, Nouméa, 99 p.
- Danloux J., 1987. Contribution à l'étude des transports solides en Nouvelle-Calédonie. Rapport ORSTOM, Nouméa, 122 p.
- Danloux, J. and Laganier, R., 1991. Classification and quantification of erosion phenomena, of transport and sedimentation in basins affected by mining in New Caledonia. Classification et quantification des phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation sur les bassins touchés par l'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie, 6(1): 15-28.
- Douillet, P., Ouillon, S. and Cordier, E., 2001. A numerical model for fine suspended sediment transport in the southwest lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs*, 20(4): 361-372.
- Downing, J., 2006. Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research*, 26(17-18): 2299-2318.
- Dumas P. , 2004. Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et SIG pour une gestion intégrée, Application en Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat, Orléans, 402 p.
- Fernandez, J.-M. et al., 2006. A combined modelling and geochemical study of the fate of terrigenous inputs from mixed natural and mining sources in a coral reef lagoon (New Caledonia). *Marine Pollution Bulletin*, 52(3): 320-331.
- G. R. HANCOCK, J. B. C. LOWRY, D. R. MOLIERE et K. G. EVANS, 2008. An evaluation of an enhanced soil erosion and landscape evolution model: a case study assessment of the former Nabarlek uranium mine, Northern Territory, Australia, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33:2045-2063

- Gilbert, G.K., 1917. Hydraulic-mining debris in the Sierra Nevada. US Geological Survey Professional Paper (105).
- Hancock, G.R., Grabham, M.K., Martin, P., Evans, K.G. and Bollhöfer, A., 2006. A methodology for the assessment of rehabilitation success of post mining landscapes--sediment and radionuclide transport at the former Nabarlek uranium mine, Northern Territory, Australia. *Science of The Total Environment*, 354(2-3): 103-119.
- James, L.A., 1991. Incision and morphologic evolution of an alluvial channel recovering from hydraulic mining sediment. *Geological Society of America Bulletin*, 103: 723-736.
- K. G. EVANS et R. J. LOCH, Using the RUSLE to identify factors controlling erosion rates of mine soils, *Land Degradation & Development*, 1996, vol. 7, 267-277
- K. G. EVANS, M. J. SAYNOR, G. R. WILLGOOSE et S. J. RILEY, Post-Mining Landform Evolution Modelling: 1. Derivation Of Sediment Transport Model And Rainfall-Runoff Model Parameters, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25:743-763
- Knighton, A.D., 1989. River adjustment to changes in sediment load: the effects of tin mining on the Ringarooma River, Tasmania, 1875-1984. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 333-359.
- Krishnaswamy, J., Bunyan, M., Mehta, V.K., Jain, N. and Karanth, K.U., 2006. Impact of iron ore mining on suspended sediment response in a tropical catchment in Kudremukh, Western Ghats, India. *Forest Ecology and Management*, 224(1-2): 187-198.
- L. LAJILI-GHEZAL, Utilisation du modèle KINEROS pour la simulation des hydrogrammes et des turbidigrammes en zone semi-aride tunisienne, *Revue des sciences de l'eau*, 2004, vol. 17, 2:227-244
- L'huillier L., Jaffret, Wulff A., 2010. Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration, IAC, 412 p.
- Laganier, R., 1995. The contribution of digital terrain models in the classification of slope instabilities from a SPOT image: example of the north-west slope of Ningua, New Caledonia. *Apports des modeles numeriques de terrain dans la classification des instabilites de versant a partir d'une image SPOT: exemple du versant nord-ouest du Ningua, Nouvelle-Caledonie*, 33(1): 65-72,52.
- LAURENCE C. SMITH' et GREG A. OLYPHANT, Within-storm variations in runoff and sediment export from a rapidly eroding coal-refuse deposit, *Earth Surface Processes And Landforms*, 1994, vol. 19, 369-375
- Lenzi, M.A. and Marchi, L., 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *CATENA*, 39(4): 267-282.
- Lopez Periago, E. and Soto, B., 2004. Modeling wash load transport of soil in a headwater catchment cultivated by non-tillage methods. *Journal of Hydrology*, 287(1-4): 19-33.
- Luneau G. (2006), La spatialisation de l'aléa érosion des sols en Nouvelle-Calédonie. Méthodologie définie sur les communes de Dumbéa, Païta et Bouloupari. INP Toulouse – ENSAT, Université Toulouse le Mirail, Mémoire de Master, 78 p.
- M. JAOUED, M. GUEDDARI et M. SAADAoui, Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued M'Khachbia (Nord-Ouest de la Tunisie), *Geo-Eco-Trop*, 2005, 29:15-24
- Mathys, N., 2006. Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides: cas des petits bassins versants de montagne sur marne (Draix, Alpes-de-Haute-Provence). Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 306 pp.

- Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M. and Richard, D., 2003. Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France), calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. *Catena*, 50(2-4): 527-548.
- Mathys, N., Klotz, S. and Olivier, J.E., 2007. High Sediment Concentration during Floods: Measurements and Interpretation of the Results from the Draix Experimental Catchments (France). In: A.S.o.C.E.P. E.A Cowin and D.F Hill, Reston, (Editor), 2007 Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference. EWRI, Lake Placid, NY, USA, pp. 350-355.
- Mathys, N., Klotz, S., Esteves, M., Descroix, L. and Lapetite, J.M., 2005. Runoff and erosion in the Black Marls of the French Alps: observations and measurements at the plot scale. *Catena*, 63: 261-281.
- MATTIA TRABUCCHI, CESAR PUENTE, FRANCISCO A. COMIN, GUSTAVO OLAGUE et STEPHEN V. SMITH, Mapping erosion risk at the basin scale in a Mediterranean environment with opencast coal mines to target restoration actions, *Reg Environ Change*, 2012, 12:675-687
- Maurizot P., Delfau M. , 1995. Cartographie de la sensibilité à l'érosion, Province Sud de Nouvelle-Calédonie, Rapport R38660, 72 p.
- MICHAEL J. SAYNOR et KENNETH G. EVANS, Sediment Loss from a Waste Rock Dump, ERA Ranger Mine, Northern Australia, *Australian Geographical Studies*, March 2001, 39(1):34-51
- Montarello J., 2009. Etude granulométrique au PPME et Projet « Hydromine » au CFTMC de Poro, Rapport de stage UNC.
- Montgomery, D.R. and Buffington, J.M., 1998. Channel processes, classification, and response. In: R. Naiman and R. Bilby (Editors), *River Ecology and Management*. Springer-Verlag, New-York, pp. 13-42.
- Nadal-Romero, E., Latron, J., Martí-Bono, C. and Regüés, D., 2008. Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland area: The Araguás catchment, Central Pyrenees. *Geomorphology*, 97(3-4): 601-616.
- Navarrot L., 2012. Caractérisation et modélisation des flux d'eau et de MES sur le site de la mine de Poro (projet Hydromine). Rapport de stage ENGEES-Université de Strasbourg-UNC-Irstea, 94 p
- Ouillon, S. et al., 2008. Optical algorithms at satellite wavelengths for total suspended matter in tropical coastal waters. *Sensors*, 8(7): 4165-4185.
- Ouillon, S., Douillet, P. and Andreou, S., 2004. Coupling satellite data with in situ measurements and numerical modeling to study fine suspended-sediment transport: A study for the lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs*, 23(1): 109-122.
- Page, M., Trustrum, N. and Gomez, B., 2000. Implications of a century of anthropogenic erosion for future land use in the Gisborne-East Coast region of New Zealand. *New Zealand Geographer*, 56(2): 13-24.
- Richer De Forges B., et Pascal M. (2008), La Nouvelle-Calédonie, un « point chaud » de la biodiversité mondiale gravement menacé par l'exploitation minière, *Le Journal de la Société des Océanistes*, p. 126-127
- Romieux N. , 2011. Synthèse et régionalisation des données pluviométriques de la Nouvelle-Calédonie, DAVAR-SESER-ORE (Observatoire de la Ressource en Eau), 82 p.
- S. H. R. SADEGHIA, L. GHOLAMIA, A. KHALEDI DARVISHANA et P. SAEIDIA, A review of the application of the MUSLE model worldwide, *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(2):365-375
- Shaw, E. M., 1994. *Hydrology in Practice*. Chapman and Hill Press, London, 569 pp

- Soler, M., Latron, J., Gallart, F., 2007. Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Geomorphology* Volume 98, Issues 1-2, 1 June 2008, Pages 143-152.
- Terry J., Wotling G., 2011. Rain-shadow hydrology: Influences on river flows and flood magnitudes across the central massif divide of La Grande Terre Island, New Caledonia. *Journal of Hydrology* (404) pp. 77–86
- Walling, D.E., 2006. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79(3-4): 192-216.
- Wantzen, K.M., 2006. Physical pollution: effects of gully erosion on benthic invertebrates in a tropical clear-water stream. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 16: 733-749.
- Williams Garnett, P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111(1-4): 89-106.
- Wishmeier, W.H. and Smith, D.D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.
- Wotling G., Bouvier C., 2002, Impact of urbanization on suspended sediment and organic matter fluxes from small catchments in Tahiti. *Hydrol. Process.* 16, 1745–1756.
- Wotling, G. 2000. Caractérisation et modélisation de l'aléa hydrologique à Tahiti. Thèse de doctorat Université Montpellier II, Ed. ISTEEM, 309 p.
- Wotling, G., 2012. L'hydrologie in Atlas de la Nouvelle-Calédonie, IRD, pp 62-65

Liste des Annexes

- Annexe 1 : station-type pour un suivi hydro-sédimentaire rigoureux des petits bassins versants miniers (Guyonneau, 2014)**
- Annexe 2 : Exemple (format PDF) d'une fiche de métadonnées simplifiée**
- Annexe 3 : Analyse hydrologique avec les outils SIG (Guyonneau, 2012)**
- Annexe 4 : Modes de calcul des variables descriptives des épisodes et liste des variables**
- Annexe 5 : Fonctions utilisées dans la modélisation HEC-HMS**

Annexe 1 : station-type pour un suivi hydro-sédimentaire rigoureux des petits bassins versants miniers (A. Guyonneau, 2014)



Objet du document : Présenter une station « optimale » (et ses variantes) pour le suivi hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers eu égard aux instruments de mesures actuellement disponibles sur le marché.

Cadre du suivi : BV de l'ordre du km² ; proximité avec l'exploitation minière ; étude du transport solide en suspension.

Rappel des objectifs :

- Quantifier les flux liquides et solides (Φ et Φ_s) ;
- Evaluer l'efficacité des ouvrages de gestion des eaux (volume de sédiment déposé, abattement de la charge en MES...) ;
- A terme, ajuster localement les paramètres de dimensionnement de ces mêmes ouvrages (CE, tc...) ;
- Créer et alimenter une base de données hydrologique ;
- Estimer l'importance d'un évènement (période de retour) ;
- Prédire les flux liquides et solides en réponse à un épisode pluvieux (alimenter les modèles pluie/débit/MES).

Paramètres d'intérêt et sources d'incertitudes :

Paramètres	Méthodes de calcul	Sources d'incertitudes et multiplication des erreurs
------------	--------------------	--

H = hauteur d'eau (m)	Limnimètre (pression, ultrasons...) Lecture directe (échelle)	<i>Erreurs liées aux sondes (entretien, emplacement, sonde non adaptée pour la mesure des crues « éclair »...)</i>
P = lame précipitée (mm)	Pluviographe à augets	<i>Mauvais basculements, pluviographe bouché, pluviographe mal étalonné...</i>
S_{BV} = surface du bassin versant (m ²)	Manuelle (courbes de niveau) ou automatique (MNT)	<i>Dépend de la précision des courbes de niveau, du tracé manuel ou de la précision et résolution du MNT (Modèle Numérique de Terrain). Le tracé doit être à jour (les limites peuvent changer très rapidement en zone d'exploitation).</i>
Q = Débit liquide (m ³ /s)	Application de la courbe de tarage	<i>Mauvaise courbe de tarage, erreurs de mesure, absence de données de hauteur d'eau ou mesures aberrantes non corrigées...</i>
VP = Volume précipité (m ³)	= P * S _{BV}	<i>Toutes les erreurs liées à la mesure de P x erreurs de surface du BV.</i>
LE = lame écoulee (mm)	= Q / S _{BV}	<i>Toutes les erreurs liées à la mesure de Q et aux erreurs de surface du BV</i>
CE = Coefficient d'écoulement	= LE/P	<i>Toutes les erreurs liées à LE et P.</i>
[MES] = concentration en matières en suspension (g/l)	Filtration-séchage-pesée au laboratoire	<i>Qualité des échantillons (emplacement de la crépine, état des flacons...), filtration d'un volume représentatif (bien agiter le flacon, prélever un volume suffisant...)</i>
T = Turbidité (NTU ou g/l)	Turbidimètre (néphélométrie, absorption...)	<i>Erreurs liées aux sondes et à leur emplacement (sonde non adaptée à la gamme de [MES] mesurée, absence d'entretien, sonde mal positionnée...</i>
Q_S = Débit solide (g/s)	= [MES] * Q	<i>Toutes les erreurs de [MES] x toutes les erreurs de Q</i>
Φ = Flux liquide (m ³)	$= \int_{t_0}^t Q dt$	<i>Mêmes erreurs que Q</i>
Φ_S = Flux solide (t)	$= \int_{t_0}^t Q_s dt$	<i>Mêmes erreurs que Q_S + erreurs d'interpolation (si interpolation avec Q : toutes les erreurs liées au calcul de Q, si interpolation avec turbidité : toutes les erreurs liées à la turbidité)</i>
Tc = temps de concentration	Méthodes graphiques	
Granulométrie	Tamis et granulométrie laser	<i>Toutes les erreurs liées au prélèvement des échantillons + erreur de mesures liées à la méthode employée ou au matériel.</i>

Dans tous les cas, les nombreuses incertitudes pouvant exister et entraînant des erreurs et des lacunes dans les données nécessitent la réalisation de mesures de contrôle.

- Lecture directe de hauteur d'eau à l'échelle, deuxième sonde en parallèle : comblement des lacunes et interprétation des données ;
- Jaugeages (flotteur, moulinet, SVR, doppler, module 750...) : ajustement de la courbe de tarage, affinage des calculs de débits ;
- Echantillonnages manuels : vérification de la cohérence des prélèvements automatiques ;
- Pluviomètre totalisateur : vérification de la cohérence du pluviographe à auget ;
- Turbidimètre : comblement des lacunes des [MES] si relation [MES]=f(turbidité) connue.



Station de suivi hydro-sédimentaire - Type 1 (« Rolls Royce ») :

Équipement	Rôle	Prix approximatif ⁽¹⁾	Illustration
------------	------	----------------------------------	--------------

<i>Seuil</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Section de relation $Q = f(h)$ connue 	Selon type de seuil et entreprise	
<i>ISCO 6712</i> ⁽²⁾	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvement d'échantillons • Centrale d'acquisition et de programmation 	4 998 €	
<i>Module 720</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures de hauteur d'eau • Asservissement de l'ISCO 6712 	2 692 €	
<i>Module 750</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures de débit • Asservissement de l'ISCO 6712 • Ajustement de la courbe de tarage 	3 910 €	
<i>InSitu LT 500</i>	Mesure de hauteur d'eau principale ou secondaire (contrôle)	2 000 €	
<i>Turbidimètre (WTW, Actéon, Odéon...)</i>	Mesure de la turbidité en continu	?	
<i>Passerelle de jaugeage</i>	Réalisation de jaugeages au moulinet, saumon, SVR, ADCP, flotteurs...	?	

⁽¹⁾ tarifs Ponsel France au 19 mars 2014 hors frais de port.

⁽²⁾ préleveur + tuyaux de prélèvement + 24 flacons + crépine inox + raccord tuyaux/ISCO + câble d'alimentation vers batterie automobile + Flowlink 5 + connexion PC

Station de suivi hydro-sédimentaire - Type 2 :

Equipement	Rôle	Prix approximatif ⁽¹⁾	Illustration
<i>Seuil</i>	Section de relation $Q = f(h)$ connue : calcul des débits	?	
<i>ISCO 3700</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvement d'échantillons 		
<i>Centrale Campbell CR200 ou ></i>	<ul style="list-style-type: none"> • Centrale d'acquisition • Asservissement de l'ISCO 3700 à partir des mesures des capteurs limnimétrique et de turbidité 	1 000 €(avec logiciel PC400)	
<i>InSitu LT 500</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure de hauteur d'eau principale • Asservissement de l'ISCO via la CR200 	2 000 € ⁽³⁾	
<i>Turbidimètre (WTW, Actéon, Odéon...)</i>	Mesure de la turbidité en continu		 ou

⁽³⁾ Prix approximatif avec câble et dessicant. Variable selon la longueur de câble.



A éviter :

A éviter	Erreurs sur...	Remplacer par
Stratégie d'échantillonnage par déclenchement LLA et asservissement en temps	Représentativité des échantillons, erreurs sur [MES] et par conséquent : Q_s , flux solide, granulométrie, gamme de concentration	Echantillonnage évolué sur dépassement de consigne de hauteur d'eau
Sonde Diver	H et par conséquent : Q, flux liquide, LE, CE, Q_s	Module 720 ISCO ou InSitu LT500
Absence de jaugeages	Q, flux liquide, LE, CE, Q_s	Jaugeages impératifs !
Stratégie d'échantillonnage sur la turbidité si relation MES/turbidité non maîtrisée	Représentativité des échantillons, erreur sur [MES] et par conséquent : Q_s , flux solide, granulométrie, gamme de concentration	Echantillonnage évolué sur dépassement de consigne de hauteur d'eau préférentiellement.

Station pluviométrique - Type :

Equipement	Rôle	Prix approximatif ⁽¹⁾	Illustration
<i>Pluviographe à auget basculeurs Précis mécanique 3029 – 400 cm² ; résolution 0,5 mm</i>	Mesure de la lame d'eau précipitée	639 €(hors frais de port)	
<i>Centrale DANAЕ R62LC – Précis mécanique</i>	Acquisition/enregistrement des données	?	
<i>Pluviomètre totalisateur</i>	Contrôle des cumuls	?	 <i>Exemple DAVAR : tube métallique + couche d'huile</i>

Annexe 2 : Exemple d'une fiche simplifiée de métadonnées simplifiée (format PDF)

bord_mer_nc

Shapefile



Tags

trait côte mer littoral interface bord de mer ligne intersection terre limite

Summary

Le trait de côte est une courbe/ligne représentant l'intersection de la terre et de la mer dans le cas d'une marée haute astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales. Par extension c'est la limite entre la terre et la mer, c'est à dire la côte. [Observatoire du littoral, 2012]

Description

Couche polyligne du trait de côte.

Credits

Source : BDTopo DITTT ; Récupération des données : PE. Alloin (2011) ; Métadonnées : A. Guyonneau (2012).

Access and use limitations

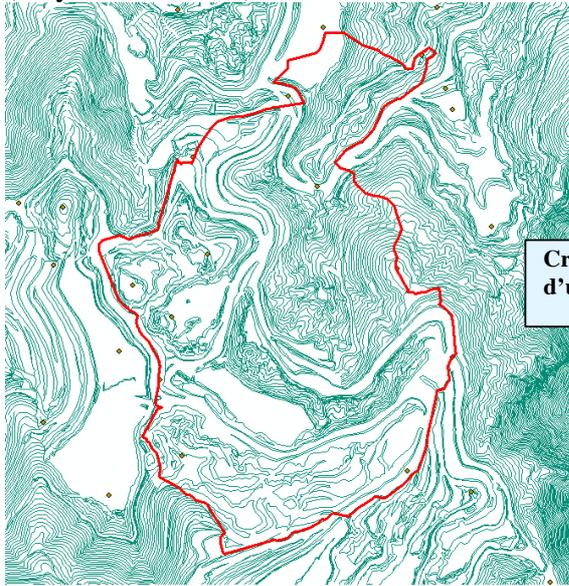
There are no access and use limitations for this item.

ArcGIS Metadata ▼

FGDC Metadata ▼

Annexe 3 : Analyse hydrologique avec les outils SIG

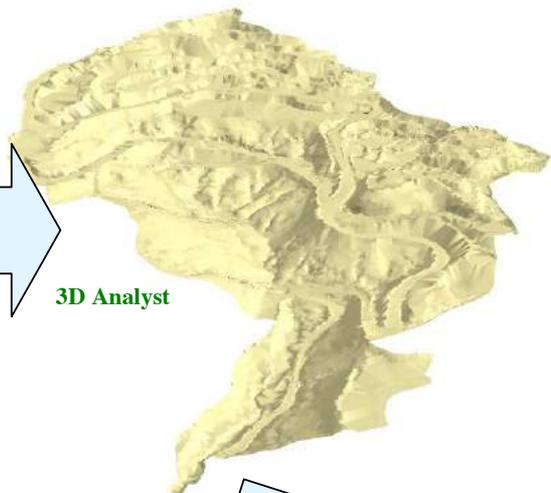
(Guyonneau, 2012)



Couches :
- « topographie fine » issu du plan de gestion des eaux 2011 (SLN)
+ « limites du bassin versant de Poro aval

Création d'une TIN

Visualisation 3D de la TIN générée



3D Analyst

Outil TIN to Raster

3D Analyst

Méthode intégrative

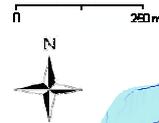


Raster de sortie. Résolution 1m.

Outil Flow direction

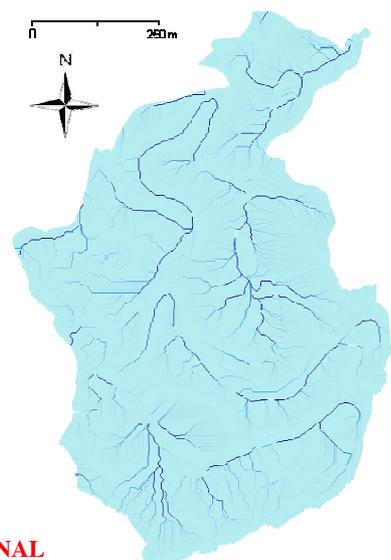
Raster direction du flux

Spatial Analyst Hydrology



Outil Flow Accumulation

Spatial Analyst Hydrology



RESULTAT FINAL
Carte du réseau de drainage

Annexe 4 : Modes de calcul des variables descriptives des épisodes et liste des variables

Variables de précipitation

Pluie en mm : cumul des basculements enregistrés entre le début et la fin de l'épisode

Durée en minutes = ((date fin) –(date début))* 1440

Imaxy, Intensité maximale en yy minutes : on déplace une fenêtre de yy minutes sur la durée de la chronique de pluie et on extrait le cumul maximum observé dans cette fenêtre.

- $I_{maxyy} = (\text{cumul en mm}) / (yy/60)$

Yy prend les valeurs 01, 05, 06, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 240, 360, 720, 1440 (soit 24h)

Taaa : période de retour de la pluie maximale sur la durée aaa (pour aaa prenant les valeurs 15min, 1h, 2h et 4h)

htotxx : cumul de précipitation au cours de l'épisode tombée avec une intensité instantanée supérieure à xx mm/h. Ceci permet d'isoler la fraction intense des précipitations dont le rôle érosif est primordial. Pour chaque pas de temps de la chronique, on calcule l'intensité instantanée (hauteur de pluie depuis le pas de temps précédent / intervalle de temps converti en heure). Si l'intensité dépasse le seuil, on ajoute la hauteur de pluie au cumul htotyy, sinon, on l'ignore. La Figure 1 : Calcul des variables de cumul avec seuil d'intensité. Figure 1 explicite le mode de calcul de cette variable qui a souvent montré sa pertinence dans les études sur les facteurs de l'érosion.

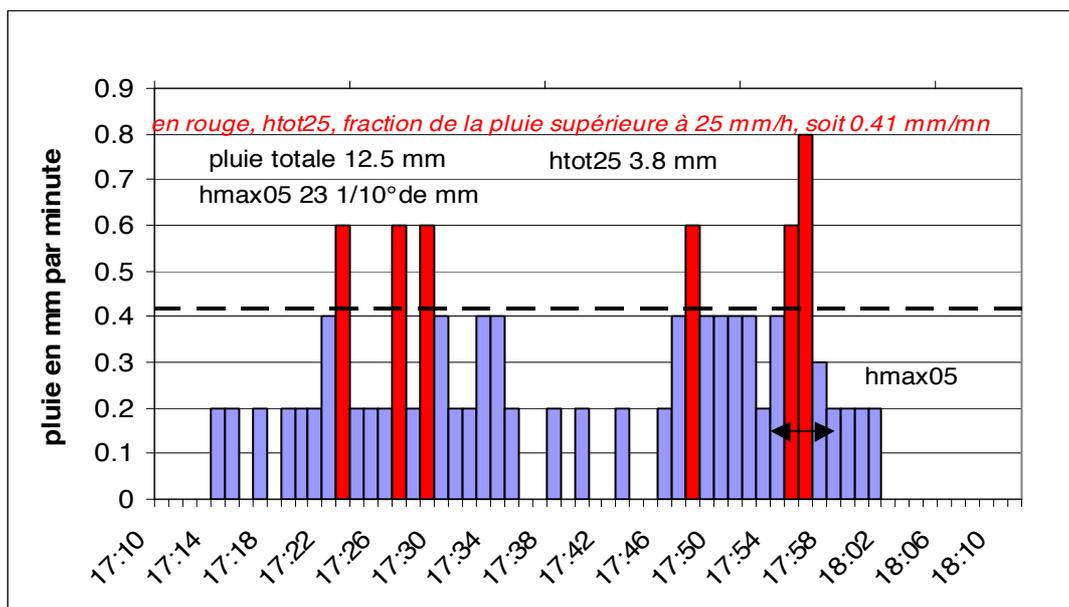


Figure 1 : Calcul des variables de cumul avec seuil d'intensité.

Le cumul au seuil de 25 mm/hl inclura les fractions affichées en rouge. L'intensité maximale sera calculée à l'aide du cumul des 5 minutes soulignées par les flèches noires soit

e_{j00} (en J/m^2) est l'énergie cinétique calculée par la formule de Wishmeier (Wishmeier et al., 1978), après adaptation des coefficients au système d'unités internationales. Pour la totalité de l'épisode pluvieux constitué de n séquences successives de pluie P_i avec une intensité Int_i , l'énergie cinétique est donnée par la formule

$$e_{j00} = \sum_1^n P_i * (11.9 + 8.73 * \log_{10}(Int_i))$$

E_{jxx} est la même variable calculée sur les seules séquences dépassant le seuil d'intensité instantanée

de xx mm/h

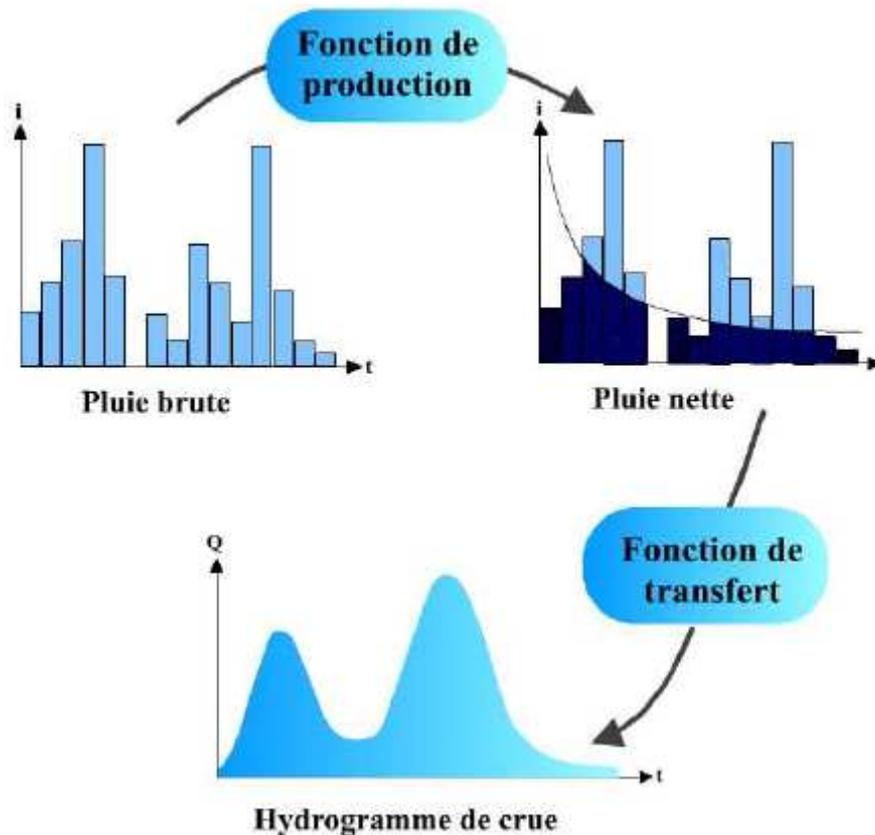
IPA est l'indice des pluies antérieures. Plusieurs formules existent dans la littérature et ces différentes formules ont été testées. Les résultats de ces tests sont discutés en

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des variables utilisées

Variable	Abréviation	Unité	Commentaire
cumul de précipitation	Pluie ou P	mm	
durée de l'épisode	Durée ou Dp	min	
intensité maximale	Imaxyy	mm/h	observée en yy minutes
période de retour	Taaa	année	de cette intensité maximale
cumul de pluie avec seuil	htotxx	mm	au-delà d'un seuil xx d'intensité
énergie cinétique	ejxx	J/m ²	au delà d'un seuil xx d'intensité
Indice des pluies antérieures	IPA	mm	
Lame ruisselée	Lr	mm	
Coefficient d'écoulement	CE		
Temps de concentration	Tc	min	
Temps sec	ts	jours	depuis la fin de la dernière pluie
Temps sec	Ts	jours	depuis la fin du précédent ruissellement
Débit de pointe	Qmax	m ³ /s	
Temps initial	t0	min	entre début d'averse et début du ruissellement
Pluie initiale	P0	mm	Pendant t0 ou pertes initiales
Débit spécifique	Qs	m ³ /s/km ²	
Concentration	C	g/l	
Concentration maximale	Cmax	g/l	
Diamètres caractéristiques	Dxx	Mm ou μ	Diamètre non dépassé par xx% en poids de l'échantillon. D50 : diamètre médian

Annexe 5 : Fonctions utilisées dans la modélisation HEC-HMS

(extraits de Aksoy, 2014)



Fonction SCS-CN

La formule du SCS-CN est la suivante :

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{p - Ia + S} \quad \text{avec } S = (1000 / CN - 10) * 25,4$$

Avec :

- la pluie efficace cumulée Q (mm)
- le volume total d'eau précipitée P (mm)
- La pluie d'interception (ou Ia pour *Initial abstraction*) : la perte en eau initiale via les phénomènes d'interception, d'infiltration et de stockage de surface (mm) (dans notre cas ce paramètre a été estimé grâce à une analyse statistique par les précédents stagiaires)
- la rétention maximale potentielle S (mm)
- Le Curve Number (CN) : nombre adimensionnel situé entre 0 et 100, dépendant de la nature, de l'état hydrique du sol, que l'on peut assimiler au taux de ruissellement.

MUSLE

L'équation du MUSLE est la suivante :

$$Y = 11.6 (Q * q_p)^{0.56} * K * C * L * S * P$$

Avec :

Y : apport sédimentaire [t]
Q : volume de ruissellement [m^3]
 q_p : débit maximum [$m^3 \cdot s^{-1}$]
K : facteur d'érodabilité des sols [$t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$],
C : facteur adimensionnel de la couverture végétale et des pratiques culturales,
L : longueur de pente,
S : inclinaison de pente [%],
P : facteur adimensionnel lié aux pratiques de conservation des sols.

Routage des sédiments

La méthode linear reservoir considère le bief comme un réservoir linéaire. Le routage sédimentaire se fait indépendamment du routage hydraulique. Les sédiments de différentes tailles peuvent ainsi se déplacer le long du bief à des vitesses différentes.

La méthode de l'Uniform equilibrium est la plus simple des méthodes, car elle considère que les sédiments sont translatés instantanément à travers le bief, du coup il n'y a pas de décalage temporel entre les sédiments.

La méthode du volume ratio lie le transport de sédiment au débit, ainsi pour chaque intervalle de temps les sédiments arrivant dans le bief sont ajoutés aux sédiments déjà présents dans ce dernier. Le dépôt ou l'érosion de chaque particule est calculé en temps réel pour déterminer la quantité de sédiments disponible. Pour chaque intervalle de temps, la quantité de sédiments quittant le bief est considérée comme étant proportionnelle au débit d'eau quittant le bief. Du coup tous les grains sont considérés comme étant transportés à la même vitesse, quelle que soit leur taille.

CHAPITRE 3 : CONTRIBUTION DE L'IRD, UMR 228 ESPACE-DEV

Projet CNRT « Fonctionnement des petits bassins versants miniers »

Rapport Final IRD

UMR 228 ESPACE-DEV - Septembre 2014

*lundi 22 septembre 2014**Rédaction : M. Despinoy**Révisé par M. Mangeas*

Table des matières

I.Objectifs.....	2
II.Site d'étude.....	3
III.Point zéro - Acquisition et traitement d'image satellitaire (RapidEye - 2010).....	4
IV.Classification des formations végétales par traitement d'images hyperspectrales.....	7
V.Terrain (collecte d'information destinée à valider les traitements).....	11
VI.Traitement image THR : Formosat-2.....	12
VII.Analyse de l'évolution de l'occupation du sol.....	15
VIII.Mise au point d'un indice d'apport sédimentaire.....	22
IX.Budget.....	25
X.Conclusion.....	26
XI.Annexes.....	28

I. Objectifs

L'objectif principal de l'étude menée par l'UMR ESPACE-DEV consistait à évaluer les potentialités de la télédétection à technologie passive sur les problématiques de morphologie dynamique fluviale en Nouvelle-Calédonie. Il s'agissait de tester et valider les algorithmes de traitement d'image et du signal pour l'observation à l'échelle du bassin versant des flux sédimentaires dans les rivières dus aux activités minières en amont et de localiser les talwegs induisant de forts ruissellements et de fournir une carte de la dynamique d'occupation du sol avec une typologie adaptée à la problématique.

L'ensemble des données ont été collectées avant puis à la suite d'un phénomène climatique exceptionnel du type cyclone ou forte dépression ce qui a permis d'évaluer les impacts d'un tel événement sur le milieu, en liaison avec les géologues/hydrologues associés au projet, notamment ceux du PPME de l'UNC.

Les cartes et données produites par l'UMR ESPACE-DEV de l'IRD ont aussi été exploitées dans le cadre de la mise au point des modèles hydro-sédimentologiques issus des recherches de l'équipe du CEMAGREF, partenaire de ce projet.

Les travaux sont décomposés en cinq tâches suivant un calendrier repris dans le tableau 1.

Tâche 1 : Acquisition + traitement d'image satellitaire (point zéro)

Tâche 2 : Acquisition + traitement d'image hyperspectrales (classification des formations végétales)

Tâche 3 : Terrain (collecte d'information destinée à valider les traitements)

Tâche 4 : Acquisition + traitement d'image satellitaire Formosat2 (État des lieux)

Tâche 5 :

a) Analyse de l'évolution (dynamique) de l'occupation du sol (si jeux d'images Formosat2 acquises)

b) Cartes des zones à ruissellements forts à partir d'un MNT et création d'un indice sédimentaire sur la zone d'étude du bassin versant.

	2010												2011												2012												2013	
Tâches	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F				
1																																						
2																																						
3																																						
4																																						
5																																						

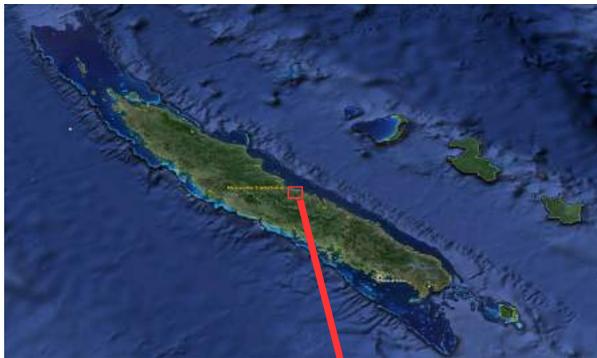
Tableau 1 : Calendrier des tâches

II. Site d'étude

Le travail a été mené sur le site du bassin expérimental de mesure situé sur la mine école de Poro (bassin versant « Hydromine »).

La seconde représentation de la Figure 1 (en bas) représente l'image RapidEye de 2010 en composition colorée vraies couleurs. Ainsi les sols dénudés apparaissent en variation de couleurs marron, la végétation en gamme de vert et l'eau en bleu.

La zone du Bassin Versant y est délimitée par un polygone bleu et couvre une superficie d'environ 30,4 km².



Emprise image RapidEye sur la zone de Poro (Nouvelle-Calédonie)



Composition colorée vraies couleurs de RapidEye (2010)

Figure 1: Carte de situation

III. Point zéro - Acquisition et traitement d'image satellitaire (RapidEye - 2010)

L'objectif initial de cette tâche est d'élaborer une cartographie de l'occupation du sol qui servirait de point de départ au développement méthodologique et à l'analyse du milieu.

Une recherche exhaustive d'images satellitaires possédant des résolutions spatiale et temporelle adaptées à la problématique de l'érosion d'un petit bassin versant (environ 30 km²), nous a amené à considérer les images possédant des résolutions spatiales métriques, avec un taux de revisite journalier et ayant des images d'archives sur la région d'étude. Ceci nous a amené principalement à envisager l'utilisation de 2 types de satellites : Formosat-2 et RapidEye. Les caractéristiques techniques de ces images sont décrites dans les chapitres suivants.

Dans un premier temps, nous avons saisi l'opportunité de la mise à disposition d'une image gratuite du satellite RapidEye (cf. tableau 2 ci-après) de la part du projet GEOSUD (programme EQUIPEX). Grâce à celle-ci, nous avons testé les capacités de ce type d'image à discriminer les objets au sol dans l'environnement tropical anthropisé de Poro.

Ref	Capteur	Nbr Canaux	Résol. spatiales (m)	Niv de pré traitement	Couv. Au sol (km)	Date de prise de vue	Revisite (heure)
T235730_RE5_1B-NAC_4498121_96169	RapidEye	5	6,5 en niv. 1B et 5 en niv. 3A	1B	85 x 107	13 juillet 2010	24

Tableau 2: Caractéristiques technique de l'image RapidEye de 2010 (GEOSUD)

Comme décrit dans le tableau des caractéristiques de l'image ci-avant, celle-ci possède un niveau de pré-traitement 1B (corrections géométriques et radiométriques de base). Ceci impose une résolution spatiale de 6,5 m (opposée à 5 m pour du niveau 3A dans les images commandées par la suite) et pose des problèmes sur le positionnement géographique et l'évaluation en superficies des classes dans un milieu montagneux comme Poro.

Le programme GEOSUD ne fournissant pas, au moment du projet, de données orthorectifiées (niveau de pré-traitement 3A) nous avons donc géo-référencé l'image avec 199 points remarquables afin de géo-corriger l'image au mieux (application de polynôme de degrés 4 et méthode d'échantillonnage de type "plus proche voisin"). Cette étape a permis l'amélioration de la localisation des objets mais n'améliore pas les erreurs de géométrie dues aux pentes.

Néanmoins, nous avons voulu connaître les limites de ces images RapidEye pour la cartographie de la végétation et des sols dans un milieu hétérogène tropical. En effet, l'addition d'un canal supplémentaire, nommé "RedEdge" dans la longueur d'onde du rouge (nommée "RE" sur la Figure 2), est un apport non négligeable dès lors que des traitements d'image sont orientés sur la discrimination de la végétation.

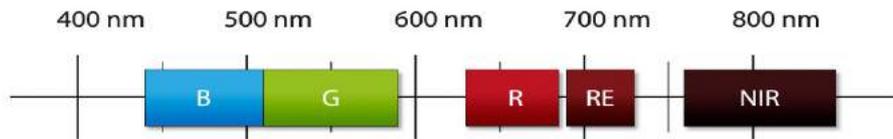


Figure 2: Domaine spectral et les longueurs d'onde du capteur de RapidEye

L'ensemble des étapes de traitements (masques, tests de plusieurs classifieurs, application de seuils sur indices...) sont détaillés en Annexe 1.

Dans ce chapitre, les actions relatives à la connaissance *a priori* du terrain (détermination des classes, validations...) ont été faites en concertation avec les experts de l'Université de Nouvelle-Calédonie et plus particulièrement avec Isabelle Rouet, docteur en Géologie, Géomorphologie et Géomatique.

La couche d'occupation des sols a donc été élaborée (Figure 2) et la classification associée est performante avec une matrice de confusion qui affiche un taux de reconnaissance, des zones témoins validées par la suite par le terrain (chapitre "Terrain"), supérieur à 87 %.

Classification image RapidEye de 2010 (15 classes)

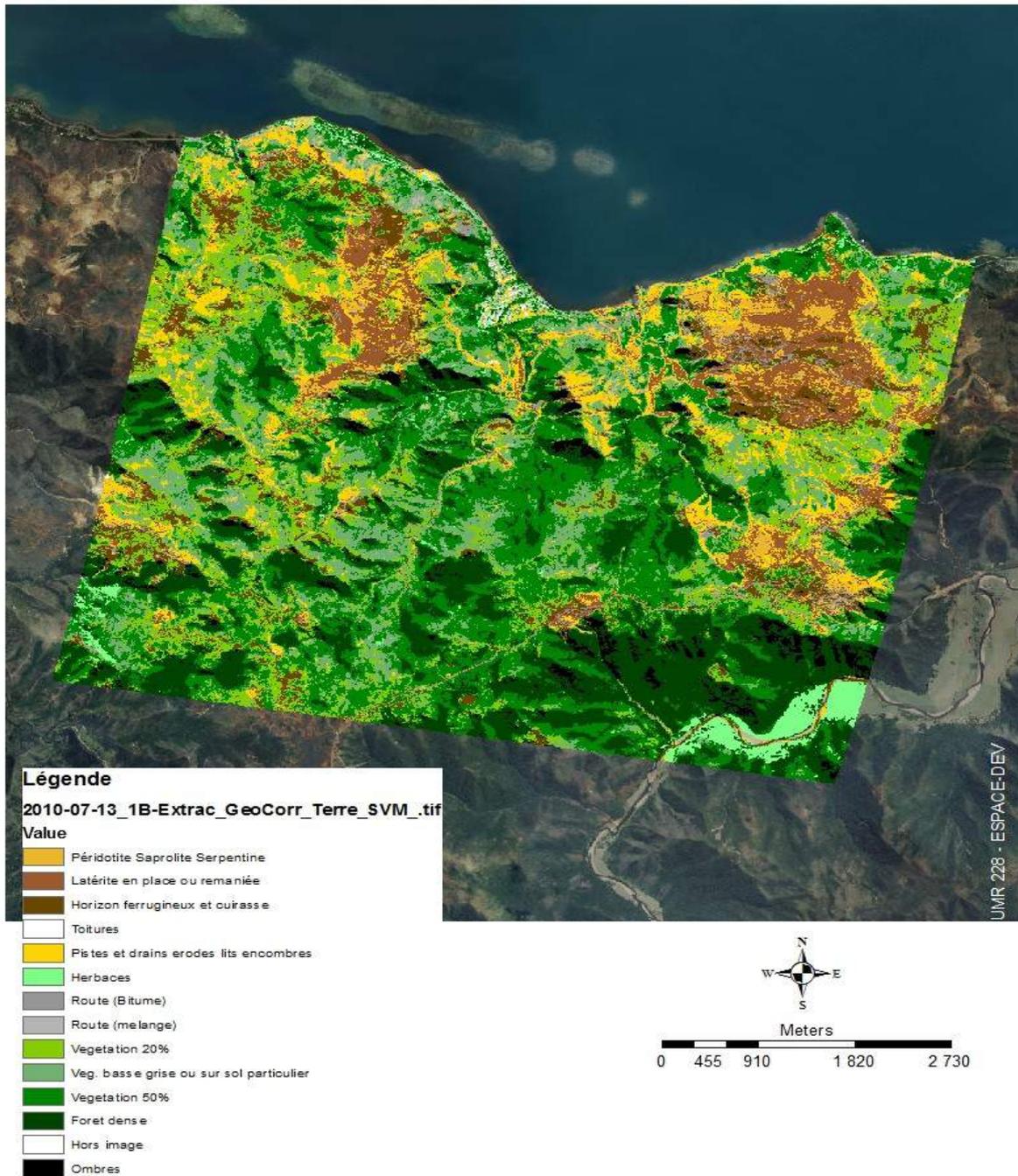


Figure 3: Carte de l'occupation du sol à partir de RapidEye de 2010 (15 classes)

IV. Classification des formations végétales par traitement d'images hyperspectrales

Dans l'optique de tester les différentes possibilités de cartographie d'occupation du sol dans cette zone d'étude, il a été envisagé de traiter des images hyperspectrales pour la discrimination de la végétation dans cette zone d'étude.

Les données sont issues d'une campagne d'acquisition d'image aéroportées hyperspectrales (projet CARTHA - appel à projet CNRT 2009) acquises en octobre 2010. Le capteur utilisé est le HYMAP et a été développé par "Integrated Spectronics Pty Ltd"¹. en Australie. Pour cette campagne d'acquisition, ce dernier a été opéré par la société australienne Hyvista (<http://www.hyvista.com/>).



Un grand nombre d'images ont été collectées sur la Grande Terre. Parmi elles, quelques images concernent le bassin versant "Hydromine" de Poro pour le besoin de ce projet Fonctionnement des Petits BV.

Malgré plusieurs tentatives d'acquisition, la zone a été très nuageuse et la meilleure image disponible possède une partie terrestre couverte à environ 50% par des nuages.

La Figure 4 montre ainsi que le site d'étude (en bleu et jaune) est entièrement couvert par les nuages.

Dans le cadre du projet CARTHA, des traitements automatiques supervisés sur la végétation ont montré des résultats prometteurs. En effet, les observations d'un géologue de la DIMENC et d'un botaniste de l'IRD, ont permis de montrer que sur ce site, la classification par MNF montrait une corrélation étroite avec le substrat. Ainsi, une catégorisation de la végétation serait possible en fonction du sol sous-jacent comme montré dans l'exemple sur le site de la mine Fantoche sur le dôme de Tiebaghi (Figure 5).

¹ Cette société n'existe plus actuellement et a été reprise par Hyvista.

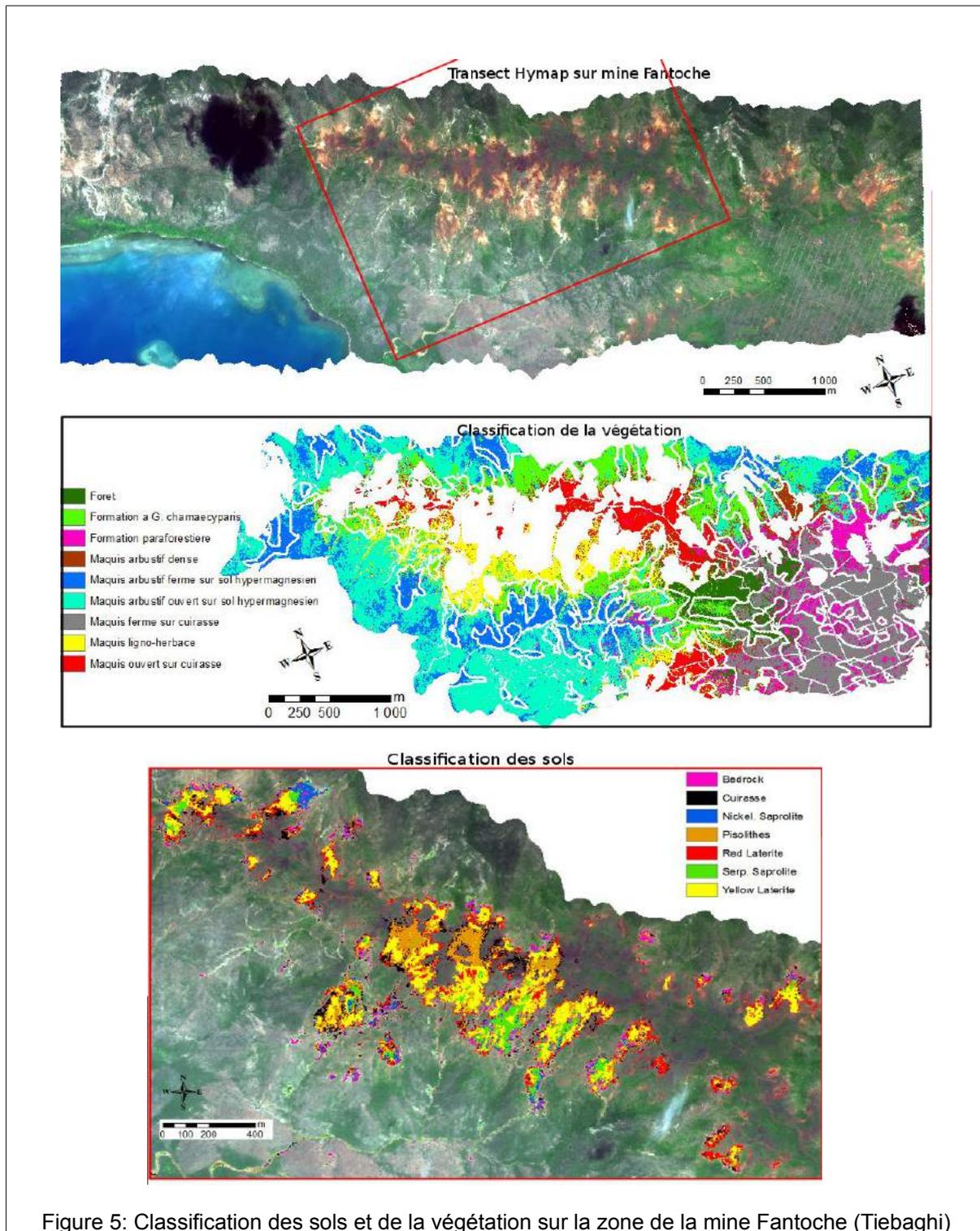
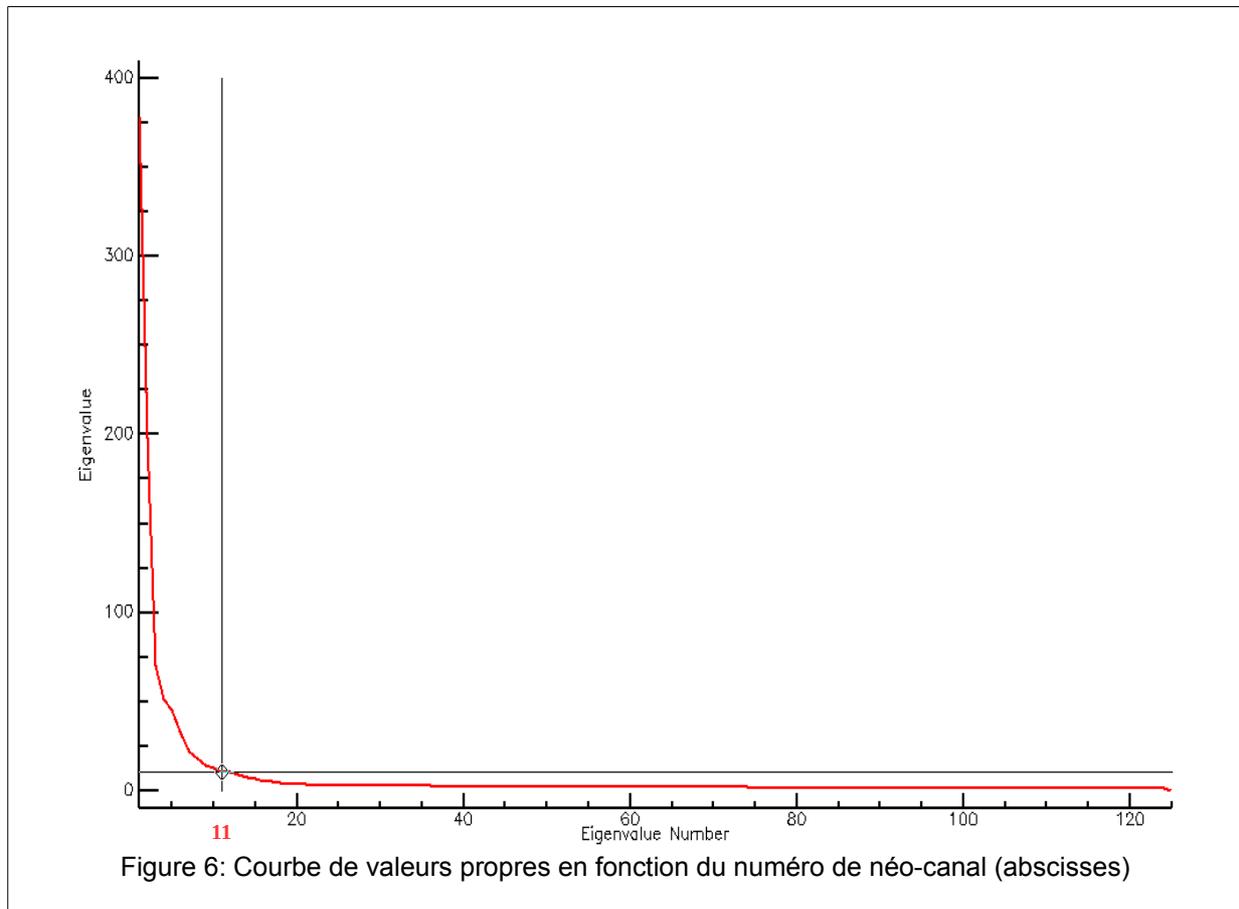


Figure 5: Classification des sols et de la végétation sur la zone de la mine Fantoche (Tiebagni)

Un traitement identique a été réalisé sur le transect aéroporté de Poro. La transformée MNF "Minimum Noise Fraction" permet de déterminer la dimensionnalité optimale d'une image, de séparer le bruit intrinsèque aux données et de réduire le temps de calcul.

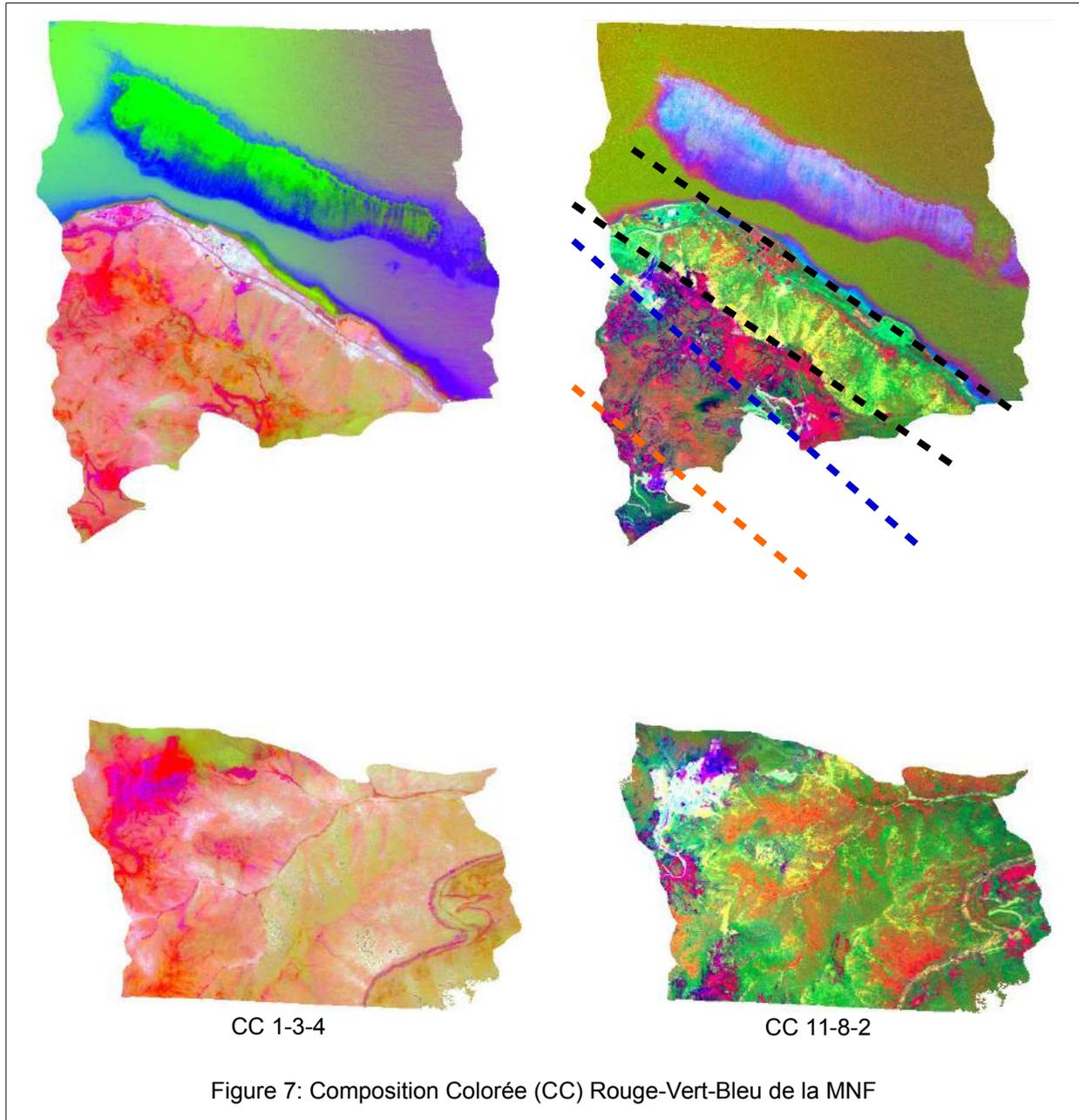
Le modèle est une transformation linéaire basée sur l'application de 2 ACP successives : la première permettant d'isoler le bruit et la seconde permet de reconstruire et optimiser une donnée à partir de la première ACP. En d'autres termes, ce modèle permet d'éliminer les bruits (minoritaires) dans une image et fournit une nouvelle image avec l'information principale concentrée dans les premiers canaux. D'après la courbe de valeurs propres en fonction du nombre de canaux (Figure 4), on s'aperçoit que la majeure partie de l'information est concentrée dans le 11 premiers canaux.



La Figure 6 montre ainsi une extraction correspondant à la zone sud du transect de Poro en composition colorée différentes. Ainsi la Figure 7a (canaux 1, 3 et 4) montre une différence entre les sols nus et les zones végétalisées ainsi que la végétation sur zone côtière. La Figure 7b (canaux 11-8-2), montre pour la même zone, des différences notables entre les types de végétation (bas et haut de talwegs ; Veg. côtière ; maquis minier ; zones végétalisées de site d'exploitation minière, forêt d'altitude...). Cette composition colorée fait également ressortir une frange côtière (délimité par les deux traits pointillés noirs sur la figure) qui correspondrait à une végétation sur substrat serpentinsé. Les autres franges restent à être validées par des experts mais pourraient correspondre à :

- végétation sur substrat saprolitique (entre traits noir et bleu),
- végétation sur sols latéritique et cuirasses (entre traits bleu et orange).

Étant donné que la zone d'étude n'est pas concernée par cette classification nous avons privilégié les traitements des images satellitaires THR d'écrites dans les étapes suivantes.



V. Terrain (collecte d'information destinée à valider les traitements)

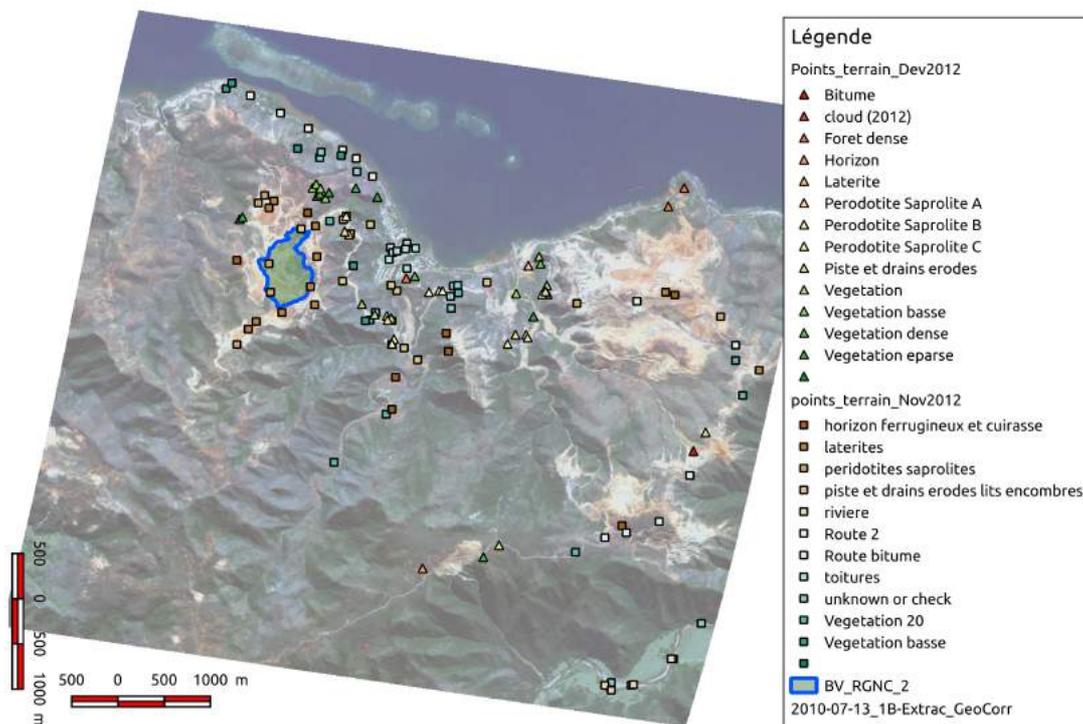


Figure 8: Points terrain effectués en nov. et dec. 2012

Les résultats obtenus par une première classification non supervisée (agrégation uniquement statistique des pixels entre eux par méthodes ISODATA et/ou K-Mean) ont permis d'obtenir des classes non définies (non labellisées). Ces dernières ont donc été contrôlées lors d'une première sortie de terrain en Novembre 2012. Au cours de ce terrain, 90 points ont été relevés (géoréférencés et labellisés) et répartis sur toute l'emprise de l'image satellitaire. La répartition de ces points a été faite en fonction du nombre de classes et de l'accessibilité du terrain. Ces informations ont permis donc de nommer certaines classes et, pour d'autres, de mettre en évidence des confusions (mixtes, non définies ou confusions).

A partir de cette étape, une seconde classification supervisée a été réalisée pour s'approcher des résultats obtenus sur le terrain. Certaines confusions ont été néanmoins persistantes (entre type de maquis, entre sols nus : cuirasses et latérites par exemple) et ne correspondaient pas à l'objectif fixé (différenciation minimale des grands types de sols et des grands types de végétation).

Ainsi une deuxième sortie de terrain en décembre 2012, durant laquelle 53 points supplémentaires ont été collectés, a permis d'apporter des explications à ces confusions et de proposer, avec l'aide d'un expert géologue-géomaticien (I. Rouet) sur le terrain, une nouvelle classification.

Toutes les informations récoltées sur le terrain (localisation géographique, observations et photos pour les 143 points) sont répertoriées dans un tableur (Annexe 2). Par la suite, toutes les classifications supervisées réalisées et présentées dans les chapitres ci-après sont basées sur ces informations collectées sur le terrain.

VI. Traitement image THR : Formosat-2

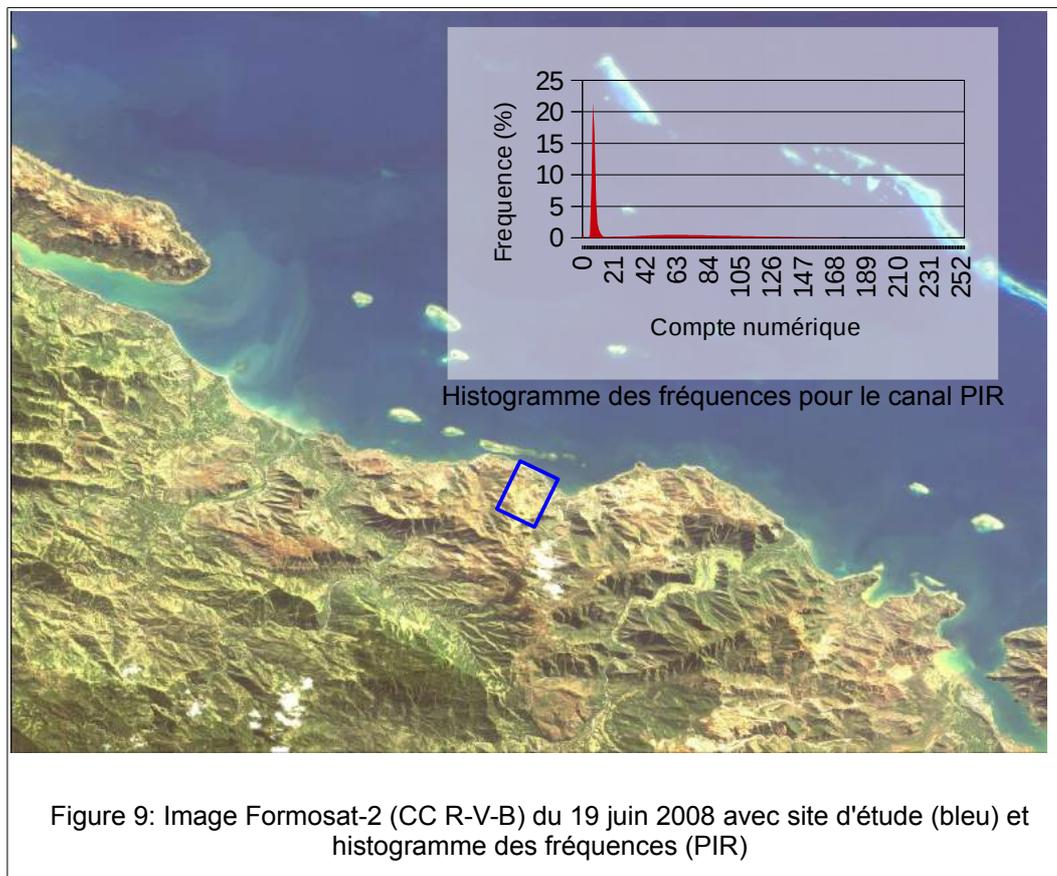
L'étape précédente ayant fourni l'information de terrain suffisante quant aux différents types d'occupation du sol, nous avons pu réaliser au travers de cette tâche une classification dirigée à partir d'une image satellitaire THR (Très Haute Résolution) de type Formosat-2. Cette image, acquise dans le cadre de ce projet, présente des caractéristiques techniques décrites dans le tableau ci-après.

Ref	Capteur	Nbr Canaux	Réso. spatiales (m)	Niv de prétraitement	Couv. Au sol (km)	Date de prise de vue	Revisite (heure)
F2_20080619_225123_1A_PMS	Formosat-2	4	2 m	1A	24 x 24	19 juin 2008	24

Tableau 3: Caractéristiques techniques de l'image de Formosat utilisée

Cette image (Figure 9) est un produit fusionné panchromatique et multispectral. Elle possède donc 4 canaux à une résolution spatiale de 2m au niveau de prétraitement 1A. Étant donné l'imprécision géographique de ce niveau de pré-traitement, une géo-correction a été nécessaire. Le ré-échantillonnage de l'image a provoqué une modification de la résolution spatiale pour atteindre 4,3 m.

Par ailleurs, l'image acquise sur la zone de Poro concerne pour plus de la moitié la zone maritime. Le canal proche Infrarouge (PIR), sensible à la présence d'eau, présente une saturation en début d'histogramme (Figure 13) pour les valeurs comprises entre 5 et 15. Certains traitements statistiques (classifications basées sur les moyennes et/ou écarts types) peuvent en être altérés. C'est la raison pour laquelle dans ce cas, un masque sur la partie maritime est opéré. Ce dernier a été réalisé par seuillage sur l'histogramme. La suite des traitements concernent donc la partie terrestre.



Une typologie adaptée à la problématique a donc été déterminée en collaboration avec l'expertise de I. Rouet (exemple de rapport d'expertise en Annexe 3).

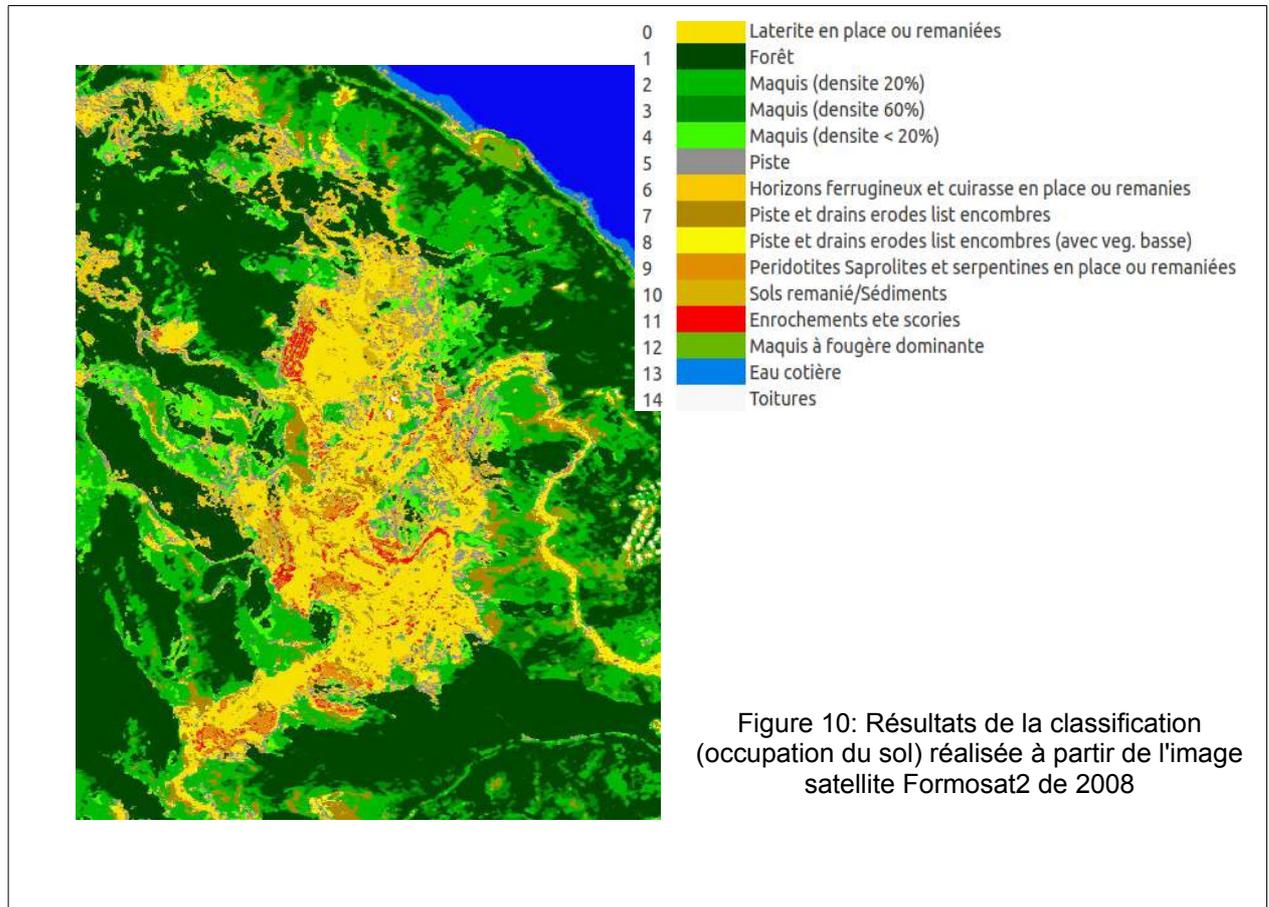
L'image Formosat-2 n'a, quant à elle, pas permis de mettre au point une classification satisfaisante et présente des confusions importantes entre classes de végétation.

Pour cette raison, la généralisation des résultats obtenus sur la zone géographique du bassin versant a montré beaucoup d'erreur de confusion dans les classes bitume avec certains sols nus, zones hydromorphes avec zone littorale par exemple). Nous nous sommes donc limité à la zone d'étude du Bassin Versant "Hydromine".

Ainsi la cartographie sur la zone du BV a été réalisée et a été fournie à l'UNC pour intégration dans leur serveur de base de données prévu à cet effet. L'objectif étant de réaliser un point zéro sur des classes définies en concertation avec les experts de l'UNC (I. Rouet notamment) et en fonction des analyses de terrain faites.

Une description détaillée des étapes des traitements ainsi que les résultats sont disponibles en Annexe 4.

La classification finale, après plusieurs tentatives d'application de modèles différentes, sur la zone du bassin versant et la légende des classes obtenue est présentée en Figure 10 ci-après. La meilleure précision des résultats a été obtenue par le modèle de classification à machine à support de vecteur (SVM) avec un taux supérieur à 93% confirmé par une valeur du coefficient de Kappa associé de 0,9189. Pour la validation de la généralisation de cette classification à l'ensemble de l'image, un algorithme de "5-fold cross-validation" a été appliqué.



VII. Analyse de l'évolution de l'occupation du sol

Les impacts des fortes pluies sur les petits bassins versants sont encore mal connus. L'objectif ici est d'analyser les changements de l'occupation du sol de la zone d'étude suite à un événement pluvieux majeur.

En concertation avec le Cemagref, l'épisode pluvieux du 24 décembre 2011 a été choisi. Une recherche exhaustive a été réalisée pour trouver des images satellitaires THR disponibles autour de cette date. La conclusion de cette recherche nous a amené à utiliser les données du satellite RapidEye. Les traitements pour l'analyse des changements ont donc été fait grâce aux images commandées à une société australienne (AAM) au niveau de prétraitement 3A (orthorectifiées) dont les caractéristiques techniques sont décrites dans le tableau suivant.

Ref.	Capteur	Nbr de canaux	Réso. Spatiale (m)	Niv prétraitement	Couverture au sol (km) Résolution	Date prise de vue
5829218_2011-10-20_7717970_7717992	RapidEye	5	6,5 en niv. 1A et 5 en niv. 3A	3A	25 x 25 (5 m)	20 octobre 2011
5829218_2012-01-18_8420503_8420518	RapidEye	5	6,5 en niv. 1A et 5 en niv. 3A	3A	25 x 25 (5 m)	18 janvier 2012

Tableau 4: Caractéristiques techniques des images satellitaires RapidEye sur la zone de Poro

Par rapport au satellite Formosat-2 (2,9 m pour l'image acquise), la résolution spatiale de 5m est compensée par un canal additionnel nommé "RedEdge" (Figure 2 présentée dans le chapitre "point zéro") rajouté par le constructeur pour l'analyse de la végétation.

Le recrutement d'une stagiaire (Julia Levermann) de master II de l'université de Southampton (UK) sur la période allant du 01/10/2012 au 28/02/2013 (4 mois - Avenant en Annexe 5) a permis de travailler sur cet aspect de diachronie.

La version finale de son rapport a été réceptionné début mai 2013 (premières pages sont en Annexe 6) et les lignes directrices sont rappelées ici. Tout son travail sur l'étude diachronique a été opéré sur l'emprise de l'image entière débordant largement du site d'étude du BV Hydromine (Figure 11 suivante).

La méthodologie, basée sur l'analyse post-classification, a consisté dans un premier temps, à identifier les classes importantes (14 classes) pour la thématique à l'aide de l'expertise de membre du laboratoire du PPME en la personne d'Isabelle Rouet. Ensuite, une classification de l'occupation du sol pour chacune des images satellitaire (cf figures suivantes) a été réalisée.

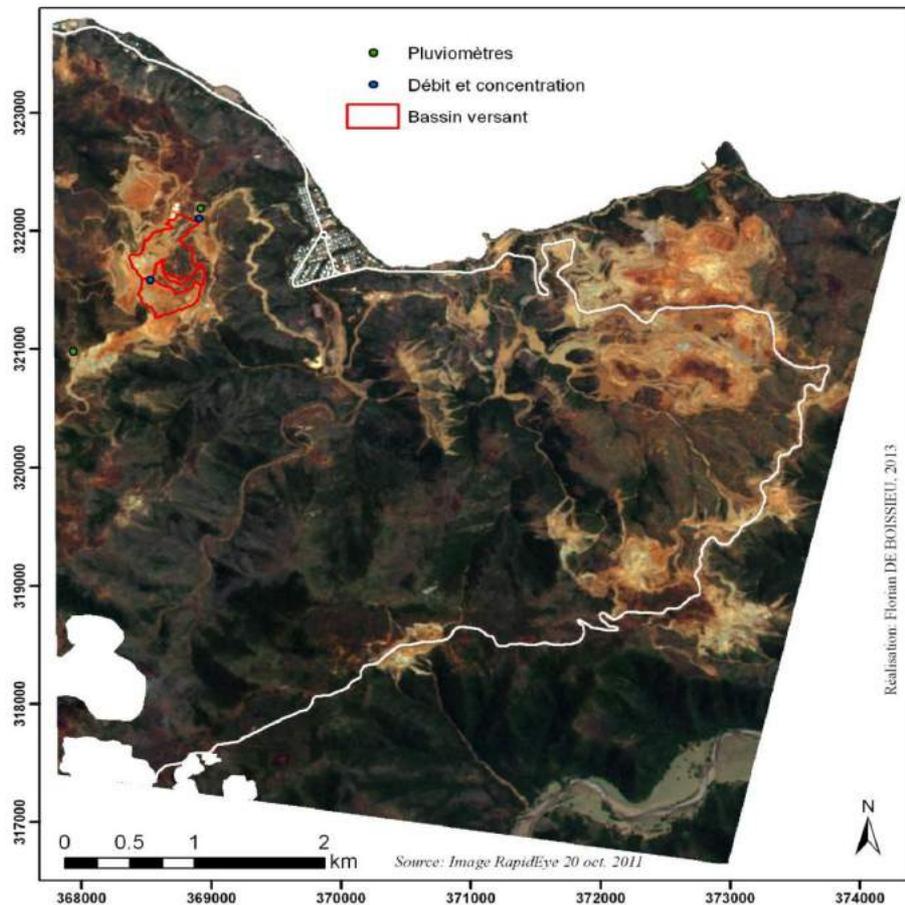


Figure 11: Localisation des matériels de mesure de terrain et de la zone du BV étudié sur l'emprise de l'image satellite

Après l'application de plusieurs méthodes (différents types de classifications, masques, seuillage sur indices..., cf. rapport de Julia Levermann), les résultats ont d'abord été obtenus sur 14 classes. Pour la validation de la généralisation de la classification à l'ensemble de l'image, un algorithme de "5-fold cross-validation" a été appliqué et donne respectivement respectivement les précisions de 92,25% et 93,06% pour les classifications de 2011 et de 2012.

Le détail de la matrice de confusion (cf. rapport de Julia) apporte des informations sur certaines confusion entre classes. Cependant, devant un score de précision supérieur à 90%, nous considérons ces classifications comme fiables.

Afin de permettre une analyse par comparaison des résultats statistiques des classes dans le deux images, il a été nécessaire de réduire le nombre de classes par agglomération "intelligente", c'est-à-dire toujours sous le contrôle d'expert, à 5.

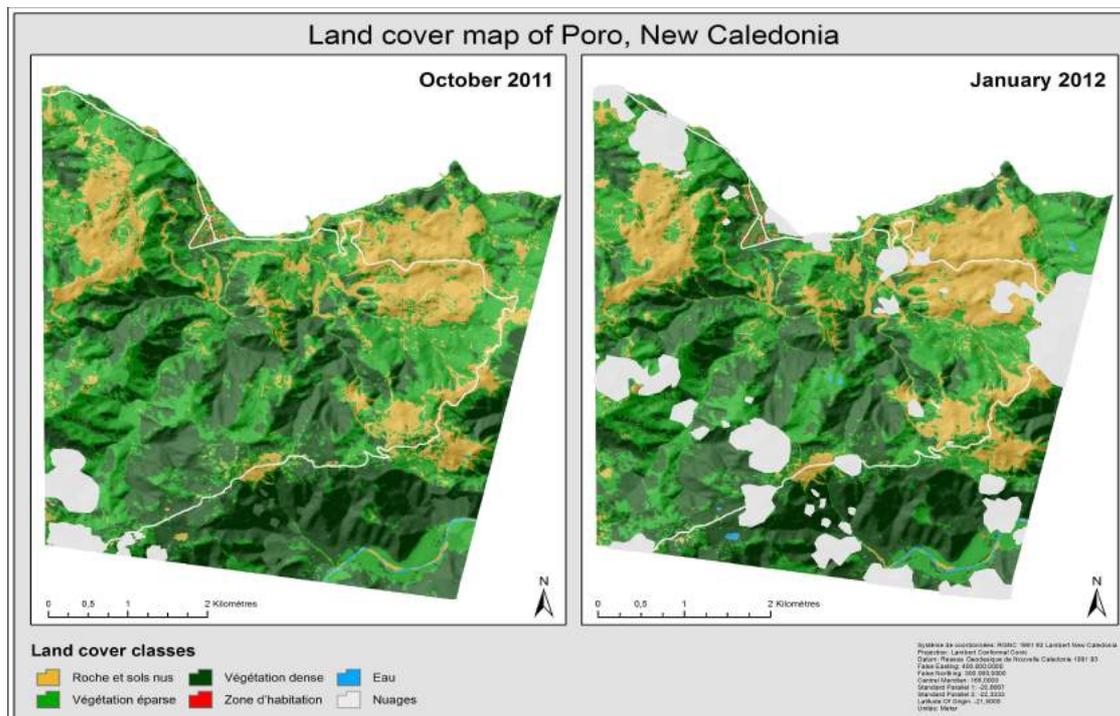
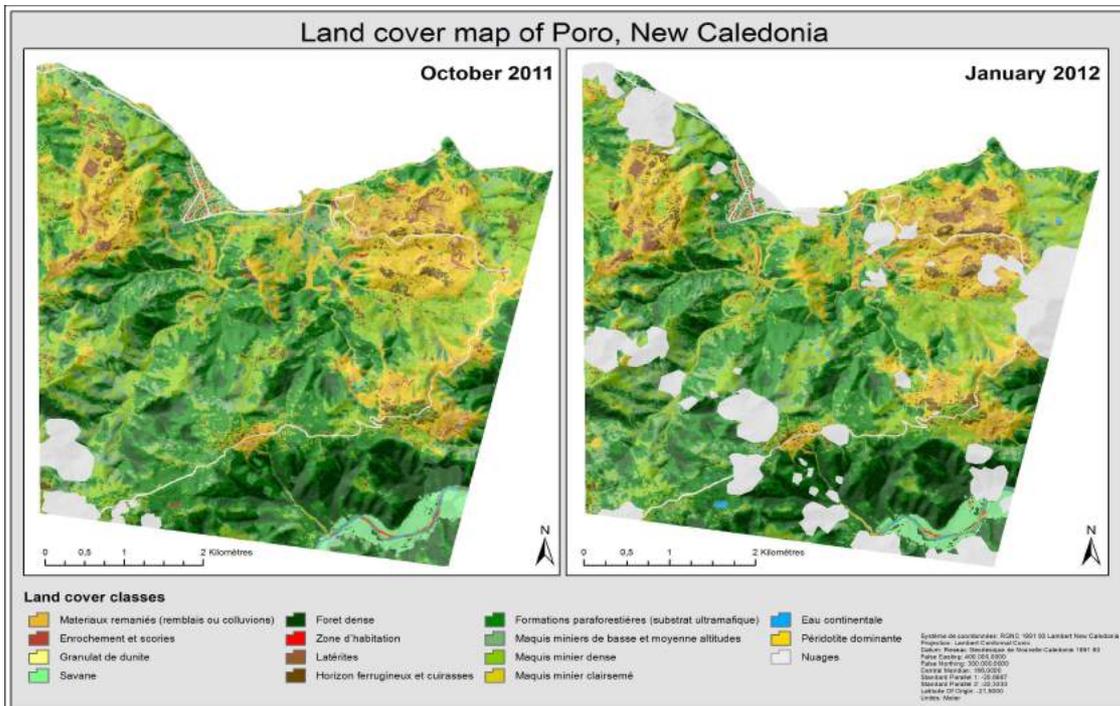
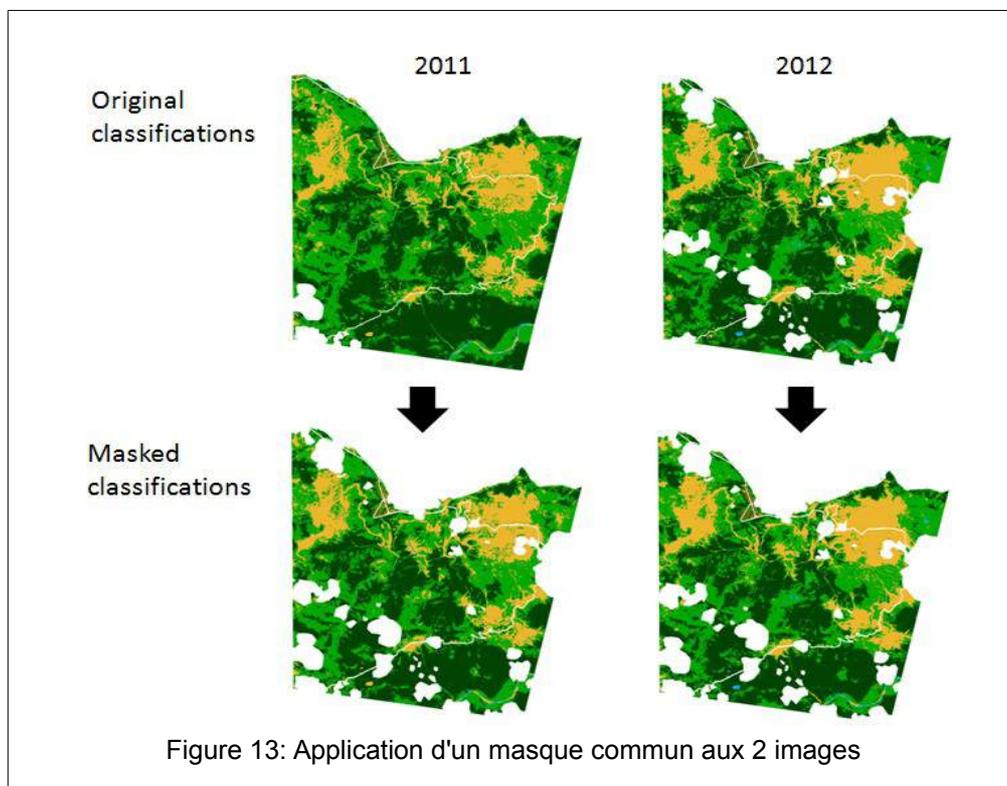


Figure 12: Cartes d'occupation des sols pour les deux dates en 14 classes (A) et 5 classes (B)

La Figure 12 suivante montre les résultats des classifications (14 classes) qui ont été drapées sur le modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 10 m. Cette surimposition permet une meilleure identification des zones montagneuses et à fortes pentes.

L'image datée de 2012 a été acquise durant la saison des pluies (Octobre) et est, de ce fait, plus affectée par la couverture nuageuse. Or, l'analyse temporelle est réalisée par comparaison spatiale des classes deux à deux. Il était donc primordial de disposer exactement de la même extraction d'image (du même nombre de pixel) et de reporter les données manquantes (nuages) sur les deux images (cf. figure 13).



Les différences entre les classifications ont été étudiées statistiquement (cf. rapport sur les différences des superficies) et sont également visibles spatialement sur la figure 14.

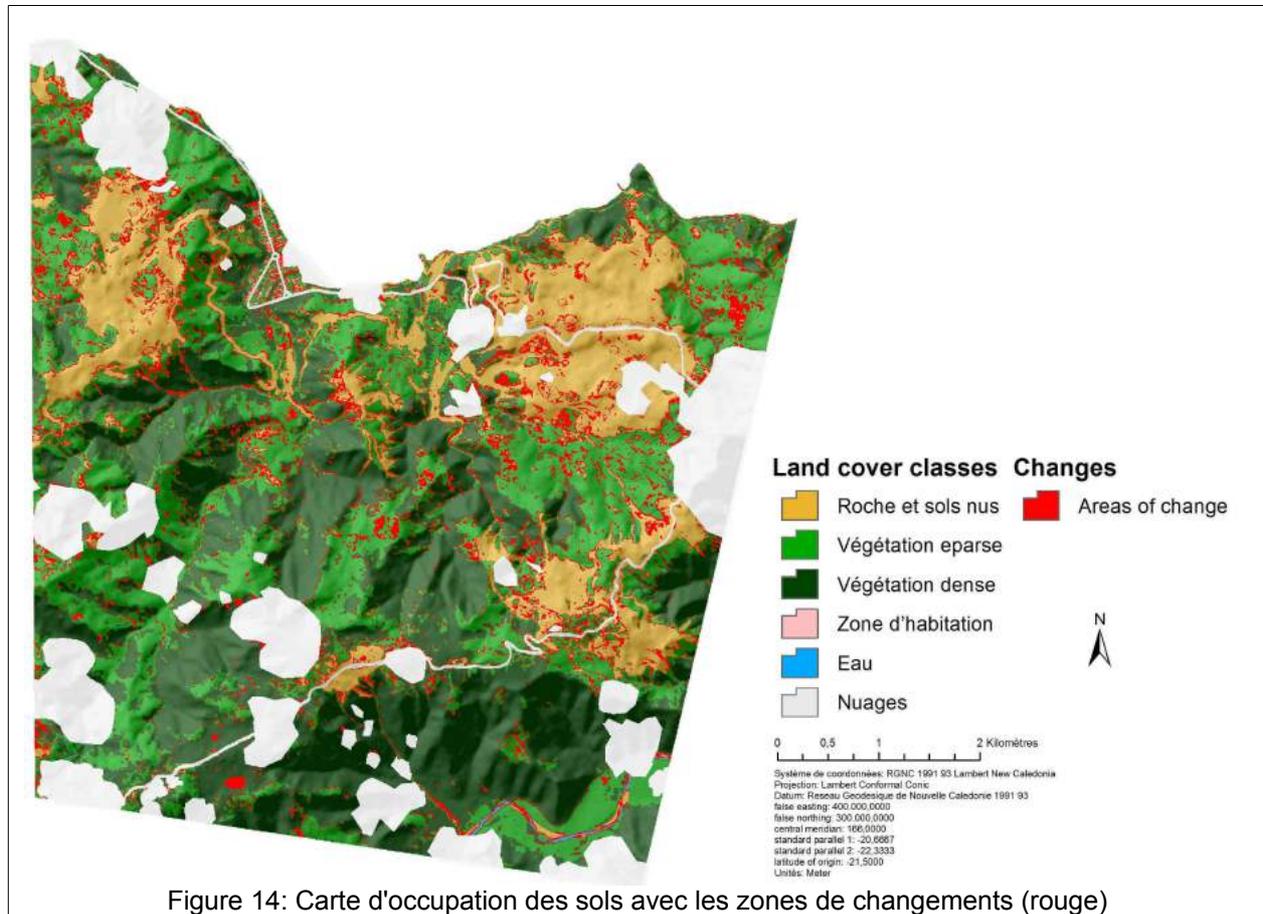


Figure 14: Carte d'occupation des sols avec les zones de changements (rouge)

Le graphique suivant (Figure 15) est un résumé les changements entre les 2 images selon les 4 classes. En effet, la classe habitation n'ayant pas évolué entre les deux dates (4 mois), celle-ci a été enlevé des analyses de comparaisons. Le nombre de combinaisons possible entre les classifications est donc de 16 (4 x 4). Néanmoins, les changements intra-classe (Eau en Eau par exemple) ne sont pas pris en compte dans les calculs ainsi que le changement impossible d'eau en végétation dense.

Étant donné les dates rapprochées des prises de vues, les différences avant et après épisode pluvieux ne sont pas considérables. Cependant, à l'erreur de positionnement près due à l'orthorectification des images, il est à noter une hausse de la superficie des sols nus et une baisse de la végétation épars.

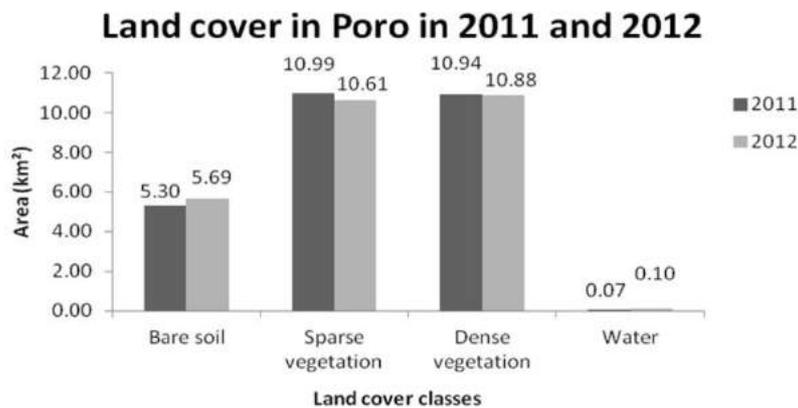


Figure 15: Graphique des superficies par classes

Dynamique des changements de l'occupation du sol

La carte présentée ci-avant montre certes des changements mais en aucune façon n'apporte d'éléments sur la dynamique et la direction de ces changements. Afin d'en étudier les caractéristiques, une matrice des changements a été réalisé (cf. rapport de Julia) et est résumé dans le graphe présenté en Figure 16 ci-après. Les différentes combinaisons de changement "vers-à" sont exprimés en km².

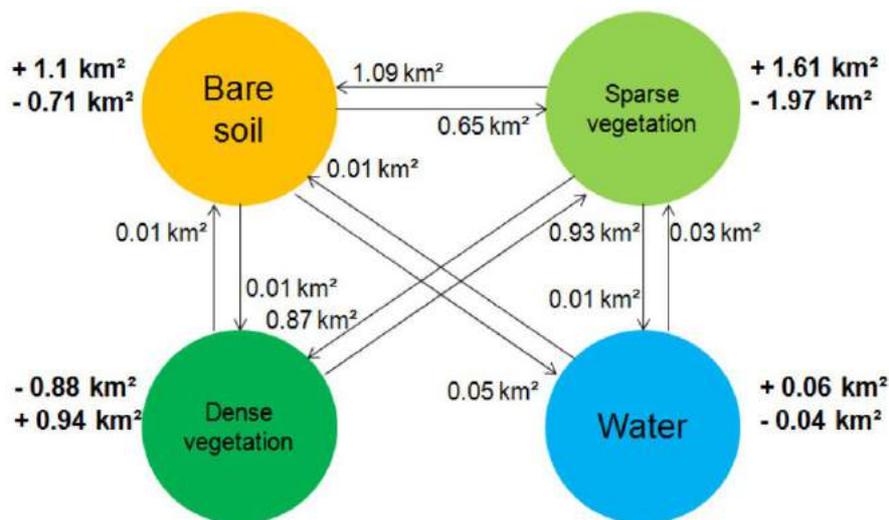


Figure 16: Graphes des dynamiques de changements

Au delà de la dynamique des changements, la représentation spatiale de cette dynamique présentée en Figure 17, permet d'avoir une information sur la direction de ces changements.

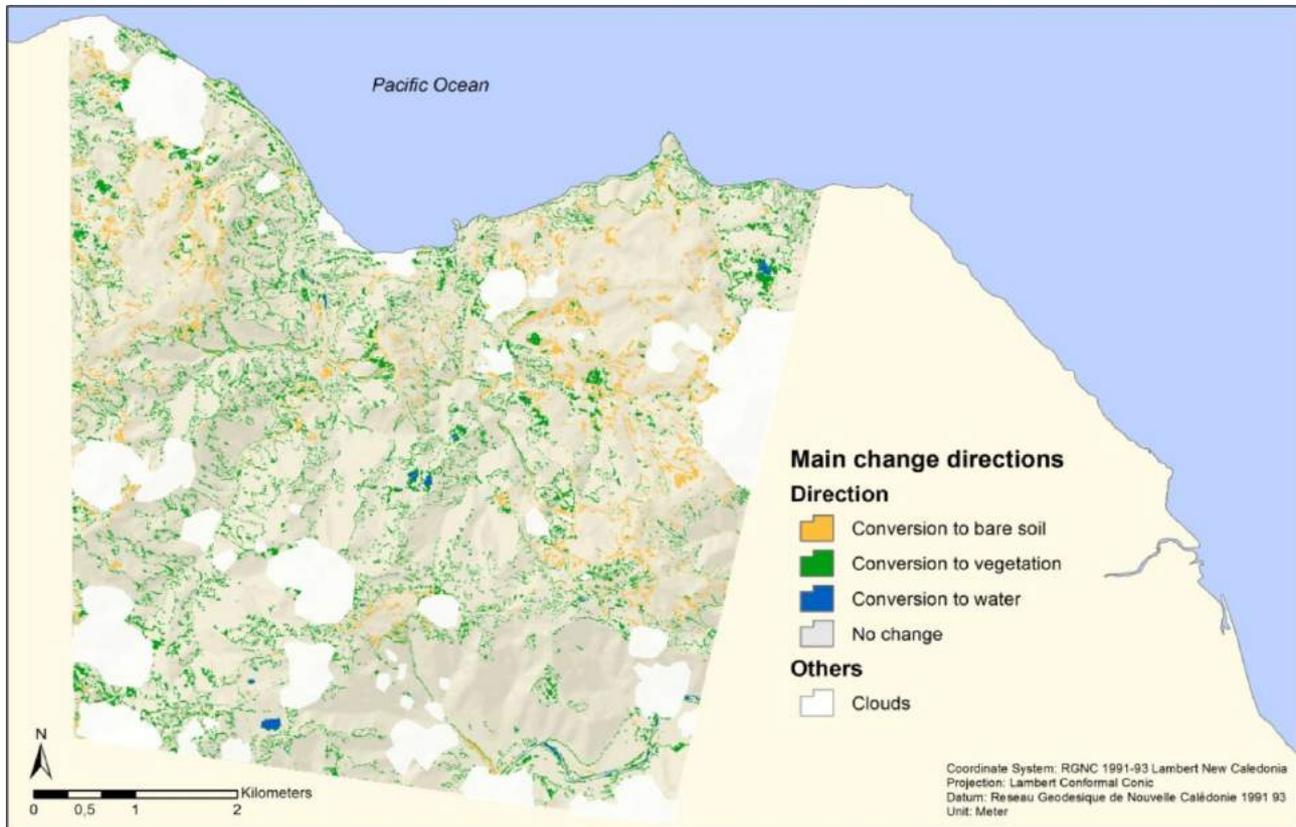


Figure 17: Principaux changements de directions entre classes

VIII. Mise au point d'un indice d'apport sédimentaire

Rédaction : Marc Despinoy & Pascal Dumas

A l'origine prévue dans le cadre du travail du PPME (Volet I), ce travail sur la quantification de l'érosion hydrique des sols a été effectué en collaboration avec l'Université de Nouvelle-Calédonie (Pascal Dumas) et a été co-encadré par une expertise externe en la personne de Florian De Boissieu. Une demande de ré-allocation budgétaire a été faite à cet effet (Annexe 7).

A partir de la carte d'occupation du sol et des mesures de précipitation et de flux de matière dans la zone d'étude du BV de Poro (hydromine) il s'agissait ici de mettre au point un indicateur de sédimentation. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une prestation (prestataire F. de Boissieu) en collaboration avec l'ensemble des membres du consortium et en lien avec le sujet de stage de Julia Levermann.

L'indice d'apport sédimentaire développé dans le cadre de cette étude est basé sur le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation). Cette méthode est l'une des plus utilisées dans les études de ce type à grande échelle en raison de sa relative facilité de mise en œuvre mais également du fait de la simplicité des informations de terrain qu'elle demande. Cette méthode empirique permet d'estimer la masse de sol arrachée par les précipitations. Le passage de la matière arrachée à l'apport sédimentaire se fait normalement à travers un coefficient de transfert appelé « delivery ratio » qui quantifie le rapport entre la perte en sol et le sédiment transporté.

La méthode générique USLE a été développée aux Etats-Unis par Wischmeier et Smith et l'équation utilisée est composée de six facteurs (ci-après) qui, multipliés entre eux, permettent d'obtenir une estimation de la masse érodée (A) en $t \cdot ha^{-1}$, pour chaque épisode pluvieux et pour chaque point de la surface étudiée (pixel ou zone homogène).

- A** : perte annuelle de sol [$t \cdot ha^{-1}$],
- R** : facteur d'érosivité des précipitations [$MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$],
- K** : facteur d'érodabilité des sols [$t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$],
- C** : facteur adimensionnel de la couverture végétale et des pratiques culturales,
- L** : longueur de pente [m],
- S** : inclinaison de pente [%],
- P** : facteur adimensionnel lié aux pratiques de conservation des sols.

Pour chacun de ces facteurs, plusieurs méthodes de calcul sont disponibles dans la littérature. Le détail des méthodes choisies est exposé dans le rapport de F. De Boissieu (Premières pages en Annexe 8).

Plusieurs versions de l'USLE ont été mises en place au cours du temps. Le modèle d'apport sédimentaire mis en œuvre dans le cadre de cette étude se base sur le modèle Revised USLE (RUSLE). C'est une version révisée du modèle USLE améliorant notamment les relations empiriques entre les paramètres de l'érosion et les différents facteurs de l'équation RUSLE (Renard et al., 1997).

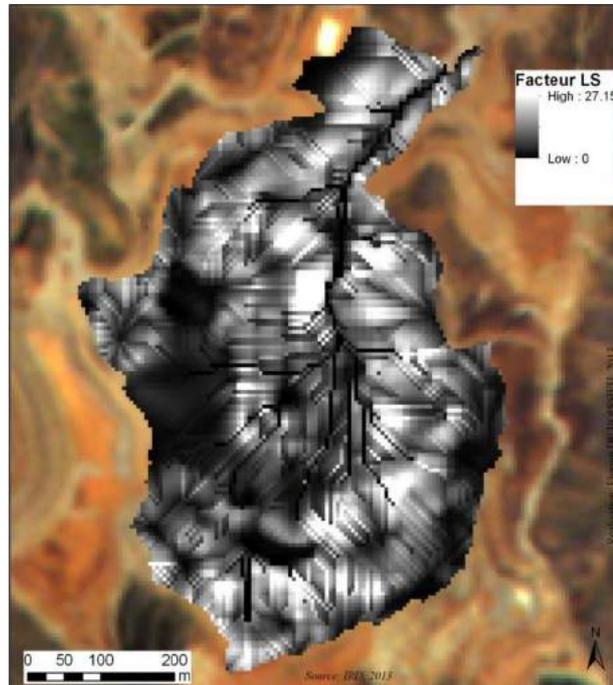


Figure 18 : Exemple de carte du facteur LS sur le bassin versant Hydromine (lien entre la pente et l'érosion)

En Figure 18 (ci-avant) est présenté une des couches intermédiaires pour alimenter le modèle. Elle représente la carte du facteur LS fabriquée à partir du MNT de 10 m. Elle exprime le lien entre la pente et l'érosion. A facteurs K, C et R constants, plus le facteur est élevé, plus l'érosion sera forte, et donc le ruissellement également.

Toutes les données qui ont permis la réalisation de ce modèle sont issues de la base de données BD topo de la DITTT, de références bibliographiques, du programme « Hydromine » et du projet PBV. Voici la liste des données d'entrée que nous avons utilisées :

- Le MNT à 10 m sur la zone de Houailou,
- La cartographie de l'occupation du sol de 2011 (14 classes), réalisée durant cette étude par Julia Levermann lors de son stage de M2 (cf. tâche 5a). Cette carte est issue du traitement de l'image RapidEye de la zone de Poro prise le 20 novembre 2011 vers 11:14:50.
- La carte géologique du bassin versant de l'étude, réalisée par un stagiaire de l'IRSTEA et validée par Dominique Cluzel en 2011-2012.
- La carte de pédologie de la Grande Terre, réalisée par Emmanuel Fritsch et publiée dans l'Atlas de Nouvelle-Calédonie.
- Les mesures de pluviométrie, de débit d'eau et de concentration en matière en suspension (MES) pré-traitées et fournies par l'IRSTEA. Les mesures de débit et de concentration en MES proviennent de deux stations, une à l'exutoire du bassin amont et l'autre à l'exutoire du bassin aval. Les mesures de pluviométrie proviennent de deux pluviomètres situés respectivement en amont et en aval des stations de mesure citées précédemment. Ces données se trouvent sous la forme d'un fichier de synthèse recensant les événements pluvieux entre 02/01/2009 et 12/06/2012, et dans un fichier contenant les chroniques de mesure associées.

Grâce aux facteurs du modèle RUSLE, une carte d'érodabilité des sols peut être calculée. A partir de cette information, un indice d'apport sédimentaire par pixel a pu être mis en place en établissant la relation entre le flux de sédiment mesuré à l'exutoire du BV et l'arrachement de matière global (perte en sol) sur le bassin versant.

En considérant ce coefficient de transfert comme uniforme sur l'ensemble du bassin versant étudié, on peut alors définir l'indice d'apport sédimentaire comme l'érodabilité des sols multiplié par le coefficient de transfert, exprimé selon l'équation suivante :

$$SY_i = dr \times KCLS_i$$

avec SY_i : indice d'apport sédimentaire du pixel i [t.ha.h.ha⁻¹ .MJ⁻¹ .mm⁻¹]

dr : delivery ratio, adimensionnel, ici $dr=0.002$

$KCLS_i$: érodabilité du pixel i [t.ha.h.ha⁻¹ .MJ⁻¹ .mm⁻¹]

Le résultat se présente sous forme de carte (raster) en niveaux de gris avec pour valeurs les plus faibles en noir et les plus fortes en blanc (cf. Figure 19).

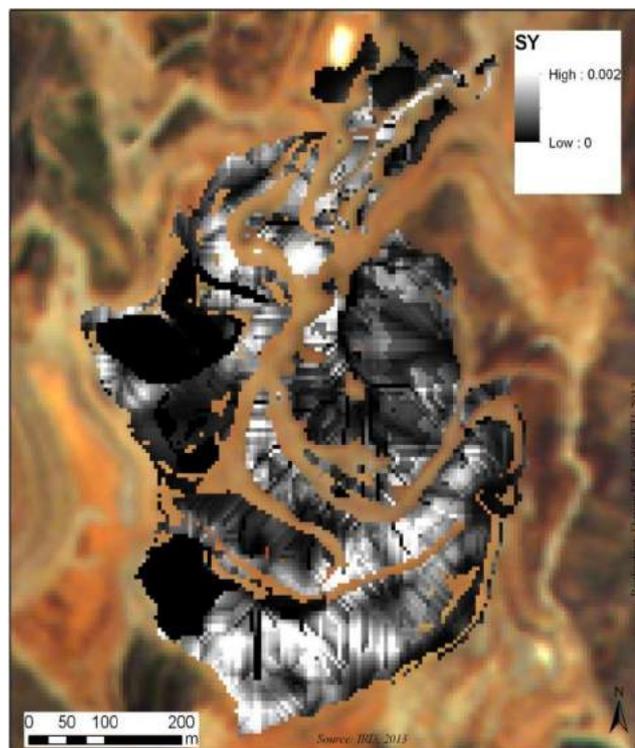


Figure 19: Carte d'indice d'apport sédimentaire sur le bassin versant Hydromine (valeur en t.ha.h.ha⁻¹ .MJ⁻¹ .mm⁻¹)

IX. Budget

Parmi les mouvements réalisés dans le budget, une ré-allocation a été demandé afin de réaliser le travail sur la modélisation de l'érosion de sols en collaboration avec l'UNC (P. Dumas). Ainsi, le budget dédié au deuxième stagiaire (5 000 €) et une partie du budget du fonctionnement (5 000 €) a été dédié à une prestation.

Désignation	Prix HT (Euros)	Quantités	Montant (Euros)
Acquisition de données			
- Hymap (Zone de Poro)	8 500	1	8 500
- Formosat-2 (4 images à programmer au niveau 1A pour orthorectification et fusion P+XS)	2 000	4	8 000
Mission de terrain	200	5	1 000
Frais de fonctionnement	5 000	1	5 000
Stages Master	5 000	2	10 000
TOTAL IRD- UMR ESPACE-DEV			32 500

Tableau 5: Tableau de répartition budgétaire initial

Désignation	Prix HT (Euros)	Quantités	Montant (Euros)
Acquisition de données			
- Hymap (Zone de Poro)	8 500	1	8 500
- Formosat-2 (4 images à programmer au niveau 1A pour orthorectification et fusion P+XS)	2 000	4	8 000
Mission de terrain	200	5	1 000
Frais de fonctionnement	0		0
Stages Master	5 000	1	5 000
Prestation	10 000	1	10 000
TOTAL IRD- UMR ESPACE-DEV			32 500

Tableau 6: Tableau de répartition budgétaire modifié (modifications en rouge)

X. Conclusion

Le projet dans sa globalité (réponse à l'appel à projet du CNRT 2009) s'inscrit dans une réponse à des questionnements scientifiques ayant attiré à l'étude de l'érosion sur un milieu tropical insulaire fragilisé par les activités minières. Il vise en effet à *améliorer les connaissances des mécanismes de fonctionnement du transport solide et également à quantifier les flux de graves en aval de site minier pour une minimisation de leurs impacts dans différents contextes géo-morpho-climatiques des petits bassins versants concernés par l'activité minière en Nouvelle-Calédonie.*

Dans ce contexte qui se veut pluridisciplinaire, l'équipe de l'ESPACE-DEV (IRD) a été sollicitée pour contribuer au développement d'approches scientifiques complémentaires très diversifiées qui visent notamment à évaluer les potentialités de la télédétection à technologie passive sur les problématiques de morphologie dynamique fluviale en Nouvelle-Calédonie. Plus précisément, il s'agit de mettre en place des méthodologies pour l'étude de l'érosion et des changements du milieu (petit bassin versant), contraint par un épisode pluvieux intense, par l'utilisation de la télédétection et de la modélisation.

Le travail mené par notre équipe dans le cadre de sa mission est résumé au travers de ce rapport et présente ici les "aboutissants" finaux. Les méthodologies utilisées apportent, soit des finalités scientifiques prometteuses en proposant des voies de développements scientifiques, soit aident à la compréhension des changements du milieu et du phénomène d'érosion en donnant des indications quantitatives (modifications des superficies des classes ; matières arrachées à l'exutoire).

Une première étape de recherche exhaustive d'images satellitaires a été réalisée sur des données possédant des résolutions spatiale et temporelle adaptées à la problématique de l'érosion d'un petit bassin versant (environ 30 km²). Les résultats nous ont amenés à considérer que les données issues du capteur RapidEye étaient suffisantes (5m au niveau 3A et permet l'obtention d'une image tous les 24 heures sur un même site). Des essais ont été réalisés sur d'autres données mieux résolues spatialement (Formosat2) et spectralement (Hymap).

Les images aéroportées hyperspectrales ont apportées quant à elles un fort pouvoir de discrimination des objets et les résultats, malgré la couverture importante de nuages, sont plus que prometteurs. La possibilité d'associer un type de substrat à une classe de végétation à partir de traitements automatiques est particulièrement novateur.

Avec une résolution spatiale de 3,4 m (après géo-correction), les images issues du capteur Formosat-2 apportent une information détaillée largement compensée par le canal additionnel "RedEdge" de RapidEye. En effet, ce dernier nous a permis d'atténuer les confusions entre les classes et apporte ainsi des résultats fiables notamment pour les images datées de 2011 et 2012.

Comme pour l'image de Formosat-2, l'image RapidEye de 2010, obtenue gratuitement grâce au programme EQUIPEX GEOSUD, possède un niveau de pré-traitement qui ne permet pas une bonne précision géométrique. Les quantifications en superficie des objets au sol, dans cet environnement montagneux de Poro, ne sont donc pas possibles ou avec de grandes imprécisions. Elle nous a permis cependant de caler notre modèle de traitement d'image et de mettre en place une typologie des classes adaptée à la problématique.

Une fois les images RapidEye de 2011 et 2012 obtenues (achat auprès d'un organisme australien) au niveau 3A (orthorectifiées, 5 m de résolution spatiale), l'application des méthodes de traitement ont apportés des résultats intéressants sur la migration de classes (passage d'une classe à l'autre). Cependant, les dates d'acquisition étant relativement proche, les variations en superficies sont minimales.

La classification d'occupation des sols réalisée à partir de l'image RapidEye de 2011 a été utilisée pour l'étude d'érosion par l'application du modèle empirique USLE. Ce modèle, établi pour un milieu bien particulier (tempéré américain), est cependant difficilement applicable tel quel dans un milieu tropical insulaire comme la Calédonie sans précautions.

La conséquence de cette différence environnementale est que les résultats obtenus ici ne sont exploitables que pour des comparaisons relative, entre plusieurs bassins versants.

Une autre solution serait de collecter toutes les données de terrain (granulométrie précise,...) nécessaires à la construction du modèle USLE spécifique à l'environnement calédonien.

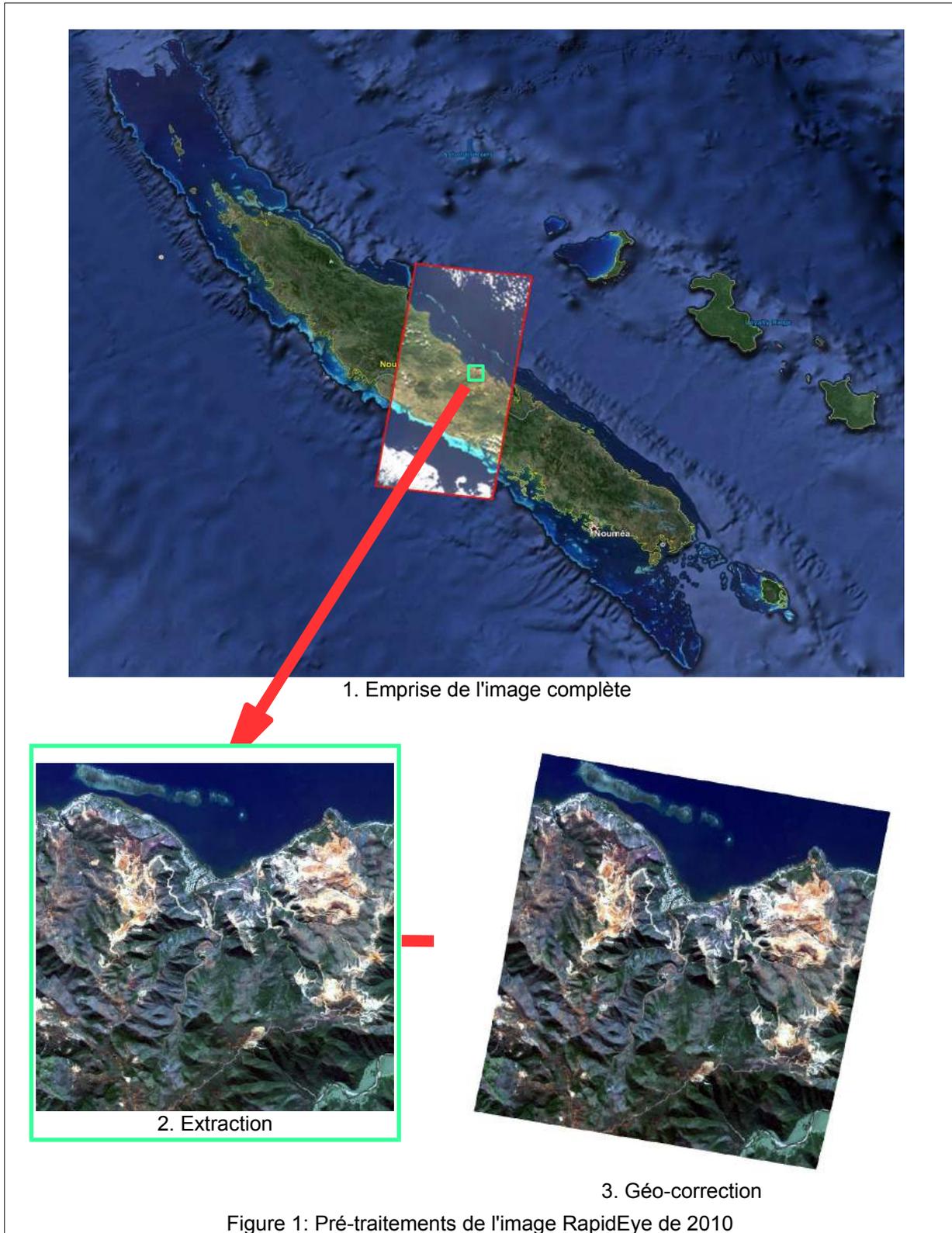
Une dernière solution qui a été adoptée dans ce projet, est de confronter les résultats du modèle USLE à des données de terrain. Ainsi, l'instrumentation du BV réalisée par l'équipe de l'IRSTEA (CEMAGREF), a permis d'apporter des valeurs de référence au modèle utilisé pour passer ainsi de données de perte en sol (t/ha/an) à un indice d'apport sédimentaire.

Enfin, au delà des descriptions des limites techniques des données utilisées, cette étude a montré que l'apport de la télédétection et de la modélisation pour la thématique d'érosion sur petits bassins versant en milieu tropical insulaire (île haute) est important. Elle est cependant tributaire de données exogènes (reconnaissance de terrain, cartes, données hydrologiques...) afin de caler les modèles et d'obtenir des résultats fiables.

Il serait également intéressant de disposer de données de terrain sur d'autres bassins versants connexes, moins anthropisés, afin de mesurer précisément l'importance de l'impact de l'activité minière sur Poro.

Les méthodes de traitement développés ici sont suffisamment génériques pour être applicables à d'autres jeux de données et permettrait d'analyser les changements sur d'autres bassins versants. Ceci apporterait des informations primordiales pour une analyse plus exhaustive de la problématique d'érosion à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Traitements de l'image RapidEye acquise le 13 juillet 2010

Étapes de traitements :

1. Extraction sur la zone d'étude (Figure 1 - 2)
2. Géocorrection de l'image (Figure 1 - 3) avec 199 points de contrôles réalisés à partir d'orthophotos (polynôme de degrés 4 et ré-échantillonnage selon la méthode plus proche voisin pour conserver les valeurs radiométriques de l'image de départ : précision = 2 à 4 pixels selon les zones géographiques. En effet, les zones montagneuses présentant moins de possibilités de points de contrôles sont moins bien géoréférencées
3. Masque de la partie maritime (par seuillage sur canal PIR)
4. Classifications supervisées par méthode de classification de type SVM (Support Vector Machine) sur la partie terrestre
5. Statistiques sur la précision de la classification : supérieur à 87 % confirmée par une valeur de kappa sup. à 86 % (Figure 2)

Overall Accuracy = (1881/2148) 87.5698% Kappa Coefficient = 0.8647		Hors image	Ombres	Peridot. Sapro. Serpen.	Lat. en place ou rema.	Horiz. Fer. et cuirasse	Toitures	Pistes drains érodés lits enco.	Herbaces	Route (Bitume)	Route (mélange)	Veg. 20%	Veg. basse grise ou sur sols part.	Veg. 50%	Foret dense	Total
Hors image	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ombres	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12
Peridotites Sapolite Serpentine	0	0	91	5	0	5	10	0	0	2	0	0	0	0	0	11
Laterites en place ou remaniée	0	0	2	91	1	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	7
Horizons ferrugineux et cuirasse	0	0	0	3	90	0	1	0	2	0	5	1	0	0	0	6
Toitures	0	0	1	0	0	92	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9
Pistes et drains érodés lits encombrés	0	0	5	0	3	2	77	0	1	3	4	1	1	0	0	9
Herbaces	0	0	0	0	0	0	0	98	0	1	0	0	0	0	0	6
Route (Bitume)	0	0	0	1	3	0	3	0	91	23	0	0	0	0	0	9
Route (mélange)	0	0	0	0	0	0	3	0	1	67	4	1	0	0	0	3
Vegetation 20%	0	0	0	0	3	0	1	0	1	0	57	14	1	0	0	5
Veg. basse grise ou sur sols part.	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	29	84	4	0	0	9
Vegetation 50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	88	9	0	6
Foret dense	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	6	90	8

Commission	Omission	Commission	Omission	Prod. Acc.	User Acc.	Prod. Acc.	User Acc.
(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)
0	0.00	0/30	0/30	100.00	100.00	30/30	30/30
1	0.00	2/248	0/246	100.00	99.19	246/246	246/248
17	8.80	40/237	19/216	91.20	83.12	197/216	197/237
11	8.82	16/140	12/136	91.18	88.57	124/136	124/140
13	10.48	17/128	13/124	89.52	86.72	111/124	111/128
3	7.69	5/197	16/208	92.31	97.46	192/208	192/197
15	23.19	29/188	48/207	76.81	84.57	159/207	159/188
2	2.40	2/124	3/125	97.60	98.39	122/125	122/124
17	9.09	33/193	16/176	90.91	82.90	160/176	160/193
19	33.33	14/74	30/90	66.67	81.08	60/90	60/74
34	42.86	33/97	48/112	57.14	65.98	64/112	64/97
25	16.47	48/190	28/170	83.53	74.74	142/170	142/190
14	12.41	19/139	17/137	87.59	86.33	120/137	120/139
6	9.94	9/163	17/171	90.06	94.48	154/171	154/163

Figure 2: Matrice de confusion de la classification supervisée de l'image RapidEye de 2010

La confusion inter-classe la plus forte étant pour la classe végétation (densité 20%) avec la classe "végétation basse grise sur sols particulier".

Dans une moindre mesure, une autre confusion concerne les classes "Pistes drains érodées - lits encombrés" avec "Peridotites-Sapolite-Serpentine".

ANNEXE 2 : Exemple des données collectées sur le terrain

ID	Long_RGNC	Lat_RGNC	Long_WGS84	Lat_WGS84	Rq	Class
1	369310,271657	322278,984223	165,704201	-21,298502	Unknown cover of needs to be checked	1
2	370436,854231	321391,607538	165,715044	-21,306536	Unknown cover of needs to be checked	1
3	370444,57055	321260,430115	165,715116	-21,307721	Unknown cover of needs to be checked	1
4	370467,719507	321507,352323	165,715343	-21,305491	Unknown cover of needs to be checked	1
5	370514,017421	321515,068642	165,71579	-21,305422	Unknown cover of needs to be checked	1
6	369426,016442	322772,828639	165,705326	-21,294043	Unknown cover of needs to be checked	1
7	369024,767854	322927,155019	165,701461	-21,292642	Unknown cover of needs to be checked	1
8	369040,200492	322988,885571	165,701611	-21,292085	Unknown cover of needs to be checked	1
9	369626,640736	321214,132201	165,707231	-21,308126	Unknown cover of needs to be checked	1
10	373145,2822	317772,653927	165,741092	-21,339267	Unknown cover of needs to be checked	1
11	372844,345759	317379,121658	165,738185	-21,342817	Unknown cover of needs to be checked	1
12	372157,593368	317078,185217	165,731558	-21,345525	Unknown cover of needs to be checked	1
13	372173,026006	317116,766812	165,731708	-21,345177	Unknown cover of needs to be checked	1
14	372335,068705	318775,775397	165,733297	-21,330194	Unknown cover of needs to be checked	2
15	372690,019379	318899,236501	165,736721	-21,329084	Route Bitume	2
16	372103,579135	318721,761164	165,731065	-21,330678	Route Bitume	2
17	373515,665512	320851,465208	165,744712	-21,311463	Route Bitume	2
18	372450,81349	321337,593305	165,734455	-21,307056	Route Bitume	2
19	373021,821096	319408,513555	165,739928	-21,324489	Route Bitume	2
20	369595,77546	322718,814406	165,706961	-21,294534	Route Bitume	2
21	369271,690062	323012,034528	165,703842	-21,291888	Route 2	3
22	368901,30675	323251,240417	165,700277	-21,289713	Route 2	3
23	368600,370309	323420,999435	165,69738	-21,288174	Route 2	3
24	369418,300123	322919,4387	165,705254	-21,292719	Route 2	3
25	368276,284911	323613,90741	165,69426	-21,286426	Route 2	3
26	369132,79632	322224,96999	165,702489	-21,298987	Route 2	4
27	369742,385521	320087,549627	165,708326	-21,318304	Veg 20%	4
28	370521,73374	321430,189133	165,715863	-21,306189	Veg 20%	4
29	369179,094234	319555,123616	165,702887	-21,323103	Veg 20%	4
30	371787,210056	318559,718465	165,728012	-21,332137	Veg 20%	4
31	373592,828702	320295,89024	165,745447	-21,316483	Veg 20%	4
32	369564,910184	321129,252692	165,706634	-21,308891	Veg 20%	4
33	373515,665512	320681,70619	165,744709	-21,312996	Veg 20%	4
34	368013,930065	323691,0706	165,691733	-21,285725	Veg 20%	5
35	368075,660617	323752,801152	165,692329	-21,285168	Veg Basse ou sur sol particulier	5
36	368785,561965	323027,467166	165,699158	-21,291732	Veg Basse ou sur sol particulier	5
37	369256,257424	322950,303976	165,703693	-21,292437	Veg Basse ou sur sol particulier	5
38	369387,434847	321731,125574	165,704935	-21,303452	Veg Basse ou sur sol particulier	5
39	369518,61227	321121,536373	165,706188	-21,30896	Veg Basse ou sur sol particulier	5
40	372103,579135	317085,901536	165,731038	-21,345454	Veg Basse ou sur sol particulier	6
41	372173,026006	317031,887303	165,731706	-21,345943	Riv	6
42	372389,082938	317085,901536	165,73379	-21,345459	Riv	6
43	372412,231895	317093,617855	165,734014	-21,34539	Riv	6
44	372821,196802	317379,121658	165,737961	-21,342817	Riv	6
45	368129,67485	320859,181527	165,692795	-21,311306	Riv	7
46	369356,569571	322086,076248	165,704644	-21,300245	Peridotites Sapolites Serpentine	7
47	369804,116073	320859,181527	165,708935	-21,311335	Peridotites Sapolites Serpentine	7
48	368430,611291	322510,473793	165,695727	-21,296396	Peridotites Sapolites Serpentine	7
49	368476,909205	321754,274531	165,696159	-21,303227	Peridotites Sapolites Serpentine	7
50	368492,341843	321437,905452	165,696302	-21,306085	Peridotites Sapolites Serpentine	7
51	368361,16442	322425,594284	165,695056	-21,297161	Peridotites Sapolites Serpentine	7
52	371802,642694	321314,444348	165,728207	-21,307255	Peridotites Sapolites Serpentine	7
53	373353,622813	321167,834287	165,743155	-21,308603	Peridotites Sapolites Serpentine	7
54	368253,135954	321028,940545	165,693988	-21,309775	Peridotites Sapolites Serpentine	8
55	368338,015463	321113,820054	165,694808	-21,309011	Laterites en place ou remaniee	8
56	368615,802947	321214,132201	165,697488	-21,308108	Laterites en place ou remaniee	8
57	368970,753621	321299,01171	165,70091	-21,307348	Laterites en place ou remaniee	8
58	368924,455707	321499,636004	165,700468	-21,305535	Laterites en place ou remaniee	8
59	368993,902578	321831,437721	165,701143	-21,302539	Laterites en place ou remaniee	8
60	368978,46994	322170,955757	165,701001	-21,299472	Laterites en place ou remaniee	8
61	368530,923438	322448,743241	165,696693	-21,296955	Laterites en place ou remaniee	8
62	368476,909205	322371,580051	165,69617	-21,297651	Laterites en place ou remaniee	8
63	372759,46625	321437,905452	165,737432	-21,306155	Laterites en place ou remaniee	8
64	373770,304039	320573,677724	165,747162	-21,313976	Laterites en place ou remaniee	8
65	368129,67485	321792,856126	165,692813	-21,302872	Laterites en place ou remaniee	9
66	369804,116073	320141,56386	165,708922	-21,317817	Horizons ferrugineux et cuirasse	9
67	368442,697668	320496,514534	165,709301	-21,314611	Horizons ferrugineux et cuirasse	9
68	370413,705274	320782,018337	165,71481	-21,312042	Horizons ferrugineux et cuirasse	9
69	370390,556317	320982,642631	165,71459	-21,310229	Horizons ferrugineux et cuirasse	9
70	368893,590431	322317,565818	165,700186	-21,298146	Horizons ferrugineux et cuirasse	9
71	372859,778397	321407,040176	165,738398	-21,306435	Horizons ferrugineux et cuirasse	9
72	372288,770791	318852,938587	165,732852	-21,329496	Horizons ferrugineux et cuirasse	9
73	369966,158772	321700,260298	165,710512	-21,30374	Horizons ferrugineux et cuirasse	10
74	369788,683435	321931,749868	165,708806	-21,301646	Toitures	10
75	369811,832392	321877,735635	165,709028	-21,302135	Toitures	10
76	369858,130306	321893,168273	165,709474	-21,301996	Toitures	10
77	369966,158772	321978,047782	165,710517	-21,301231	Toitures	10
78	370058,7546	321924,033549	165,711409	-21,301721	Toitures	10
79	369950,726134	321916,31723	165,710367	-21,301789	Toitures	10
80	369773,250797	321800,572445	165,708655	-21,302831	Toitures	10
81	369572,626503	322186,388395	165,706728	-21,299343	Toitures	11
82	369858,130306	321453,33809	165,709467	-21,305969	Piste et drains erodes lits encombrés	11
83	369804,116073	321121,536373	165,70894	-21,308965	Piste et drains erodes lits encombrés	11
84	370830,3865	321545,933918	165,71884	-21,305149	Piste et drains erodes lits encombrés	11
85	369271,690062	321561,366556	165,703816	-21,304983	Piste et drains erodes lits encombrés	11
86	368824,14356	322140,090481	165,699513	-21,299748	Piste et drains erodes lits encombrés	11
87	369796,399754	321515,068642	165,708873	-21,30541	Piste et drains erodes lits encombrés	11
88	370081,903557	320689,422509	165,711161	-21,312873	Piste et drains erodes lits encombrés	11
89	369935,293496	320820,599932	165,710199	-21,311686	Piste et drains erodes lits encombrés	11
90	369279,406381	322240,402628	165,703903	-21,29885	Piste et drains erodes lits encombrés	11

Tableau 1: Points terrain de la sortie de Novembre 2012

ANNEXE 3 : Exemple de rapport d'expertise I. Rouet (Géologue - Géomaticienne)

Image :Poro - F2 du 2008-06-19

Capteur : Formosat 2

Date: 19 juin 2008

Résolution spatiale: ~3,4 m

Référence spatiale: EPSG 3163 (RGNC_1991_Lambert_New_Caledonia)

Pré-traitements

Géométrie: orthorectification partielle.

Les données de référence ne sont disponibles que dans les zones habitées ou minières, les zones naturelles sont la plupart du temps sans donnée de référence, ce qui implique des écarts géométriques non négligeables dans ces dernières. Pas de solution immédiate (points sur BD Ortho ?)

Classification des sols nus (version du 2012-01-25)

Commentaires I. Rouet sur ces 8 classes après examen visuel par comparaison avec la BD Ortho sur la zone disponible (mine Poro élargie):

D'une manière générale, le calage géométrique pose problème dans les zones où l'information de référence n'est pas suffisante (écarts jusqu'à 25 m, peut-être plus par endroits). L'analyse critique des classifications issues de cette image en est par conséquent rendue beaucoup plus difficile.

La cuirasse est, comme souvent, difficile à sortir de la végétation.

Certaines classes (4, 5, 6, 7, 8) discriminent très bien un thème, celles qui comprennent majoritairement des pixels isolés sont à fusionner en fonction du thème discriminé.

Les classes qui pointent un thème mais présentent des confusions sont à revoir avant de leur fusionner les classes "propres" (0, 1, 2, 3).

La classe 1 englobe trop de thèmes. Il serait intéressant d'en extraire notamment les surfaces pour lesquelles la végétation est très peu présente car l'érosion y est souvent active comme sur sols nus, pour en faire une classe à part. Les pistes et autres surfaces nues incluses doivent pouvoir être extraites vers d'autres classes (0, 2, 3 par ex.), notamment celles qui dépassent la taille du pixel.

La classe 2 est à discuter: s'intéresse-t-on aux toitures ?

Au final, on pourrait avoir au moins les classes suivantes de surfaces minérales:

- Péridotites, saprolites et serpentines, en place ou remaniées
- Latérites, en place ou remaniées
- Horizons ferrugineux et cuirasse, en place ou remaniés
- Sols presque nus (végétation très peu couvrante)
- Toitures (cette classe est à discuter, il y a les toits des ateliers sur mine: à prendre ou non ?)

Classe	Correspondance proposée	Commentaire
0	Péridotite et saprolite en place ou remaniés (pistes, plates-formes, talus et décharges principalement), serpentinites	très incomplet et approximatif qq confusions avec latérites remaniées
1	Zones sous végétation, cuirasse nue et horizons ferrugineux, mer	confusion très fréquente avec les ombres confusion ou mauvaise discrimination des pistes, lits de creeks dénudés et autres sols nus vaguement linéaires inclus dans ces zones
2	Péridotite, serpentinites et saprolite en place ou remaniés (talus, pistes...), toits métalliques clairs (blancs, bleus)	les pixels sont très disséminés et la plupart pourraient rejoindre la classe 0 (sauf les toits)
3	Latérites en place ou remaniées, nues ou sous végétation éparse, horizons ferrugineux et cuirasse, une partie des sédiments de rivière	confusion partielle avec les péridotites et saprolites remaniées (remblais sur piste ou plate-forme, talus, etc.), un peu avec la cuirasse
4	Péridotites, saprolite et serpentinites en place ou remaniées	pixels disséminés très souvent bien classés. à fusionner avec 0 à condition de redéfinir 0 en excluant les latérites
5	Latérites et horizons ferrugineux en place ou remaniés	pixels disséminés très souvent bien classés à fusionner avec 3 après correction de 3
6	Latérites en place ou remaniées	peu de confusion avec saprolite et péridotite
7	Latérites en place ou remaniées	pixels souvent disséminés à fusionner avec 6
8	Péridotites, saprolites et serpentinites en place ou remaniées	pixels très disséminés très bien classés à fusionner avec 4

ANNEXE 4 : Traitements sur image Formosat2

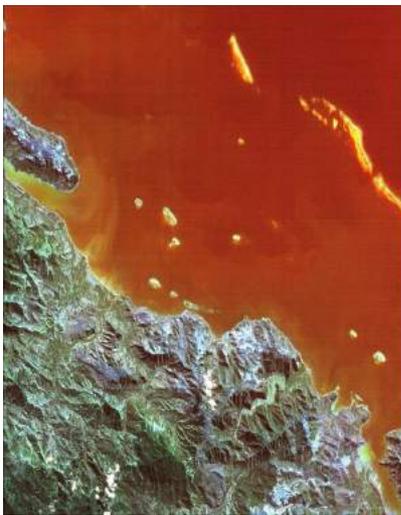
Caractéristiques de l'image Formosat-2

Archive ; niveau de pré-traitement 1A (pas de référencement géographique, traitements radiométriques) ; multispectrale ; 2m couleurs produit fusionné

Fournisseur : SPOT Image (Toulouse, France)

Date d'achat : 07/12/2012 (bon de commande 3340, Ref. : 940/SCIENCES/252)

Vignette de l'image et ses caractéristiques techniques:



4 canaux (B, V, R et PIR)

Basic Stats	Min	Max	Mean	Stdev
Band 1	0	254	57.031584	23.916496
Band 2	0	254	74.318010	17.810132
Band 3	0	254	132.372163	19.965730
Band 4	0	254	35.541979	40.889552

Nom fichier : F2_20080619_225123_1A_PMS.TIF

Traitements effectués

- orthorectification de l'image sur ArcGIS (interface plus pratique) - modèle polynomial de degrés 4 (ré-échantillonnage par méthode du plus proche voisin) sur plus de 2300 points



- Traitement sous IDL pour la génération de néo-canaux basé sur les indices suivants : PVI, TNDVI, MNDWI, MCLLOUDS, GEMI

- Utilisation des indices pour la discrimination des sols et de la végétation par un seuillage sur le PVI (droite des sols) ($PIR = 0.500334.R + -23.5317$)
- => Coef. Corrélation (Y vs X) = 0.490224 sur 32 points (fichier f2_080619_1a_geo_lin_regr.txt)
- Classification NN sur les 2 parties

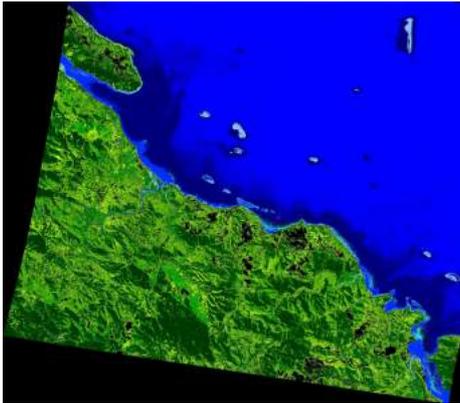


Figure 3: Classification NN sur partie végétation (f2_080619_Sup_NN2)



Figure 4: Classification NN sur partie sols nus (f2_Sols_NN_Classif)

Conclusion de l'expertise des résultats sur les sols par Isabelle Rouet (BVCNRT-Poro-F2du2008-06-19-260112-1847-2.pdf) : confusions importantes du à une orthorectification parfois incertaines dans zones de végétation sans points remarquables et proposition de regroupement de classes.

Solution adoptée : Recentrage de l'extraction sur la zone du bassin versant "Hydromine ou CFTMC" étudié :

- Extraction de l'image sur la baie de Poro qui comprend les 2 sites miniers (CFTMC et SLN)

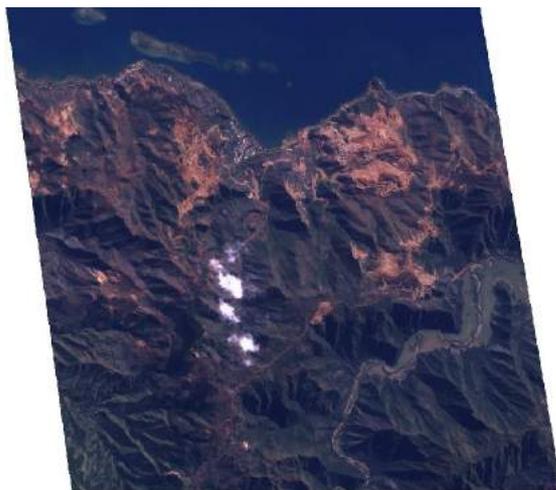


Figure 5: Image Formosat Brute (niveau 1A) - f2_20080619_1a_ClipTrapez.img

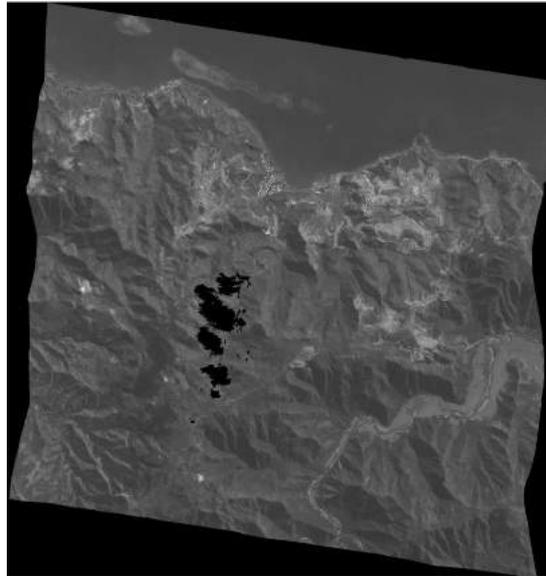
- Orthorectification de l'extraction sur ArcGIS (interface plus pratique) - modèle polynomial sur plus de 1686 points



Figure 6: Image orthorectifiée (f2_20080619_ClipTot2.tif)

- Résultats sur premières classifications non-supervisées non concluants (mélanges entre les classes)
- Traitement sous IDL pour la génération de néo-canaux basé sur les indices suivants : PVI, TNDVI, MNDWI, MLOUDS, GEMI
- Utilisation de ces indices pour la discrimination des sols et de la végétation de 2 façons :
 - * dans un premier temps en utilisant une classification avec les canaux bruts et les indices
 - * ensuite en utilisant certains indices pour séparer les sols de la végétation (par méthode de masquage) + Classification
- Essais avec la création de néo-canaux basés sur la texture (Mean, Variance, Homogeneity, Contrast, Dissimilarity, Entropy, Second Moment, Correlation) pour chacun des canaux (32 néo-canaux). L'analyse visuelle a montré que seul les canaux de texture «Variance» sur canal 1, «Dissimilarity» sur canal 1 et «Mean» sur canal 3, sont utiles pour une amélioration des contrastes (Mean et Variance) et pour la délimitation des contours (urbain par ex.) des objets (dissimilarity). Cependant, seul nous intéresse l'augmentation de discrimination des objets et donc le canal a plus fort potentiel de contrastes. Nous garderons donc pour la suite seulement le neo-canal «Mean» (bande 3) que l'on rajoutera aux canaux d'origine de l'image (B, V, R et PIR)
- Masque des nuages avec le module « SAM¹ Targer Finder with BandMax » d'ENVI sur les canaux texturaux. Le SAM utilise un modèle de classification basé sur les distances angulaire entre canaux. Le BandMax permet de trouver et d'utiliser l'échantillon optimal qui maximise la séparation des cibles de leur environnement, et également permet un gain de temps de calcul.

¹ SAM : Sample Angle Mapper



Masque des nuages sur l'image de Formosat
(2008)

- Séparation sols nus de la végétation (utilisation du seuillage sur l'indice PVI – droite des sols) :
« Mask_PVI_SolVeg2 » et « f2_20080619_Clip_VegEau2 »

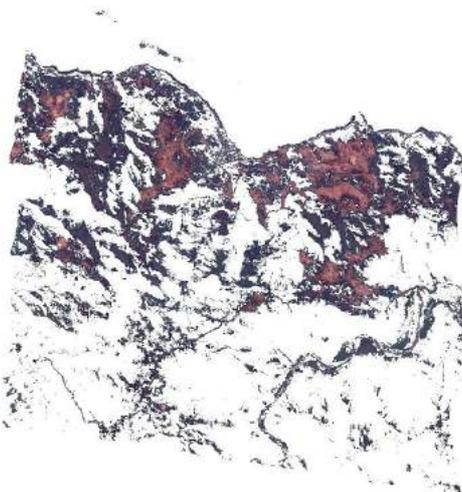


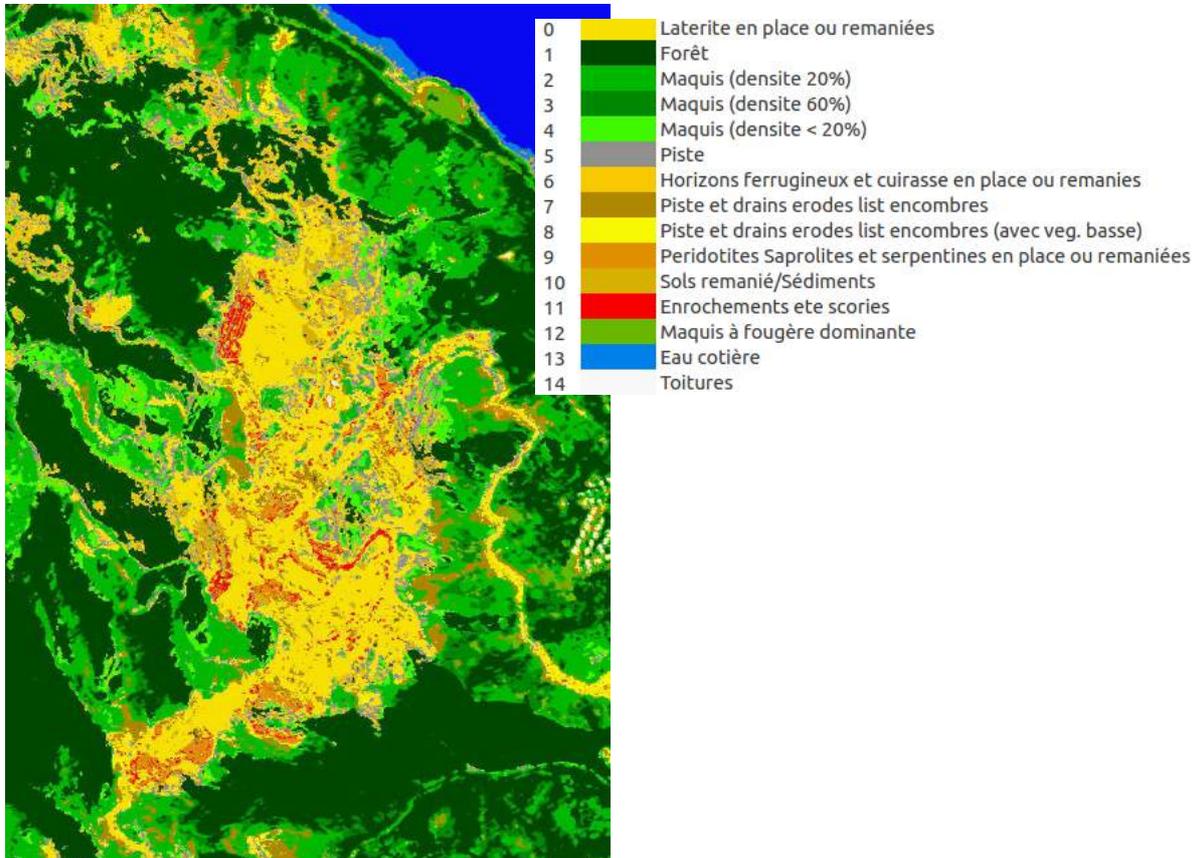
Figure 7: Sols nus et sols légèrement
végétalisés



Figure 8: Végétation dense et Eau

- Obtention de points remarquables auprès d'Isabelle Rouet et de Brice Sevin réalisé à partir de séance de travail sur fond de photographie aérienne.
- Classifications supervisées : deux méthodes utilisées (Neural Nectwork ou "NN" et SVM).
=> Meilleurs résultats pour la méthode SVM (f2_Clip_SVM2_SolsVeg_BV) avec un overall

Accuracy = (9186/9871) 93.0605% confirmé par un Kappa Coefficient = 0.9189



Carte d'occupation du sol sur la zone d'étude du BV "Hydromine"

ANNEXE 5 : Avenant à la convention du stagiaire Julia Levermann

AVENANT N° 1 A LA CONVENTION DE STAGE
ENTRE L'UNIVERSITE DE SOUTHAMPTON,
L'UNIVERSITE DE LA NOUVELLE-CALEDONIE
ET L'INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT (IRD) -
CONCERNANT LE STAGE DE Mlle JULIA LEVERMANN

AMENDMENT N° 1 TO THE TRAINING AGREEMENT
BETWEEN THE UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON,
THE UNIVERSITY OF NEW CALEDONIA AND THE IRD
REGARDING THE TRAINING COURSE OF JULIA LEVERMANN

Vu la convention de stage passée entre l'Université de Southampton, l'Université de la Nouvelle-Calédonie et l'IRD en date du 30/08/2012 ;

In view of the training agreement between the University of Southampton, the University of New Caledonia and the IRD signed on 30/08/2012;

IL EST CONVENU CE QUI SUIT :
THE PARTIES AGREE AND STATE AS FOLLOWS:

Article 1 - Durée

Le stage de Mlle Julia LEVERMANN est prolongé jusqu'au 28 février 2013.

Article 1 - Duration

The training course is extended until February 28, 2013.

Fait à Nouméa, le 18 janvier 2013
Noumea, 18 January 2013

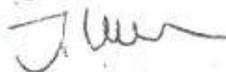
The University of Southampton

L'Université de la Nouvelle-Calédonie



L'Institut de Recherche
pour le Développement

La stagiaire



ANNEXE 6 : Rapport stagiaire J. Levermann (premières pages)

Assessing the impact of extreme
rainfall on land cover changes in New
Caledonia using remote sensing

by

Julia Elisabeth Levermann

Thesis submitted to the University of Southampton in partial
fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in
Geo-information Science and Earth Observation with a specialisation
in environmental modelling and management.

Project supervisors

Dr. Emma Tompkins
Dr. Gareth Roberts

Abstract

New Caledonia, a French overseas territory located in the southwest Pacific Ocean, faces major environmental concerns because of soil erosion. The island provides favourable conditions for erosion with its steep slopes, extreme rainfall events and vulnerable soils. The process is accelerated by anthropogenic-induced land cover changes, which cause serious degradations of the fragile environment. Susceptibility to erosion is particularly strong during the beginning of the wet season due to the frequent occurrence of tropical depressions and cyclones. These events generate intense precipitation, which often leads to flooding and the disruption of vegetation cover. Areas affected by resulting land cover changes, such as the reduction of vegetation cover, are especially prone to erosion. The main objective of this research was to assess changes in land cover after an extreme rainfall event using high resolution satellite imagery, and to model potential soil erodibility to better understand resulting impacts on the environment.

In this study, land cover situations of October 2011 and January 2012, framing a tropical depression, were mapped and temporal changes over this period were evaluated. Additionally, potential soil erodibility was modelled, and the results compared to the observed changes in land cover.

Land cover was successfully mapped and the overall accuracy of the image classification resulted in 92.25 % and 93.06 % for 2011 and 2012, respectively. All land cover classes were affected by change, while sparse vegetation experienced a reduction by 0.38 km², bare soil increased by 0.39 km². Areas where soils of high silt contents coincide with sparse vegetation cover and steep slopes are highly erodible.

Optical remote sensing is helpful to extract information on land cover, it poses however an inadequate approach for detecting changes in land cover across seasons due to the influence of external factors. Soil erodibility can successfully be modelled and provides preliminary understanding of which areas might potentially be affected by erosion. Due to uncertainties concerning the data sources, it is difficult to estimate how reliable these results are. Consequently, no final statement can be made whether soil erodibility contributed to land cover changes.

Key words: Land cover, change detection, remote sensing, soil erodibility, New Caledonia

Table of Contents

Abstract	v
Acknowledgements	vi
List of figures	ix
List of tables	xi
Abbreviations and acronyms	xii
1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Problem statement	3
1.3 Project: "Fonctionnement des petits bassins versants miniers"	5
1.4 Objectives and research questions	6
1.4.1 General objective	6
1.4.2 Specific objectives	6
1.4.3 Research questions	6
2 Literature review	9
2.1 Remote sensing	9
2.2 Land cover classification techniques	10
2.3 Change detection techniques	13
2.4 Soil erosion and erosion modelling	19
3 Study area and data description	27
3.1 Study area	27
3.2 Data description	31
3.2.1 Satellite imagery	31
3.2.2 Ancillary data	35
3.2.3 Software used	36
4 Methodology	37
4.1 Land cover classification	38
4.2 Land cover change detection	45
4.3 Modelling soil erodibility with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)	47
4.3.1. Definition and calculation of the input parameters	48
5 Results and analysis	57
5.1 Land cover classification	57
5.2 Land cover change detection	61
5.3. Soil erodibility modelling	69
6 Discussion	71
7 Conclusion & recommendations	77
References	81
Appendix A: RapidEye images	97
Appendix B: Aerial photograph	99
Appendix C: Soil and land cover classes	100
Appendix D: Rainfall measurements	102
Appendix E: Vegetation nomograph	103

Appendix F: Land cover statistics for 2011 and 2012.....	104
Appendix G: Confusion matrix	105
Appendix H: Merged land cover maps.....	107
Appendix I: Net changes between 2011 and 2012	108
Appendix J: Change detection matrix	109

ANNEXE 7 : Lettre de ré-allocation budgétaire

Nouméa le 16 novembre 2012

De la part de : Morgan Mangeas,
UMR ESPACE-DEV, IRD

Pour : Responsable du projet CNRT
« Fonctionnement des petits
bassins versants »

Objet : Demande de réallocation budgétaire

Dans le cadre du projet « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » l'objectif scientifique du partenaire Unité ESPACE-DEV concerne l'étude des potentialités de la télédétection passive sur les problématiques de morphologie et de dynamique fluviale en Nouvelle-Calédonie et a minima sur le site d'étude de Poro. L'utilisation de données spatialisées (imageries spatiales, aéroportées, MNT...) et les relevés *in situ* sont envisagés pour l'obtention de résultats dont les objectifs principaux sont les suivants :

1. Élaboration de carte d'occupation du sol et étude des changements des classes identifiées,
2. Création d'un indice d'apport sédimentaire potentiel.

En ce qui concerne le premier point, une série d'image satellite RapideEye encadrant un épisode pluvieux du site de Poro a été commandée et acquise. Une étudiante de master II (université de Southampton, England) est actuellement encadrée par l'équipe de l'UMR ESPACE-DEV pour réaliser les travaux. Les cartes d'occupation des sols basées sur les images satellitaires (2010, 2011 et 2012) sur la zone de Poro sont déjà réalisées. Une première mission de terrain est prévue du 26 novembre au 28 novembre afin de valider les résultats obtenus. Des méthodes de détection de changements seront ensuite appliquées afin de localiser les modifications majeures après l'épisode pluvieux du 24 décembre 2011. Son stage se terminera fin janvier 2013.

Il reste à réaliser la seconde partie des travaux qui consiste à estimer l'apport sédimentaire potentiel par classe d'occupation du sol (les étapes sont détaillées dans la réponse à l'appel à projet), information destinée à alimenter les modèles du CEMAGREF. Les données *in situ* seront exploitées en fonction de leur disponibilité (pluviométrie, sédiment, débits...).

Pour une optimisation des actions et dans le respect du planning proposé, nous proposons que cette dernière action soit réalisée dans le cadre d'un CDD ou une prestation à hauteur de **10 000 euros** dans la mesure où un post-doctorant possédant les compétences requises est immédiatement disponible.

Nous demandons ainsi, sans modification du montant de l'enveloppe globale dédiée à ces travaux,

que le budget consacré initialement à un **deuxième stagiaire (5 000 euros)** et aux **frais de fonctionnement (5 000 euros)** puisse être utilisé pour commander une prestation ou embaucher un CDD.

Plus précisément, les tâches qui devront être réalisées par le candidat destinées à compléter les objectifs identifiés sont les suivantes :

- Création de la couche accumulation des flux et des pentes relative aux sites identifiés dans le projet « fonctionnement des petits bassins versants »,
- Hiérarchisation des classes de l'occupation du sol,
- Modélisation de la couche indicateur d'apport

Merci d'avance d'explorer les possibilités de mise en place de cette réallocation budgétaire. Je me tiens à votre disposition pour tout besoin de clarification.

Bien cordialement,

Morgan Mangeas

ANNEXE 8 : Rapport de F. De Boissieu sur l'indice d'apport sédimentaire (sommaire)

Nouméa, le 03 mars 2013

Ref. devis : DEV_201212_GIE_PVB2_DEBOISSIEU

Elaboration d'un indice d'apport sédimentaire

Rapport final

Auteur : Florian de Boissieu

Table des matières

1	Introduction.....	2
2	Contexte	2
3	Etat de l'art.....	3
3.1	Facteur R.....	5
3.2	Facteur K	6
3.1	Facteur C.....	7
3.1	Facteur LS.....	9
4	Mise en œuvre de l'indice d'apport sédimentaire.....	10
4.1	Carte d'occupation du sol.....	11
4.1	Facteur K	12
4.1	Facteur C.....	16
4.2	Facteur LS.....	18
4.1	Facteur R.....	18
4.2	Carte d'érodabilité	19
4.3	Indice d'apport sédimentaire	20
5	Conclusion	23
6	Listes de fichiers	25
6.1	Liste des fichiers d'entrée.....	25
6.2	Liste des fichiers produits.....	25
6.3	Liste des cartes à afficher	28
7	Bibliographie.....	29
Annexe I	: Détail du calcul du facteur K	31
Annexe II	: Résumé des événements pluvieux 2009-2012	33
Annexe III	: Comparatif RUSLE entre les projets PBV et INC.....	35

CHAPITRE 4 : CONTRIBUTION DE L'UNIVERSITE DE LA REUNION

L'INFLUENCE DU CADRE HYDROGEOLOGIQUE SUR L'HYDRAULICITE DES PETITS BASSINS VERSANTS MINIERES



15/10/201
4

Rapport de fin d'étude

Bilan de l'action hydrogéologie

Join J.L, Verdier M., Jeanpert J.

L'influence du cadre hydrogéologique sur l'hydraulicité des petits bassins versants miniers

RAPPORT DE FIN D'ETUDE

Contenu

OBJECTIFS ET PROGRAMMATION	6
UN FACTEUR DETERMINANT DANS LES PROCESSUS DE CRUE ?.....	6
STRUCTURE HYDROGEOLOGIQUE ET RUISSELLEMENT SUR TIEBAGHI	7
1. Le manteau d'altération et son impact sur le ruissellement : Profil complet sous cuirasse	7
2. La réponse hydrologique sur cuirasse.....	8
2.1 L'estimation du bilan hydrologique.....	8
2.2 Analyse du suivi limnimétrique du creek « Pilote ».....	9
PROTOCOLE D'ACQUISITION DE DONNEES POUR L'ETABLISSEMENT DU CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA MINE DE PORO	11
1. Les études existantes	11
2. Le bassin versant de Poro, hydrologie de surface	11
2.1 Présentation du bassin versant.....	11
1.2 Les équipements et données existantes.....	13
ANALYSE DE LA STRUCTURE HYDROGEOLOGIQUE DU SITE DE PORO RESULTATS.	16
1. Cartographie du sol, du sous-sol et de l'infiltration	16
1.1 Réalisation d'une carte d'occupation du sol.....	16
1.2 Cartographie des conditions d'infiltration.....	18
2. Modèle géologique	24
2.1 Analyse des données de sondage	24
2.2 Réalisation de coupes géologiques	25
3. Analyse des données hydrogéologiques.....	27
3.1 Etude de la piézométrie.....	27
3.2 Réalisation d'un essai de perméabilité in situ	33
4. Fonctionnement hydrogéologique à l'échelle du bassin versant	37
4.1 Interprétation des mesures de niveau d'eau	37
4.2 Interprétation de l'infiltration.....	38
4.3 Carte piézométrique.....	39
CONCLUSION.....	40

Liste des Figures

Figure 1 Contexte hydrogéologique d'un profil d'altération et hydrogramme de crue de l'écoulement de subsurface généré par au niveau des sources (Join et al. 2005).....	7
Figure 2 : Evolution des hydrogrammes de Crues sur le Creek Pilote en fonction de l'état piézométrique de la nappe (piézo 1 et 2).....	9
Figure 3 : Impact de l'écoulement hypodermique sur une crue d'averse (Creek Pilote 2006).....	10
Figure 4 : Position des bassins versants et des seuils amont et aval.....	12
Figure 5 : Equipements et installation de gestions des eaux sur les bassins versant amont et aval de Poro	12
Figure 6:Seuil de mesure de débit Amont	13
Figure 7: Piézomètre ISA17 réalisé pour le projet.....	14
Figure 8 : Equipement d'un trou nu pour le suivi piézométrique piézomètre ISA03	15
Figure 9: Carte d'occupation du sol juillet 2014.....	17
Figure 10 : Cartographie des différentes classes de pente	19
Figure 11 : Unités hydrogéologiques et valeurs de conductivité hydraulique (Vale Inco Nouvelle-Calédonie, 2009)	20
Figure 12 : Cartographie de l'infiltration potentielle.....	23
Figure 13: Représentation des deux coupes géologiques.....	25
Figure 14 : Coupe Hydrogéologique A-B, bassin versant de Poro (hautes eaux)	25
Figure 15: Coupe hydrogéologique C-D, bassin versant de Poro (basses eaux).....	26
Figure 16: Chroniques pluies/niveaux piézométrique, Novembre 2013 à Juin 2014.....	28
Figure 17: Chroniques pluies/débits, Novembre 2013 à Juin 2014	29
Figure 18: Décrue du piézomètre ISA03, Janvier 2014	31
Figure 19: Décrue du piézomètre ISA03, Février 2014.....	31
Figure 20: Décrue du piézomètre ISA17, Février 2014.....	31
Figure 21: Schématisation des crues, corrélées à la géologie	32
Figure 22: Décrue d'ISA03 à la suite du slug test.....	34
Figure 23: Graphique d'Hvorslev, interprétation du slug test, ISA03.....	35
Figure 24: Décrue d'ISA17 à la suite du slug test.....	35
Figure 25: Graphique d'Hvorslev, interprétation du slug test, ISA17	36
Figure 26: Variations des mesures piézométriques manuelles.....	37
Figure 27: Représentation des valeurs d'infiltration du bassin versant	38
Figure 288: Carte piézométrique interpolée.....	39

OBJECTIFS ET PROGRAMMATION

« L'influence du cadre hydrogéologique sur l'hydraulicité des bassins versants miniers :»

Dans le cadre du projet CNRT « Fonctionnement des petits bassins miniers », un volet spécifique relatif au contexte hydrogéologique et aux relations eaux superficielles/eaux souterraines a été étudié par l'Université de La Réunion. Cette étude nécessitait un volet expérimental sur mine et plus spécifiquement le suivi simultané d'un seuil hydrologique et de la nappe d'accompagnement.

C'est à partir de Juin 2013 qu'avec le concours de la SLN, un piézomètre a pu être réalisé sur le site Minier de Poro à proximité des installations hydrologiques du projet. Le travail de suivi et d'interprétation des données a été réalisé pour l'essentiel dans le cadre du mémoire de fin d'étude de Mlle Mathilde Verdier de l'école Polytechnique de Montreal (Verdier 2014)

Ce rapport présente les résultats de cette étude, en 3 parties:

- Problématique générale : Le contexte hydrogéologique : est-il un facteur déterminant dans les processus de crue ?
- Protocole d'acquisition des données sur le site de Poro
- Suivi d'installation du site pilote de Poro.

UN FACTEUR DETERMINANT DANS LES PROCESSUS DE CRUE ?

Les processus d'érosion et de transport sur petits bassins versants miniers dépendent de la nature de la réponse hydrologique au cours d'une averse. L'averse, par son intensité et sa durée est le facteur principal générateur de crues torrentielles, favorisant l'érosion des versants et le transport de sédiments dans le lagon. En Nouvelle Calédonie, les dépressions et tempêtes tropicales font de l'aspect hydroclimatique une contrainte majeure pour la gestion et la protection des versants sur les massifs miniers.

En revanche l'impact d'une averse exceptionnelle peut être largement modulé selon les caractères du bassin versant. Ces paramètres influencent la valeur de la pluie nette ou la part d'une averse donnée participant à l'écoulement. Il peut s'agir de sa morphologie, de son couvert végétal, de sa topographie, de la nature du sol et du sous-sol, mais aussi du contexte hydrogéologique et en particulier, de la relation entre la nappe et l'écoulement superficiel.

L'homme, par ses aménagements, peut agir sur ces différents aspects. Il participe ainsi à réduire ou augmenter l'impact potentiel d'une averse donnée.

C'est donc dans ce domaine que l'analyse phénoménologique peut conduire à des solutions concrètes visant à diminuer les coefficients de ruissellement et/ou augmenter le temps de concentration.

En 2007, une première analyse hydrologique sur un site minier naturel comprenant un profil pédologique complet (cuirasse/latérite/saprolite/socle) a permis de mettre en évidence l'influence du de l'état piézométrique de l'hydrosystème sur l'hydraulicité de l'aquifère (Join et al. 2005).

Après un rappel succinct des principaux résultats obtenus sur le site de Tiébaghi, nous nous sommes attachés dans la présente étude à analyser le fonctionnement d'un hydrosystème fortement modifié par l'exploitation minière sur le site de Poro.

STRUCTURE HYDROGEOLOGIQUE ET RUISSELLEMENT SUR TIEBAGHI

1. Le manteau d'altération et son impact sur le ruissellement : Profil complet sous cuirasse

La transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application dans un premier temps d'une fonction de production visant à définir le hyétogramme de pluie nette (pluie participant au ruissellement) à partir de la pluie brute.

Très tôt, sur les massifs miniers, la distinction a été faite entre le contexte hydrologique des zones sous cuirasses et le contexte des milieux à profils tronqués. Espirat (Espirat 1967) décrit les ressources en eau des massifs de Nouvelle-Calédonie comme restreints aux circulations dans les fractures du socle. Toutefois, il note, dans la cuirasse, l'existence de chenaux à écoulements éphémères, de type « pseudo-karstique ». Plus tard, Trescases (Trescases 1975) distingue : une nappe sous cuirasse et une nappe de base de profil d'altération.

Sur le massif de Tiébaghi, dans un secteur naturel à profil pédologique complet, nous avons pu montrer que le contexte hydrogéologique imposait une contrainte sur le coefficient de ruissellement à deux niveaux :

1. Sur l'écoulement de surface, par contrôle de la capacité d'infiltration
2. Sur l'écoulement de subsurface par restitution plus ou moins rapide des eaux d'infiltration vers l'écoulement de surface.

Dans le cadre d'une séquence d'altération complète (cuirasse, latérites, saprolites, socle), la structure du manteau d'altération est à l'origine de deux processus distincts : une infiltration rapide dans la cuirasse et une restitution d'une partie de cette infiltration au niveau de sources temporaires situées à la base de la cuirasse (cf. figure 1)

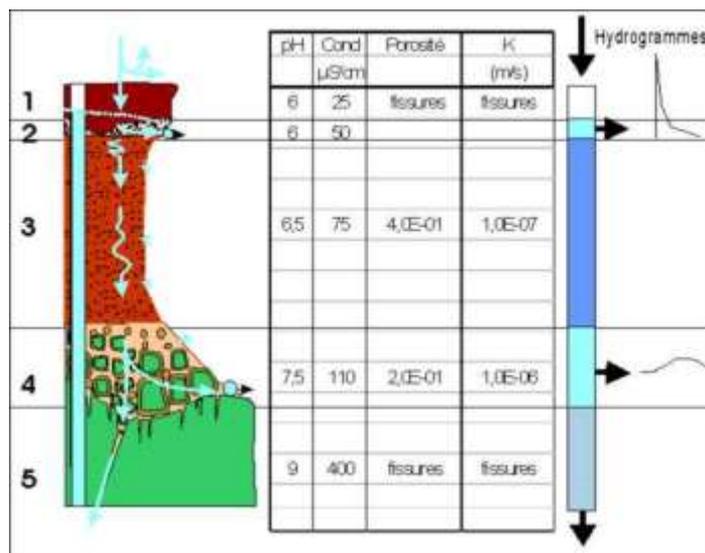


FIGURE 1 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE D'UN PROFIL D'ALTÉRATION ET HYDROGRAMME DE CRUE DE L'ÉCOULEMENT DE SUBSURFACE GÉNÉRÉ PAR AU NIVEAU DES SOURCES (JOIN ET AL. 2005).

L'importance de la fraction du débit total qui emprunte la voie subsuperficielle dépend essentiellement de la structure du manteau d'altération. La présence ou l'absence de cuirasse détermine alors l'importance de l'écoulement hypodermique qui peut être important.

2. La réponse hydrologique sur cuirasse.

L'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol est considéré comme pertinent pour expliquer la réponse hydrologique des bassins alors que la cuirasse constitue un facteur d'infiltration privilégiée, en revanche sa texture de roches fracturées, implique une saturation rapide favorable à l'augmentation du coefficient de ruissellement. Le facteur lié à la saturation du milieu constitue un aspect fondamental de l'évolution du coefficient de ruissellement pendant une averse. L'écoulement sur des surfaces saturées en eau, explique en partie la formation des crues torrentielles. Il existe ainsi deux modes principaux d'écoulement de surface qui peuvent se combiner:

- l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration,
- l'écoulement sur surfaces saturées.

Dubois et Join (Dubois & Join 2007) ont montré que le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant minier pouvait se distinguer selon la période d'étiage et de hautes eaux (caractérisé par le niveau moyen des piézographes).

Ainsi, sur un petit bassin versant d'une superficie inférieure à 1km², drainant la zone cuirassée du secteur Dôme (avant mise en exploitation), l'installation d'un seuil hydrologique et son suivi pendant une année hydrologique ont permis de déduire les principales caractéristiques hydrologiques à l'exutoire du système au toit du substratum de péridotite.

Bassin versant Km ²	Module		Débits caractéristiques en l/s					
	l/s	l/s/Km ²	DCmax	DCE	DC1	DC3	DC6	DC9
Creek Pilote: 0.804	3.74	4.65671 9344	50.17	1.6	8.4	4.1	2.26	1.3

2.1 L'estimation du bilan hydrologique

Le calcul d'un bilan théorique en 2005 a été effectué sur la base des données des stations météorologiques de Koumac et d'estimations de certains paramètres (Retour 2005).

Les mesures enregistrées dans le Creek «Pilote» entre 2006 et 2007 ont permis de préciser le bilan hydrique de ce bassin versant. L'utilisation simultanée des données piézométriques (volume infiltré) et des données de débit mesuré au seuil permettent d'évaluer la part du terme « infiltration » du bilan hydrologique. Cette estimation est établie sur une période de référence comprise entre octobre 2006 (piézométrie d'étiage) et mai 2007 (piézométrie haute). Deux modes d'estimation sont possibles :

1. $QW + R$ (Infiltration + Ruissellement) = $P - ETR$
(issu du bilan hydrologique établi par la méthode de Thorntwait)
2. $Qw + R = \text{Débit au seuil} + \text{stock nappe}$ (hauteur de la variation piézométrique * porosité)

Les résultats obtenus sur le Creek « Pilote » donnent un débit $Qw + R$ de 5 l/s dans l'estimation par le bilan de Thorntwait et un débit de 8 l/s par la mesure de la nappe et du Creek. Compte tenu de

l'imprécision des différents termes de ces deux méthodes (ETR, porosité de la nappe), nous pouvons considérer un terme moyen d'écoulement de l'ordre de 6, 5 l/s estimé à +/- 20% par les deux méthodes.

Ceci montre un bilan hydrologique équilibré par les seules sorties mesurées au niveau du seuil de jaugeage situé à l'altitude 300m.

On en déduit en première approximation des flux négligeables dans le massif rocheux. Ces résultats sont cohérents avec les observations de terrain ayant guidé l'installation des seuil : La rupture de pente située vers l'altitude 300m (altitude du seuil) a été interprétée comme la base du massif rocheux fissuré (facilement érodé), sous cette limite les fractures du socle deviennent faiblement conductrices ; Ce schéma hypothétique est concordant avec les données bibliographiques (Dewandel et al. 2005) suggérant une baisse drastique de la perméabilité dans les massifs rocheux au-delà d'une profondeur d'une centaine de mètres.

2.2 Analyse du suivi limnimétrique du creek « Pilote »

Dans le détail l'analyse simultanée du suivi limnimétrique du creek « Pilote » et des conditions piézométriques de la nappe illustre le fonctionnement du système hydrogéologique (Figure 2) conformément au modèle conceptuel proposé initialement (Join et al. 2005). Le rôle du niveau à chenaux et grenailles, très perméable, situé immédiatement sous cuirasse est prépondérant dans l'évolution du régime piézométrique ou hydrologique. Ainsi, la situation relative du toit de la nappe vis-à-vis du niveau nodulaire définit en particulier une forte variation du coefficient de ruissellement.

Nous avons ainsi défini deux types de fonctionnement : en étiage et en hautes eaux (caractérisé par le niveau moyen des piézographes).

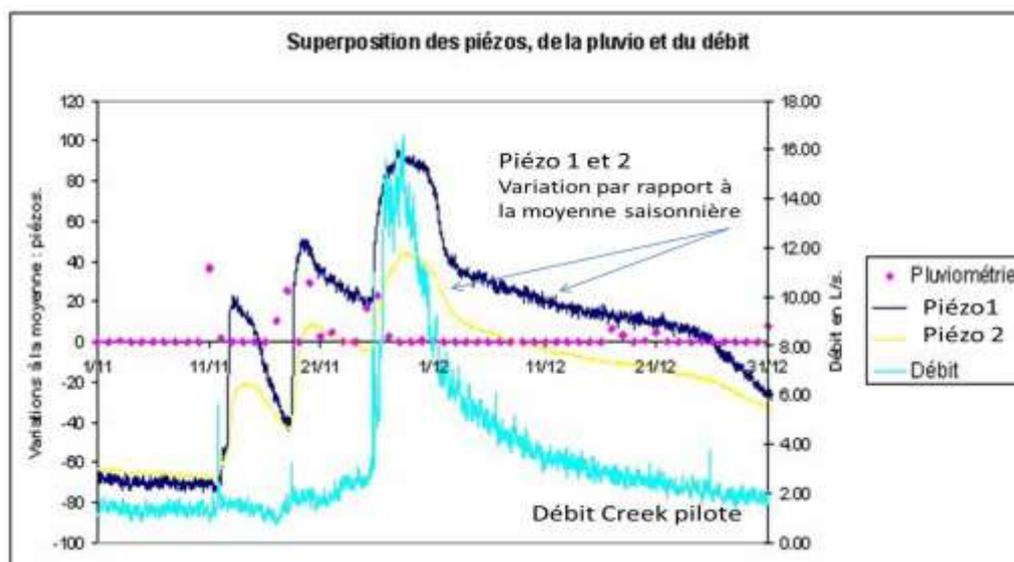


FIGURE 2 : EVOLUTION DES HYDROGRAMMES DE CRUES SUR LE CREEK PILOTE EN FONCTION DE L'ETAT PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE (PIEZO 1 ET 2)

En étiage, le niveau piézométrique se situe sous le niveau à grenailles. Une pluie inférieure à 20mm/jour n'a aucun effet ni sur la nappe ni sur le ruissellement, ce qui vient confirmer l'hypothèse d'une RFU (réserve facilement utilisable par les plantes) de l'ordre de 20mm (Retour 2005). Une pluie légèrement supérieure aura pour effet de recharger la nappe sans avoir d'influence sur le débit. Si le toit de la nappe n'atteint pas le niveau sous cuirasse, la nappe ne participe pas au ruissellement souterrain sous la cuirasse, il en résulte une très faible contribution au flux superficiel. En revanche, une pluie qui affecte une nappe déjà saturée aura pour effet de mettre en charge le niveau nodulaire. On observera alors

un ruissellement hypodermique dont la durée et l'intensité sera fonction de la pluie. Ce dernier peut perdurer plusieurs jours après une pluie. C'est d'ailleurs ce dernier critère qui le distingue d'un ruissellement superficiel qui n'a d'effet que quelques heures encore après la pluie.

Au cours d'un événement pluvieux, on a pu évaluer la part du ruissellement pur et celle d'un écoulement hypodermique proche de 25% de la lame d'eau précipitée. Il est évident que ces valeurs dépendent de la situation de la nappe avant l'évènement et de l'intensité de l'épisode pluvieux. Dans notre cas il s'agit de pluies moyennes, entre 20 et 40 mm d'eau tombée.

L'estimation est effectuée graphiquement par décomposition de l'hydrogramme de crue et soustraction au débit réel, de la part de l'hydrogramme due au ruissellement pur. (G.Réménieras, 1986). L'écoulement hypodermique correspond à la part du débit infiltré dans la partie superficielle de la nappe avant de rejoindre le creek.

Le ruissellement pur représente le volume d'eau se situant entre le pic réel de la crue et l'écoulement hypodermique. Le volume d'eau restant représente l'infiltration profonde.

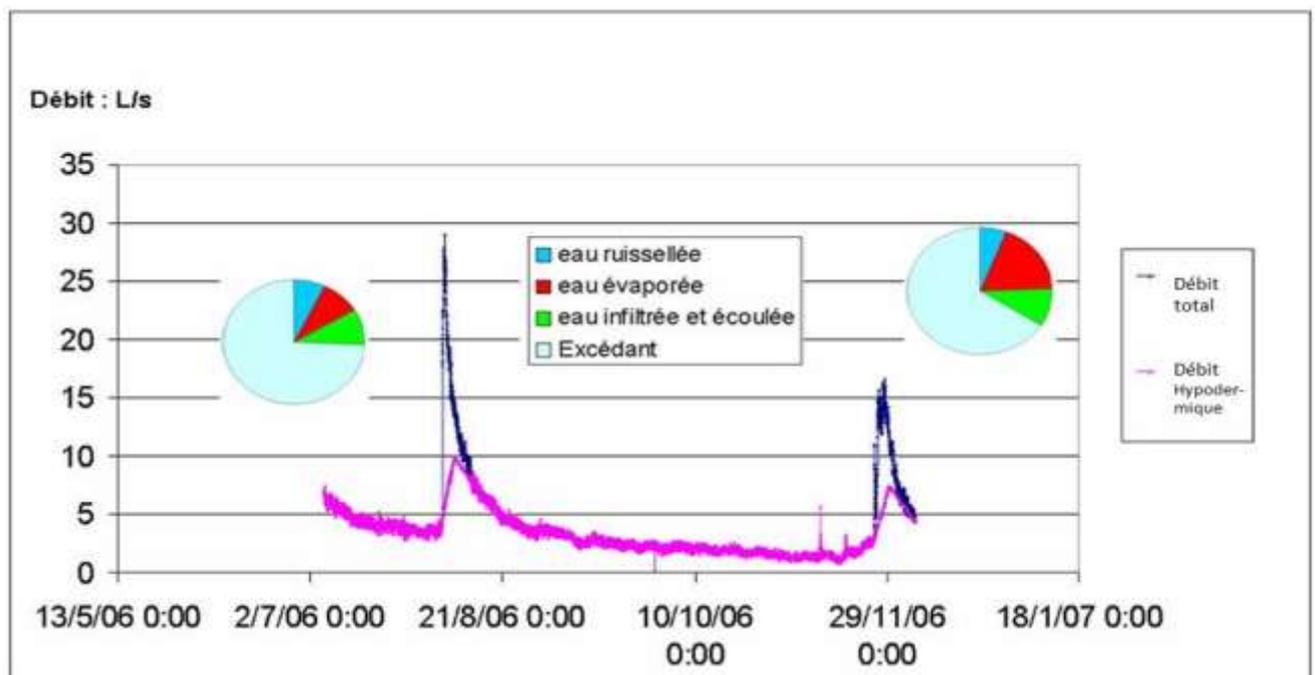


FIGURE 3 : IMPACT DE L'ÉCOULEMENT HYPODERMIQUE SUR UNE CRUE D'AVERSE (CREECK PILOTE 2006)

Pour une précipitation isolée de 87mm, le ruissellement et l'évaporation représente 22mm soit 25% . En retranchant l'eau ruisselée et évaporée, cela représente 65mm. La montée du niveau piézométrique est de 200mm. Avec une valeur de porosité de 3×10^{-1} , on retrouve une valeur de 60 mm d'eau réel. ($60 = 200 * 3 \times 10^{-1}$) Les résultats sont donc cohérents et traduisent la recharge importante de la nappe pour une telle averse.

Sur un massif saturé d'eau avec un profil d'altération complet, la variabilité temporelle du coefficient de ruissellement traduit bien le rôle prépondérant de la cuirasse et de l'horizon nodulaire sous-jacent pour expliquer la variabilité du fonctionnement hydrologique d'un petit bassin versant et la saturation des latérites.

Pour évaluer le devenir de ce fonctionnement sur un environnement désaturé et à profil tronqué, nous avons proposé dans le cadre de ce projet un suivi hydrogéologique sur le bassin versant expérimental de la mine de Poro.

PROTOCOLE D'ACQUISITION DE DONNEES POUR L'ETABLISSEMENT DU CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA MINE DE PORO

Sur le site minier de Poro, en parallèle à l'acquisition de données hydrologiques et sédimentologiques spécifiques à la définition des paramètres de l'écoulement et du transport à l'exutoire de ce bassin versant expérimental, nous avons proposé l'acquisition de données hydrogéologiques simultanées visant à la caractérisation de l'écoulement souterrain accompagnant les crues d'averse.

1. Les études existantes

Le site de Poro, où se trouve la mine Française et les bassins versants étudiés, est situé sur la côte est de la Grande Terre, dans la commune de Houailou et a été choisi comme site pilote depuis le projet Hydromine. Il est ainsi instrumenté avec des pluviomètres, des seuils équipés de préleveurs automatiques et de turbidimètres, ainsi que des piézomètres, dont les données sont recueillies depuis. Plusieurs experts et stagiaires ((Freydier 2013),(Guyonneau 2012)) ont travaillé sur les données qui concernent les eaux de surface et les quantités de matière en suspension, dans le but de créer un modèle conceptuel du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie. Cependant, peu d'études ont aujourd'hui été faites sur leur fonctionnement hydrogéologique et la relation entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

2. Le bassin versant de Poro, hydrologie de surface

2.1 Présentation du bassin versant

Le site de Poro est un petit bassin versant, à fort dénivelé et plongeant directement au dessus du lagon. Le bassin est en fait séparé en deux plus petits bassins, un amont et un aval, notés respectivement Poro amont et Poro aval sur la figure 4. Les deux bassins sont définis par leurs exutoires situés aux deux stations de mesure ou seuils installés. L'altitude du bassin varie entre 366 et 197 mètres au dessus du niveau de la mer. La végétation, bien que peu présente, est constituée de maquis minier. Les caractéristiques générales des bassins sont présentées dans le tableau 1.

<u>Caractéristique</u>	<u>Poro Amont</u>	<u>Poro Aval</u>
Surface (m²)	82 230	209 625
Périmètre (m)	1518	6341
Longueur (m)	612	3072
Largeur (m)	147	99
Altitude moyenne (m)	321	286
Pente moyenne (%)	32	36
Surface végétalisée (%)	0	20

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES GENERALES DES BASSINS VERSANTS DE PORO (MODIFIE DE GUYONNEAU (2012))



FIGURE 4 : POSITION DES BASSINS VERSANTS ET DES SEUILS AMONT ET AVAL



FIGURE 5 : EQUIPEMENTS ET INSTALLATION DE GESTIONS DES EAUX SUR LES BASSINS VERSANT AMONT ET AVAL DE PORO

Dans le cadre du projet, une étude complète a été réalisée sur le thème « Analyse comparative des réponses hydro-sédimentaires des petits bassins versants minier de Nouvelle-Calédonie »(Guyonneau 2012). La quantification des flux liquides et solides en provenance des bassins miniers, la réponse d'un bassin versant à un épisode pluvieux ainsi qu'une analyse d'impact de l'activité minière ont notamment été décrits.

Dans un premier temps, il apparaît important de prendre en compte le fonctionnement hydraulique du bassin et les différents axes de drainage, influencés par la topographie, l'exploitation minière et les ouvrages de gestion des eaux mis en place (fossés le long des pistes, décanteurs et buses). Ceci est résumé sur la Figure 5 ci-dessus.

Après l'hydrologie de surface, ce sont les chroniques et modélisations pluie-débits qui seront intéressantes à prendre en considération afin d'évaluer la part de ruissellement lors d'un épisode pluvieux, et donc en tirer la part d'infiltration qui sera à l'origine de la recharge de la nappe. A Poro, les chroniques de pluie et débit sont enregistrés en plusieurs points (figure 6).



FIGURE 6:SEUIL DE MESURE DE DEBIT AMONT

1.2 Les équipements et données existantes

Le suivi des précipitations et des eaux de surface sur chaque sous-bassin, Poro amont et Poro aval, sont installés un pluviomètre ainsi qu'un seuil de mesure du débit d'eau. Nous avons également pu obtenir les données de précipitations et de débits des eaux de ruissellement.

La pluviométrie du site de Poro a fait l'objet d'un suivi régulier depuis le projet Hydromine, et les données sont donc nombreuses, représentant un suivi en continu depuis 2009. Il en est de même pour les données hydrométriques, pour lesquels les débits dans deux seuils de mesure sont mesurés depuis 2009 toutes les cinq minutes. Parmi les résultats principaux des études réalisées sur ces données, le bassin versant de Poro est très fortement influencé par l'exploitation minière et les ouvrages anthropiques. Les coefficients d'écoulement sont compris entre 14 et 99% à l'amont, et entre 0 et 60% à l'aval, pour des temps de concentration de 20 minutes en moyenne.

Suivi piézométrique

Sur le bassin amont, deux forages ont été, en 2013, équipés de piézomètres, dans lesquels des sondes mesurent la pression d'eau en continu.



Parmi ces deux forages, un piézomètre a été réalisé dans le cadre du projet (figure 7), il est situé à quelques mètres du seuil amont. Ce forage réalisé par la SLN (nommé ISA17) a fait l'objet d'un équipement piézométrique spécifique financé à hauteur de 4K€ par le programme sur le volet financement Géosciences du PPME. Il est profond de 12,9 m (par rapport au tubage métallique), et la crépine de 6m capte le niveau des saprolites.

Pour compléter le suivi piézométrique sur la zone, la mesure piézométrique sur les trous de sondage s'est révélée être la seule possibilité pour accéder à cette information. Trois campagnes de terrain ont ainsi été réalisées au cours du stage de Mathilde Verdier (2014) pour réaliser le relevé des sondes et la mesure du niveau piézométrique sur les trous de sondage.

FIGURE 7: PIEZOMETRE ISA17 REALISE POUR LE PROJET

Un des trous de sondage a également été équipé d'un tubage en PVC, scellé avec une chambre à air remplie de bentonite (Figure 8). Par la suite, ISA03 fera référence à celui-ci.

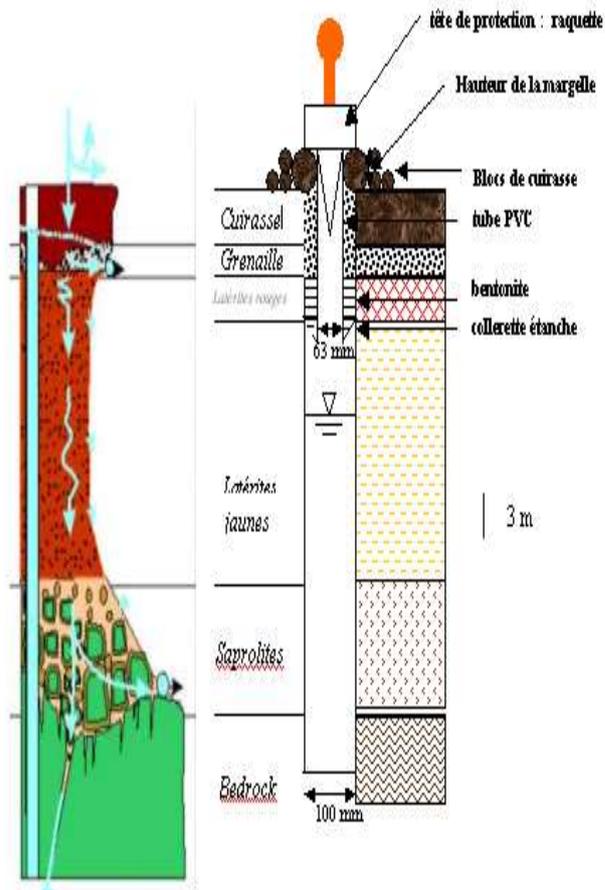


FIGURE 8 : EQUIPEMENT D'UN TROU NU POUR LE SUIVI PIEZOMETRIQUE PIEZOMETRE ISA03

Dans les ouvrages d'ISA17 et d'ISA03 ont été placées deux sondes qui permettent de suivre le battement du niveau piézométrique. Une sonde barométrique est également installée dans un des deux piézomètres pour mesurer la pression atmosphérique et permettre la baro-compensation.

Ces sondes de type Diver DataLogger sont autonomes et autorisent l'acquisition de données de pression et de température. Elles ont été programmées pour prendre une mesure toutes les 15 minutes, pour une capacité de stockage de 48 000 mesures soit environ une dizaine de mois. Les sondes ont relevées régulièrement à l'aide d'un lecteur optique infrarouge et du logiciel Diver-Office lié à la sonde. Les données sont ensuite baro-compensées, c'est-à-dire que la pression atmosphérique est soustraite pour avoir uniquement la pression d'eau. Elles sont aussi lissées, afin de réduire la quantité de données et ne prendre que les variations significatives de la pression, qui peuvent traduire une variation de la surface libre de la nappe phréatique. Les données brutes correspondent donc à une profondeur d'eau en fonction du temps pour une période donnée.

ANALYSE DE LA STRUCTURE HYDROGEOLOGIQUE DU SITE DE PORO RESULTATS.

1. Cartographie du sol, du sous-sol et de l'infiltration

1.1 Réalisation d'une carte d'occupation du sol

Pour l'étude de la réponse du bassin versant aux épisodes pluvieux, en termes de ruissellement et d'infiltration, il est rapidement apparu pertinent de connaître assez précisément l'occupation du sol, sachant que cette information est susceptible d'évoluer dans le temps compte tenu des activités en continu sur le site. La carte établie regroupe le type formation pédologique ou géologique, la végétation mais également tout ce qui concerne les différents ouvrages anthropiques, comme les décanteurs, les fossés de récupération des eaux, les pistes de circulation des véhicules et les plates-formes de stockage des minerais et des stériles qui couvrent la surface du bassin versant.

A partir des ortho-photos du site, une première estimation de l'occupation du sol a ainsi été réalisée sous ArcGIS. Une mission sur le terrain de deux jours a permis de valider la cartographie établie par photo interprétation.

Sur le site de Poro, beaucoup de cuirasse et latérites sus-jacentes ont été retirées et la saprolite affleure à plusieurs endroits. Néanmoins, des latérites sont toujours présentes au niveau des zones jamais exploitées et une cuirasse démantelée existe encore aux rares endroits où il y a encore de la végétation. Les pistes de circulation des véhicules sont faites de matériel tout venant, souvent composé de graviers ou blocs et latérites, compacté sur de nombreux cycles. Les fossés de gestion des eaux sont parfois creusés dans le roc, sinon ils sont remplis de gros blocs de pierre, afin que l'eau s'écoule correctement jusqu'aux différents décanteurs. Ces derniers ont pour rôle la collecte des eaux de ruissellement dans un bassin, pour permettre la décantation d'un maximum de particules en suspension avant de déborder dans un fossé qui rejoindra un autre décanteur pour une seconde décantation et ainsi de suite. Ils sont ainsi répartis en cascade le long du chemin d'écoulement de l'eau, jusqu'à l'exutoire, et remplis de matériel très fin. En ce qui concerne les plates-formes de stockage présentes sur ce bassin versant, elles servent essentiellement à l'entreposage de latérites. Ainsi, la surface est recouverte de matériel latéritique compacté par les camions, et de plusieurs tas de stockage qui changent régulièrement de taille et d'emplacement.

On distingue finalement 7 catégories de couverture de sol (Figure 9). Tout d'abord, trois catégories sont des formations naturelles, plus ou moins impactées par l'exploitation minière en fonction des endroits, et correspondent à la géologie ; la cuirasse (démantelée ou végétalisée), la latérite et le bedrock fracturé. Ensuite, les quatre autres catégories sont totalement anthropiques et liées à l'exploitation du nickel. Il s'agit des pistes de circulation des véhicules miniers, des plateformes de stockage de minerai et de stérile, et des ouvrages de gestion des eaux, canaux et bassins de sédimentation.

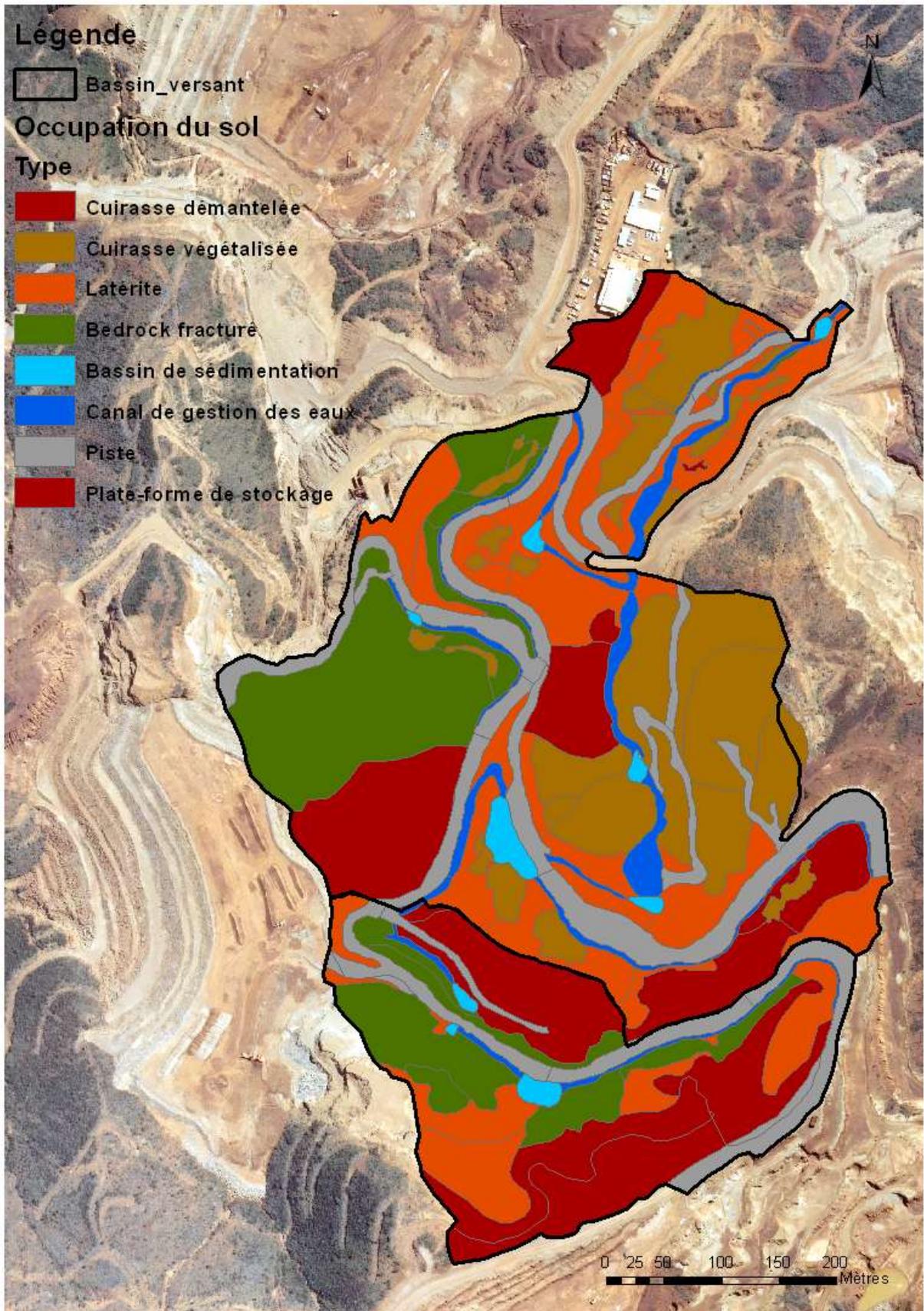


FIGURE 9: CARTE D'OCCUPATION DU SOL JUILLET 2014

1.2 Cartographie des conditions d'infiltration

Toujours dans le but de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin versant et appréhender les échanges eaux superficielles/ eau souterraine, un travail de cartographie de l'infiltration potentielle a été réalisé. Les zones favorisant la recharge de la nappe et les zones dont le ruissellement va au contraire dominer sont définies de manière qualitative. La méthodologie utilisée s'inspire du modèle PaPRIKa utilisé en cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques, en fonction de plusieurs critères (Dörfliger and Plagnes, 2009).

De façon plus détaillée, nous cherchons à estimer l'infiltration potentielle, versus le ruissellement, en fonction de deux facteurs principaux, à savoir la pente du terrain et l'occupation du sol. D'autres paramètres comme l'état de saturation du sol interviennent pour la quantification de l'infiltration ; il n'est ici pas considéré pour ne travailler que sur la cartographie des conditions d'infiltration plutôt que sur la quantification. A partir de la cartographie de chaque paramètre, il faut définir des classes pour chaque facteur, les combiner et créer une carte de la capacité d'infiltration elle-même définie par des classes. Par exemple une pente maximale correspondra à une infiltration minimale, un sol recouvert de cuirasse favorisera une infiltration maximale et ainsi de suite.

1.2.1 CARTOGRAPHIE DES PENTES

En partant d'un fichier géoréférencé représentant les lignes topographiques, il a été possible de réaliser une carte des pentes avec le logiciel ArcGIS. Premièrement, les isolignes ont été interpolées de façon à produire un TIN puis un raster, qui représente une image de l'élévation sur toute la surface du bassin versant. Par la suite, le module Surface des outils Spatial Analyst du logiciel possède un outil Pente, qui utilise chaque cellule d'un raster et en calcule la variation de l'élévation z. En sortie, nous obtenons un autre raster, représentant les pentes. Sur notre bassin versant, celles-ci varient de 0 à 78°, en lien avec la méthode Paprika et dans l'onglet Classes du logiciel, nous les classons de la manière suivante :

<u>Critère de pente</u>	<u>Classe</u>	<u>Infiltration</u>
> 50%	1	Minimale
15 – 50%	2	Moyennement faible
5 – 15%	3	Moyennement forte
0 – 5%	4	Maximale

TABLEAU : CRITERES DE PENTE ET CLASSES UTILISEES POUR LA CARTOGRAPHIE DES CONDITIONS D'INFILTRATION

Ainsi, chaque classe de valeur de pente est attribuée à un indice variant de 1 à 4 (Tableau 2), correspondant à une infiltration potentielle basée sur ce critère. La carte des classes du paramètre pente est présentée ci-dessous (Figure 10).

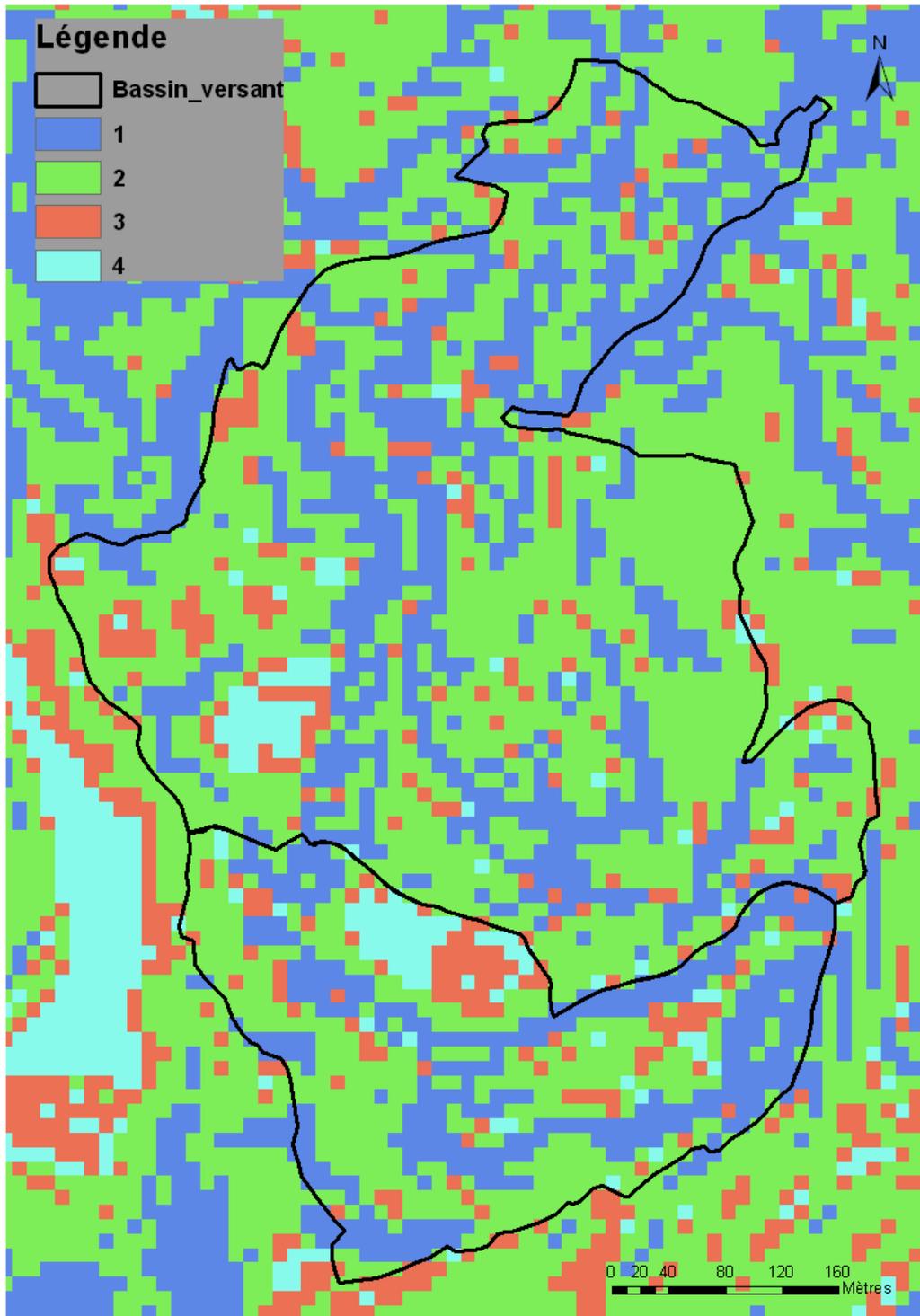


FIGURE 10 : CARTOGRAPHIE DES DIFFERENTES CLASSES DE PENTE

1.2.2 CARTOGRAPHIE DE L'INFILTRABILITE DU SOL

Dans un deuxième temps, dans la même idée que le classement des différentes pentes, nous avons classé les différents types d'occupation du sol. La lithologie du sol, son caractère naturel ou

anthropique, compacté ou non sont des informations prises en compte pour classer les zones ; ceci revient à classer les différents sols en fonction de leur perméabilité, facteur essentiel contrôlant la réponse de la surface à un apport d'eau.

Afin de définir les classes, les données de perméabilité existantes sur les massifs de péridotites et leur manteau d'altération ont été utilisées. Une étude réalisée sur le massif du Sud, dans la zone de Goro, également situé sur un massif de péridotite subissant une importante altération supergène présente les résultats des essais de perméabilité (ValeInco 2009); les valeurs de conductivité hydrauliques sont les suivantes (Figure 11).

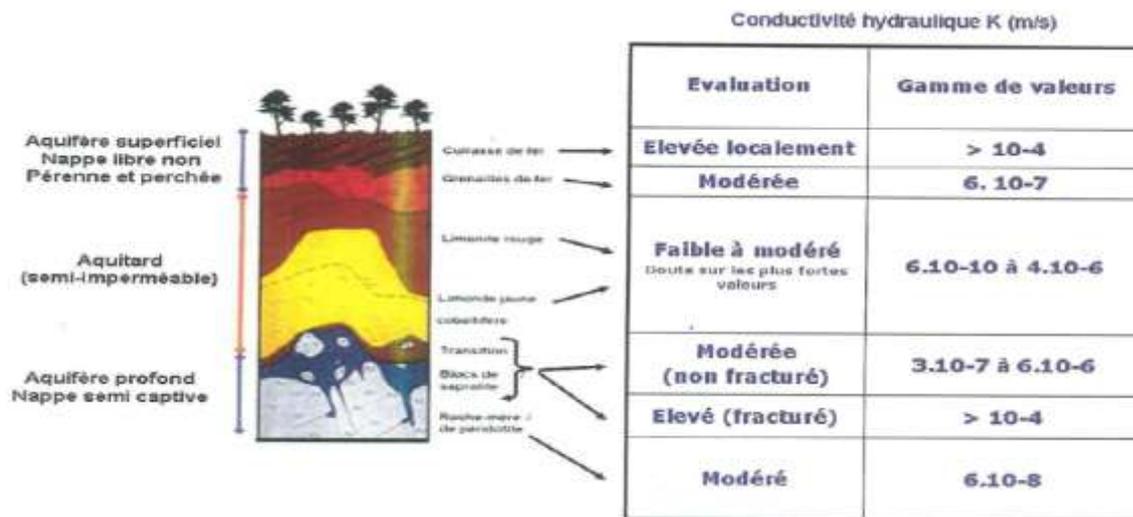


FIGURE 11 : UNITES HYDROGEOLOGIQUES ET VALEURS DE CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE (VALE INCO NOUVELLE-CALÉDONIE, 2009)

Ainsi, la cuirasse et le bedrock fortement fracturé sont les lithologies les plus perméables, suivi des latérites (limonites rouges et jaunes). Les surfaces les plus perméables, la cuirasse démantelée sans végétation et le bedrock très fracturé en surface, sont celles qui permettront une infiltration maximale de l'eau météorique, et la classe qui leur sera attribuée est égale à 4.

Les plateformes de stockage de minerai et les pistes ont été regroupées, car ce sont des installations anthropiques, fortement compactées sur plusieurs cycles, ce qui en réduit la perméabilité de façon importante. Les pistes sont notamment dimensionnées pour favoriser un ruissellement maximal. C'est également le cas pour les canaux de gestion de eaux, qui sont enrochés et colmatés par la déposition de matériel fin, résultant du transport en suspension. Ceux-ci ont été regroupés avec les latérites, qui ont une perméabilité de l'ordre de 10⁻⁸ m/s et sont donc assez peu perméables.

L'indice 3 a lui été attribué aux bassins de décantation, qui est certes rempli d'un matériel fin, mais pour lequel le temps de stockage important de l'eau à l'intérieur nous a encouragé à le classer comme surface d'infiltration moyennement forte via un drainage vertical. Cette hypothèse sera considérée lors de la mesure des niveaux piézométriques sur les trous de sondage. De plus, la classe attribuée à la cuirasse qui favorise beaucoup l'infiltration, est diminuée aux endroits où demeure encore de la végétation, compte tenu de l'évapotranspiration potentielle mais aussi du stockage dans la zone racinaire.

Ainsi, à partir de la légende de la carte d'occupation du sol décrite précédemment, quatre classes ont été définies, avec chacune un indice d'infiltrabilité (Tableau 3).

<u>Type de sol</u>	<u>Classe</u>	<u>Infiltrabilité</u>
Plateformes de stockage et Pistes	1	Minimale
Canaux de gestion des eaux et Latérites	2	Moyennement faible
Bassin de décantation et Cuirasse végétalisée	3	Moyennement forte
Cuirasse démantelée et Bedrock fracturé	4	Maximale

TABLEAU 2 : CRITERES DE PENTE ET CLASSES UTILISEES POUR LA CARTOGRAPHIE DES CONDITIONS D'INFILTRATION

Ceci aboutit à la cartographie présentée en Figure 10.

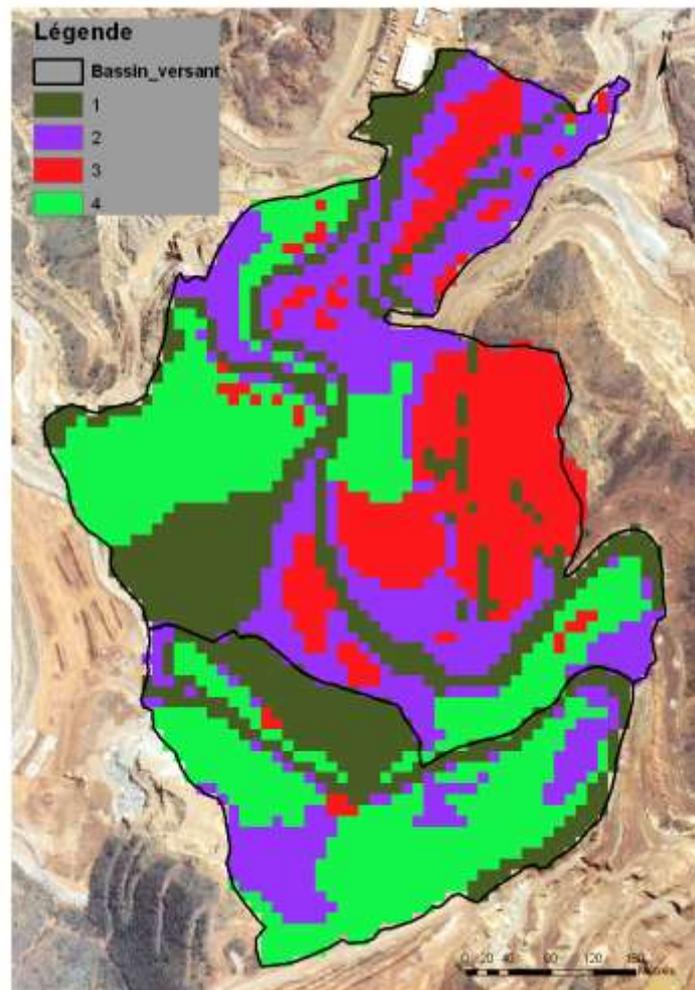


FIGURE 10 : CARTOGRAPHIE DES DIFFERENTES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL

1.2.3 CARTOGRAPHIE DES CONDITIONS D'INFILTRATION

Ainsi, c'est à partir de ces critères que sera estimée l'infiltration potentielle sur toute la surface du bassin versant. Préalablement, il a fallu choisir le « poids » de chaque critère, à savoir la pente et la perméabilité du sol, dans le calcul de l'infiltration. Plusieurs observations nous ont fait attribuer 40% du contrôle de l'infiltration à la pente, et 60% au type de sol en place. Tout d'abord par comparaison de l'infiltration entre une cuirasse pentée et une latérite plane, mais aussi le fait que sur Goro toujours, il a été observé que les crêtes constituent les principales zones de recharge aux dépens des bassins et plateaux couvertes d'une importante épaisseur de matériaux fins latéritiques.

Toujours dans le logiciel ArcGIS, à partir de nos deux rasters, les outils d'analyse 3D proposent une calculatrice, permettant de faire des additions, multiplications et autres entre deux champs de données se trouvant dans une couche. Ainsi, le raster pente est multiplié par 0.4, le raster occupation du sol par 0.6, et les deux sont ensuite additionnés.

Le raster représentant les résultats est présenté ci-dessous (Figure 12) où 4 représente l'infiltration maximale et 1 l'infiltration minimale.

Cette carte d'occupation du sol a permis une meilleure approche du terrain en termes de type de matériel récepteur aux précipitations, et notamment de perméabilité en lien avec la granulométrie et le degré de compaction du sol. Nous avons pu estimer les différentes zones qui seraient plus propices à l'infiltration et à une recharge des nappes, au dépend des zones où le ruissellement sera majoritaire.

Ainsi, il apparaît évident que la petite vallée encaissée qui débute en haut du bassin aval et conduit l'eau jusqu'à l'exutoire est une zone où il y a possibilité d'infiltration. En effet, la végétation, la présence de cuirasse démantelée et de crevasses d'érosion, le tout couplé à un canal d'écoulement relativement large au creux de celle-ci, en fait certainement la zone la plus infiltrée du bassin. Au niveau des pistes et des plates-formes de stockage, la compaction élevée du sol ainsi que la dérive forcée de l'eau de ruissellement par les nombreux fossés ne favorise pas l'infiltration. En revanche, aux endroits où affleure la saprolite fracturée, le ruissellement doit être diminué par de l'infiltration, contrairement aux endroits où c'est la latérite qui affleure. Dans les bassins de décantation, le temps de résidence élevé de l'eau conduit nécessairement à une certaine infiltration, bien que limitée par la faible perméabilité des matériaux fins déposés.

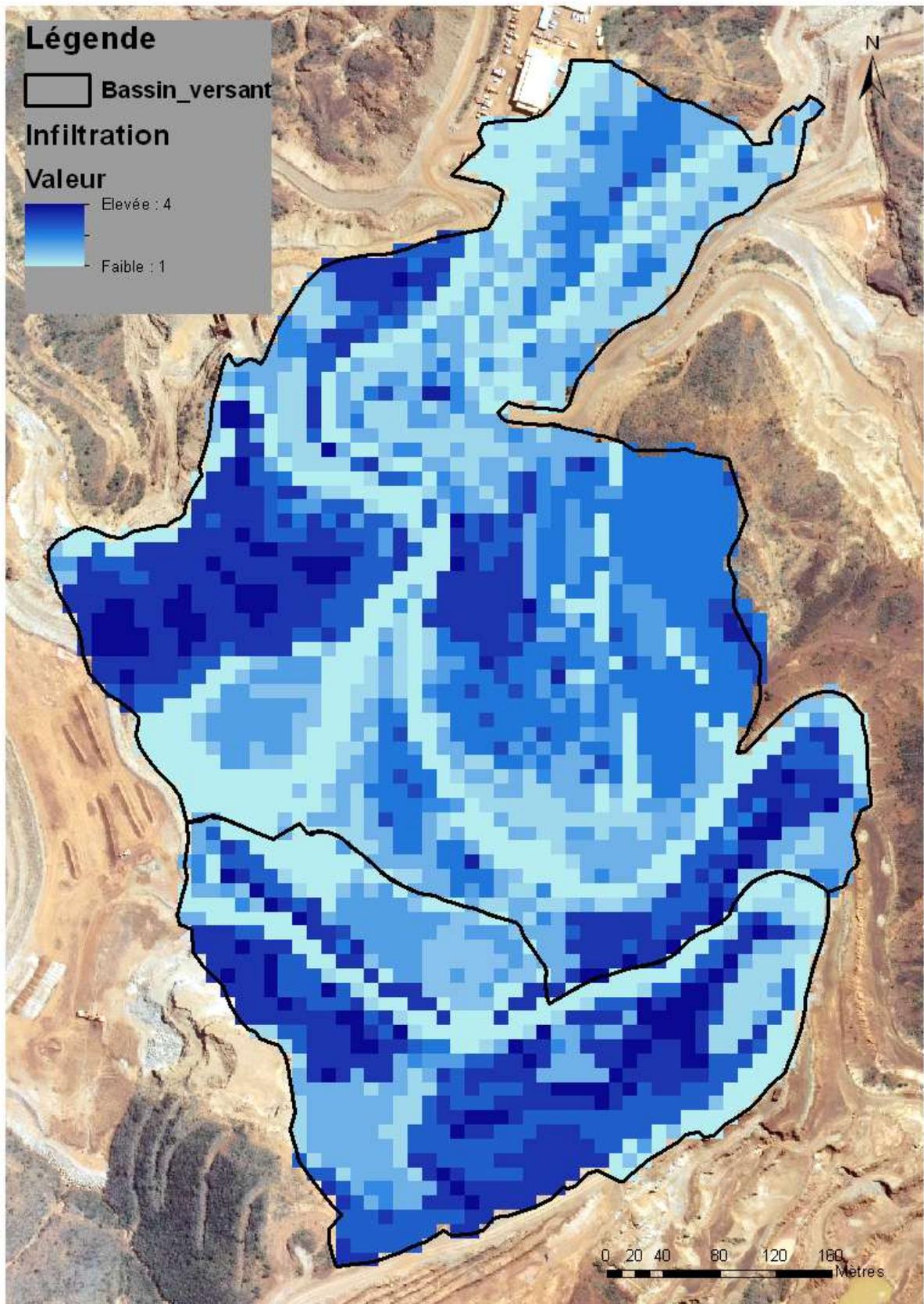
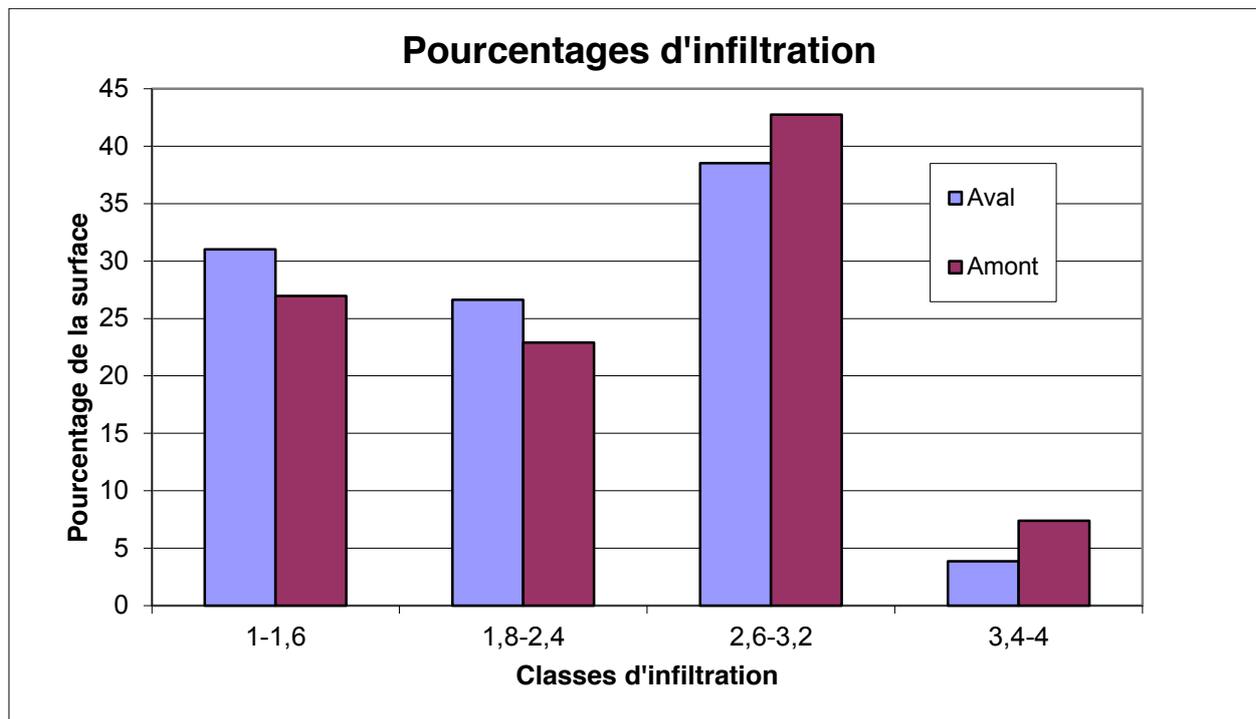


FIGURE 12 : CARTOGRAPHIE DE L'INFILTRATION POTENTIELLE



POURCENTAGE DES DIFFERENTES CLASSES D'INFILTRATION

2. Modèle géologique

2.1 Analyse des données de sondage

Suite à la réalisation de la carte d'occupation du sol, les données des nombreux forages réalisés sur le site fournissent le détail des structures géologiques du secteur. Pour cela, les données brutes qui ont pu être récupérées auprès de la SLN sont celles de tous les forages réalisés sur la mine de Poro, depuis les années 70 à aujourd'hui, représentant une banque de données de près de 800 forages. Ceux-ci sont loggés avec un point tous les mètres, en suivant un code précis décrivant les lithologies et les degrés d'altération de chaque banc du forage. Lorsque les tracés de coupe choisis interceptent des forages, ces derniers ont pu être directement utilisés.

2.2 Réalisation de coupes géologiques

Dans un premier temps, la réalisation de coupes géologiques à des endroits pertinents du bassin versant nous a semblé intéressant pour se rendre compte des épaisseurs des différentes couches géologiques, leur contrôle structural et évidemment le positionnement de la nappe phréatique dans le profil. Celles-ci sont représentées sur la figure 13 (AB et CD).

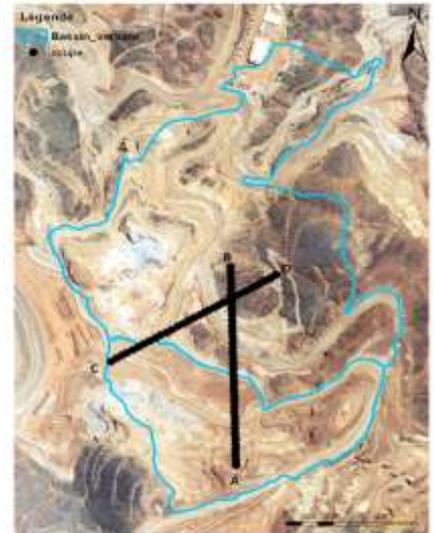


FIGURE 13: REPRESENTATION DES DEUX COUPES GEOLOGIQUES

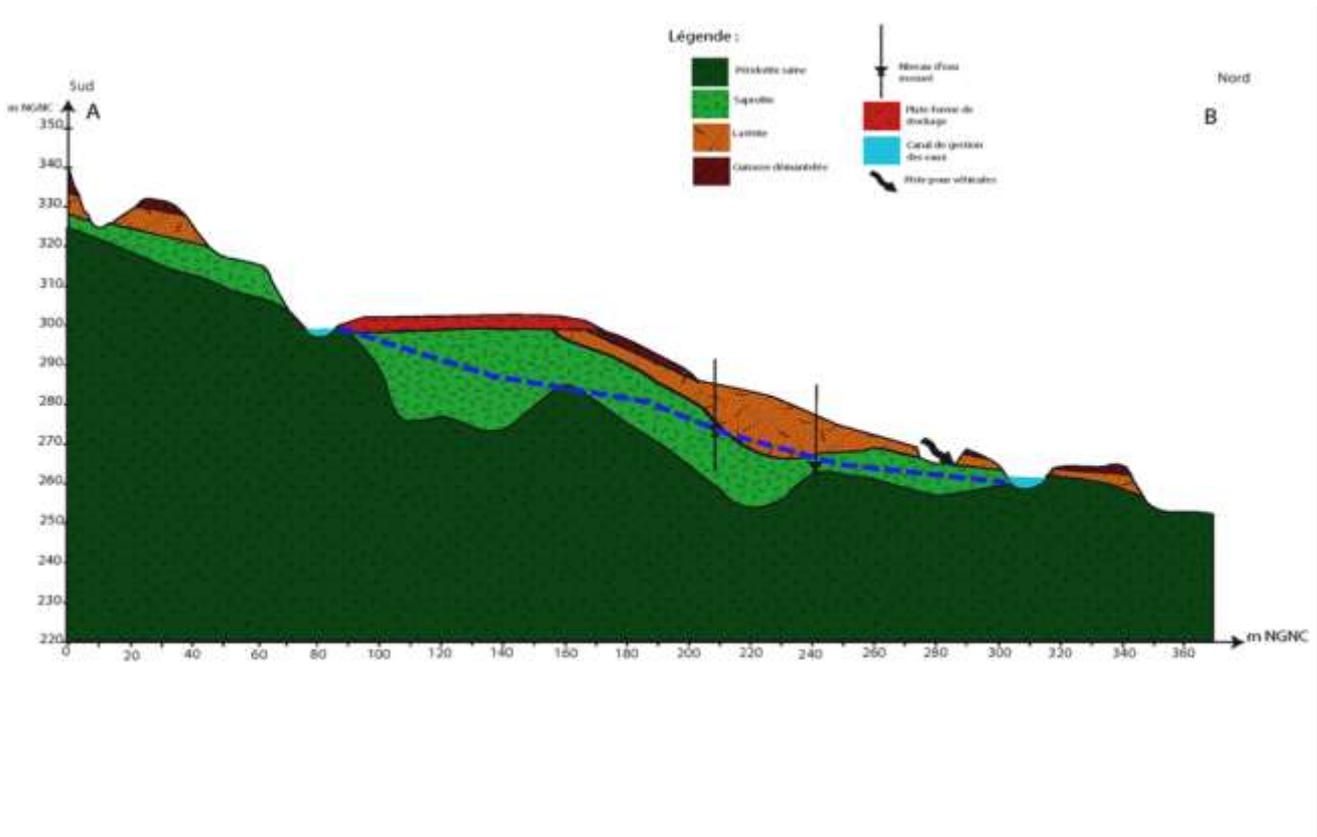


FIGURE 14 : COUPE HYDROGEOLOGIQUE A-B, BASSIN VERSANT DE PORO (HAUTES EAUX)

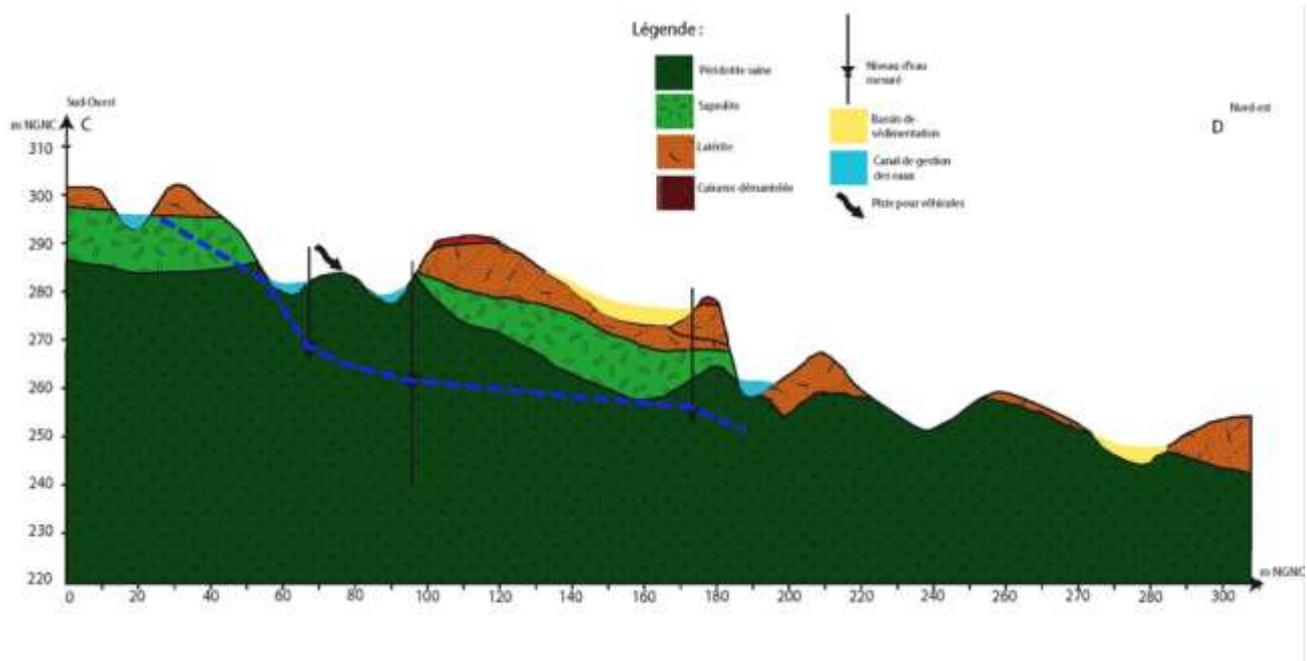


FIGURE 15: COUPE HYDROGEOLOGIQUE C-D, BASSIN VERSANT DE PORO (BASSES EAUX)

Les coupes ci-dessus (Figures 14 et 15), traduisent d'abord la variabilité de l'altération sur la péridotite saine, qui crée un profil aux structures et épaisseurs irrégulières. De plus, la représentation des niveaux d'eau mesurés dans les trous de sondage présent le long des coupes permet de voir que la nappe sature bien le bedrock, et se trouve dans l'horizon saprolitique dans les périodes de hauts niveaux, sinon dans la roche saine. En effet, les mesures représentées sur la coupe A-B sont celles de novembre 2013, période durant laquelle les précipitations ont été importantes, et celles représentées sur la coupe C-D sont celles de mai 2014, après plusieurs mois sans précipitations importantes. La différence est visible et nous pouvons conclure que la nappe fluctue bien au dessus et au dessous de l'interface avec le profil d'altération saprolitique.

3. Analyse des données hydrogéologiques

3.1 Etude de la piézométrie

Plusieurs missions de terrain ont permis l'acquisition de données manuelles sur les trous nus de sondage, grâce à une sonde lumineuse à niveau d'eau. Il existe sur site plusieurs trous de sondage réalisés par la SLN pour des fins de loggage et de caractérisation du gisement. Lorsque ces trous sont toujours accessibles, il est facilement possible de réaliser une mesure de niveau d'eau à l'intérieur. Cinq campagnes de relevés ont été faites depuis juillet 2013. Sur le bassin versant étudié, il y a 11 trous de sondage regroupés près du seuil hydrologique et identifiés ISA sur la Figure 15. D'autres trous existent, notés ANI, mais sont situés juste après la limite définie du bassin versant et en théorie n'intercepte donc pas les eaux que nous étudions. Ils ont cependant été relevés à titre de comparaison et de vérification des résultats obtenus.



FIGURE 15 : LOCALISATION DES TROUS DE MESURE D'EAU

Les mesures de niveau d'eau sur les différents trous de sondage sont présentées en Annexe1.

3.1.1 VARIATIONS TEMPORELLES DE LA PIEZOMETRIE

Les données de précipitations et les données des sondes installées dans les piézomètres ont été comparées afin de caractériser la réponse du niveau piézométrique aux événements pluvieux ainsi que les débits mesurés aux seuils. Les chroniques quotidiennes sont superposées sur un graphique (Figures 16 et 17) afin d'avoir une première idée de la réponse de la nappe, et surtout à partir de quelle importance d'événement le niveau d'eau varie.

Ensuite, lors des pluies importantes pour lesquelles nous observons une réponse de la nappe, le pas de temps est resserré pour tenter de travailler à l'échelle horaire sur un événement précis.

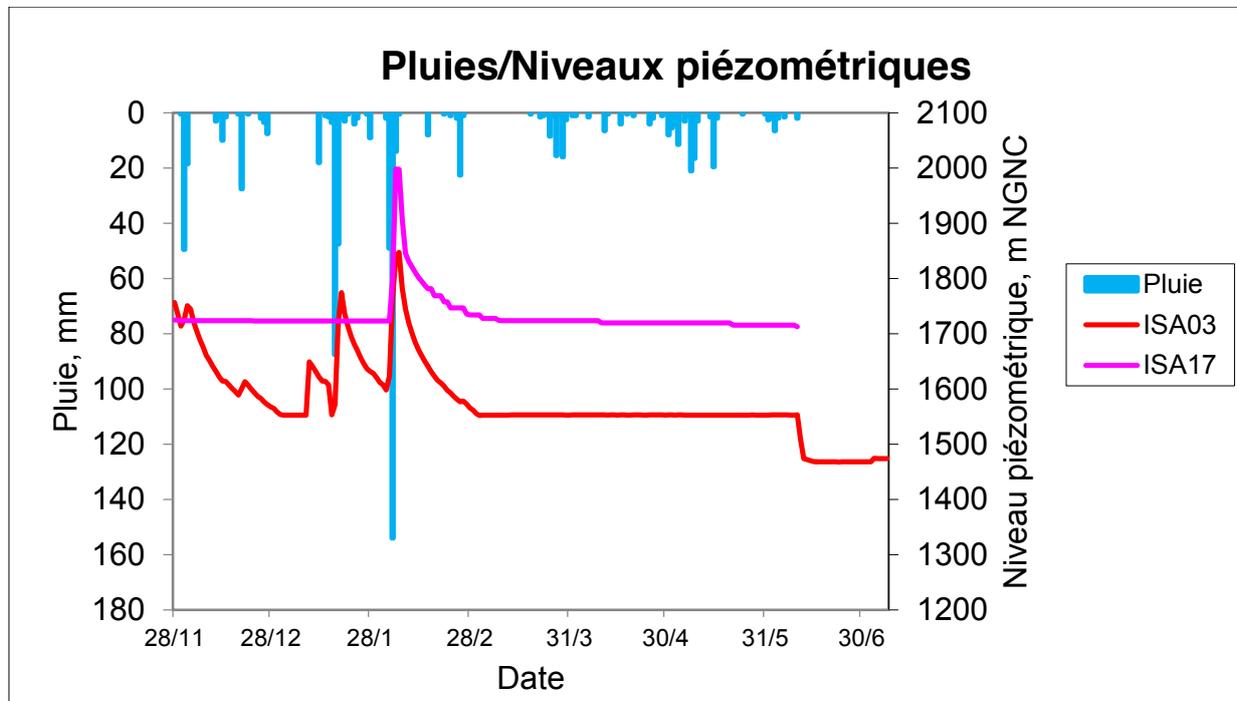


FIGURE 16: CHRONIQUES PLUIES/NIVEAUX PIEZOMETRIQUE, NOVEMBRE 2013 A JUIN 2014

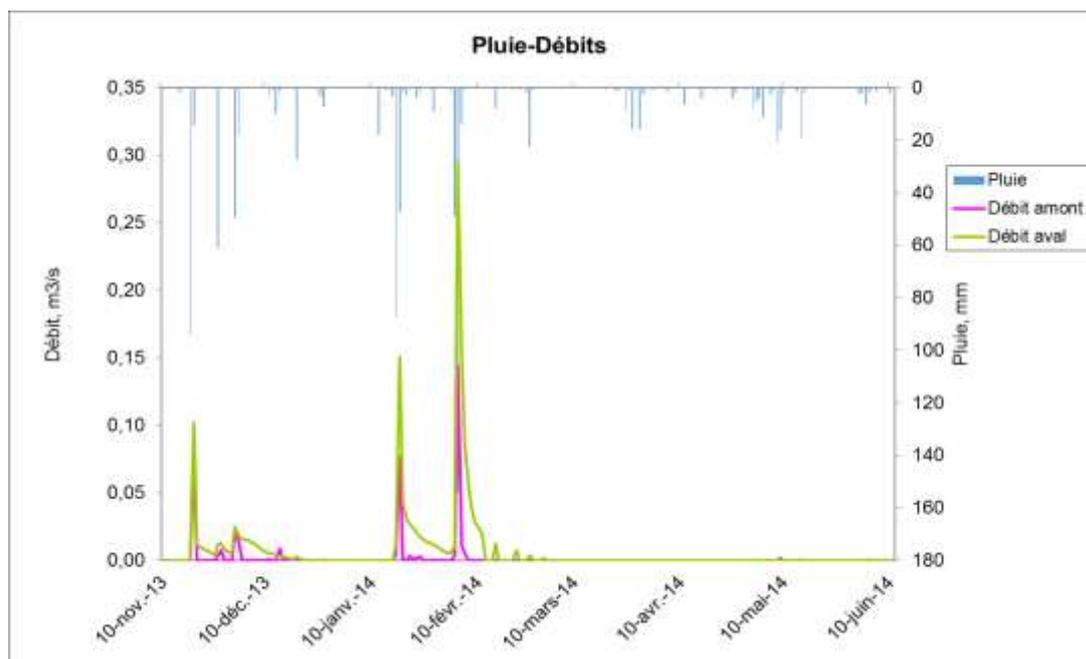


Figure 17: Chroniques pluies/débits, Novembre 2013 à Juin 2014

Les figures 16 et 17 ci-dessus représentent les variations temporelles des précipitations, niveaux piézométriques et débits des seuils amont et aval. Nous pouvons ainsi voir les concordances des événements, différentes pour les débits et les niveaux d'eau.

Le niveau d'eau mesuré dans le piézomètre ISA17 n'a réagi à aucun événement pluvieux excepté au mois de février 2014. Ceci peut être relié à un défaut de la sonde, à un défaut de conception de l'ouvrage. ISA17 été installé depuis novembre 2013, alors qu'ISA03 a été installé seulement en novembre. De plus, à partir de mars 2014, les sondes ne mesurent plus aucun événement et sont donc certainement hors d'eau. A partir des données disponibles, la courbe ISA03 traduit clairement la réponse du niveau piézométrique à des événements pluvieux importants à deux reprises, et une seule reprise sur ISA17 (figure 16).

Lors d'une pluie horaire supérieure à 5 mm, il y a variation du niveau piézométrique mais les réponses marquées qui seront analysées en détails sont celles répondant à des pluies supérieures à 15 mm pour lesquelles le niveau varie de 2 à 3 mètres. Toutefois ces variations dépendent aussi de l'état initial de la nappe. Au mois de décembre, le niveau initial était relativement haut, ceci étant lié à des précipitations importantes les 18 et 19 novembre. Ainsi, lorsque les sondes sont installées et donc au début de la courbe présentée sur le graphique, nous sommes dans une phase de décrue du niveau piézométrique et les pics de variations sont moins brutaux. Au mois de décembre, les pluies n'ont pas été très importantes, le niveau d'eau est redescendu très bas et ainsi, lorsque survient l'événement du 16 janvier, la réponse est très marquée. Au mois de février, après deux semaines sèches, un événement pluvieux majeur tant en durée qu'en intensité fait réagir les deux piézomètres de façon importante. Egalement, la vitesse de montée de la nappe est plus élevée, 3,7 cm/h contre 2,7 cm/h au mois de janvier.

En ce qui concerne les débits, le pic d'écoulement dans le seuil est rapidement atteint après l'intempérie, avec un temps de concentration de 20 minutes en moyenne (Guyonneau). De plus, à l'amont, les événements ruisselants sont plus nombreux qu'à l'aval mais ces derniers sont plus importants en volume.

Enfin, l'analyse des débits versus les niveaux piézométriques, montre des temps de réaction très différents d'un événement à l'autre. La variation de ces niveaux est détaillée dans le tableau :

Événement	Début de la pluie	Fin de la pluie	Début de la crue	Fin de la crue	Temps de réponse	Temps de crue	Hauteur de crue
Janvier, ISA03	14/01 à 7h	18/01 14h	15/01 à 14h	19/01 à 1h	33h	3 jours 11h	2,29 m
Février, ISA03	02/02 à 23h	06/02 à 16h	03/02 à 2h	06/02 à 00h	27h	2 jours 22h	2,60 m
Février, ISA17	02/02 à 23h	05/02 à 19h	04/02 à 14h	06/02 à 5h	37h	1 jour 15h	2,96 m

TABEAU : DETAIL DES CRUES OBSERVEES DANS LES PIEZOMETRES

A l'aide du tableau ci-dessus, il est possible d'établir un temps de réponse moyen de trente heures, largement supérieur à celui des débits (30 minutes en moyenne).

Ainsi, la première conclusion qui ressort de ceci est le fait que les eaux souterraines ne contribuent pas à l'écoulement de surface lors des événements pluvieux. Ceci est également montré par la différence entre l'altitude du niveau piézométrique et l'altitude des canaux de gestion des eaux, qui prouve une déconnexion des deux systèmes. Par la suite, si l'on compare les deux piézomètres au mois de février, nous voyons qu'ISA17 a un temps de réponse plus long, une hauteur de crue plus importante mais un temps de crue plus faible. Le temps de réponse et le temps de crue traduirait une transmissivité et un emmagasinement plus faibles. Ceci est également montré si l'on regarde les vitesses de crue, de 7,5 cm/h pour ISA17, et de 3,7 cm/h pour ISA03.

3.1.2 ANALYSE DES DECRUES

Les décrues jugées les plus pertinentes à analyser en détails sont celles faisant suite à des événements pluvieux et donc des réponses piézométriques importantes, soit ceux du 16 janvier et du 4 février 2014. Les courbes sont décomposées, et le but est de voir si la descente du niveau d'eau suit la loi exponentielle. Nous représentons sur les graphiques semi-log ci-dessous (figures 18,19,20) la variation du niveau piézométrique par rapport à son niveau initial, en fonction du temps de décrue.

Lors de l'événement de janvier, seul ISA03 réagit. La décrue suit une courbe exponentielle dont les paramètres sont décrits dans le tableau ci-dessous. En février, les décrues des deux piézomètres suivent deux lois exponentielles, avec un point d'inflexion entre les deux.

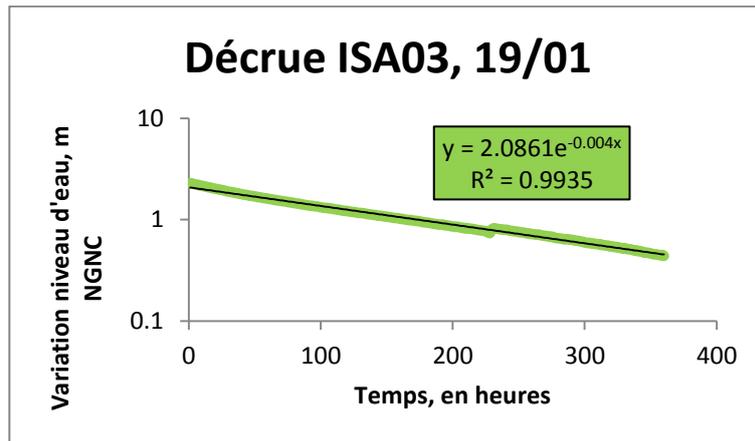


FIGURE 18: DECRUE DU PIEZOMETRE ISA03, JANVIER 2014

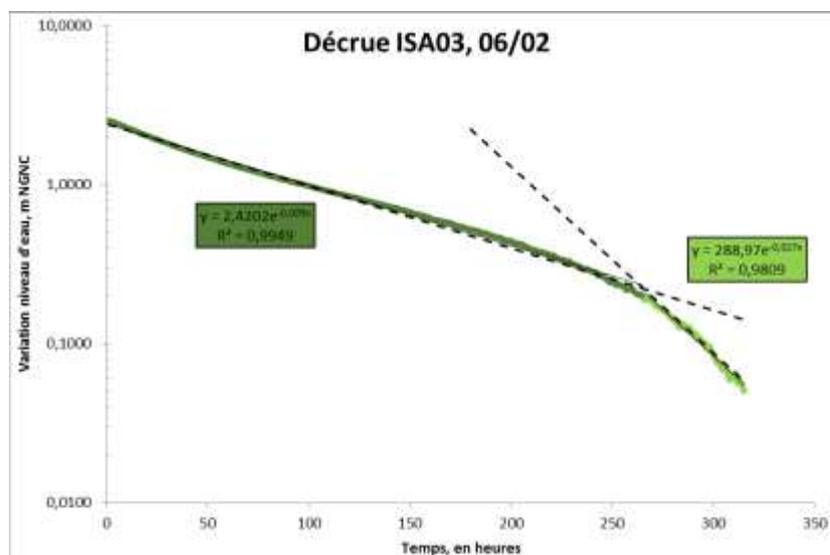


FIGURE 19: DECRUE DU PIEZOMETRE ISA03, FEVRIER 2014

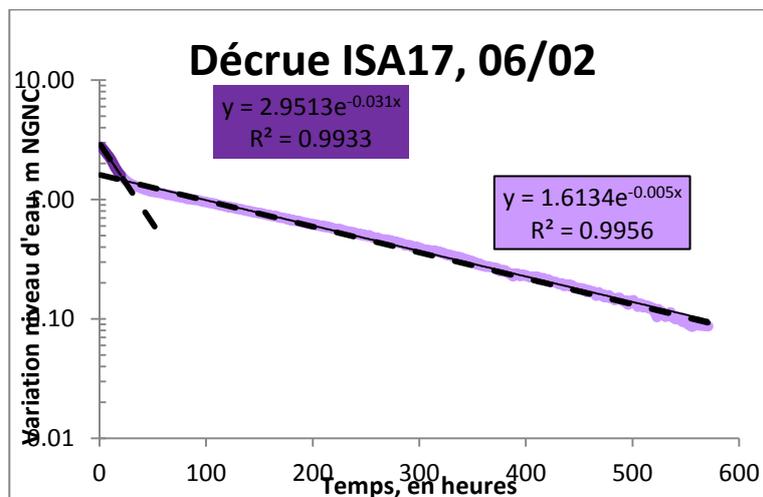


FIGURE 20: DECRUE DU PIEZOMETRE ISA17, FEVRIER 2014

Événement	Alpha 1 ^{ère} phase	Ho	Alpha 2 ^{ème} phase	Ho
Janvier ISA03	-0,004	2,09	Une seule phase	
Février ISA03	-0,008	2,43	-0,019	42,43
Février ISA17	-0,031	2,95	-0,005	1,61

TABLEAU 5 : DETAIL DES DECRUES OBSERVEES DANS LES PIEZOMETRES

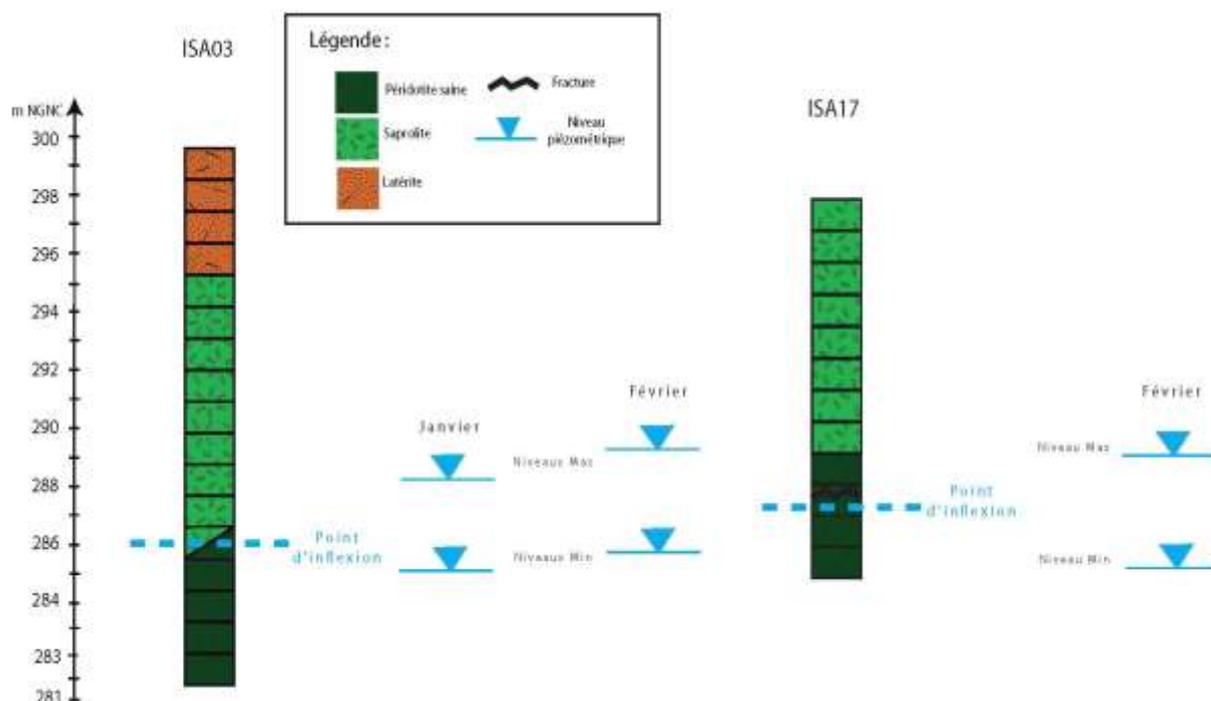


FIGURE 21: SCHEMATISATION DES CRUES, CORRELEES A LA GEOLOGIE

Interprétation ISA03

Le comportement des décrues du piézomètre ISA03 est ambigu. L'accélération de la vitesse de décrue à 287 m NGNC est singulière et ne se retrouve qu'au mois de février. Si l'on regarde la géologie du forage (Figure 15), ce point d'inflexion se trouve être à la transition vers la péridotite saine, qui pourrait être fracturée à cet endroit et accélérer le drainage (si le niveau demeure au dessus après l'événement de janvier). Cependant, ceci est difficile à affirmer sur seulement deux événements, qui ne sont pas vraiment cohérents entre eux, et sur un loggage géologique métrique. Par contre, si l'on compare la première phase de décrue de février et celle de janvier, les coefficients sont du même ordre de grandeur et les comportements similaires. Cette analyse

nécessiterait un nombre plus important d'événements pour vérifier que l'accélération de la décrue est cohérente avec l'existence d'un niveau à localisé de perméabilité (fracture).

Interprétation ISA17

Le comportement d'ISA17 n'a malheureusement pu être analysé que sur un seul événement. Deux vitesses de décrues sont visibles avec un point d'inflexion à 287,91 m NGNC et une diminution de la vitesse en dessous. Ceci rapporté sur le log géologique du forage pour lequel les photos sont également disponibles, une fracture relativement importante se retrouve juste au-dessus de ce point. Ainsi, il serait possible qu'une fois le niveau piézométrique passé sous cette fracture supposée drainante, la vitesse ralentisse. En effet, il y a deux mètres de bedrock sur et sous ce point, et à partir de trois mètres de roche saine, elle pourrait être moins fracturée et donc moins perméable. Une fois de plus, une analyse sur plusieurs courbes de décrue permettrait de confirmer ces hypothèses.

3.2 Réalisation d'un essai de perméabilité in situ

Au cours d'une campagne de terrain réalisée durant la première semaine du mois de juillet, un essai de perméabilité par injection d'eau, ou slug test, a été réalisé dans les deux piézomètres présents sur le bassin versant de Poro afin d'estimer la valeur de la conductivité hydraulique du bedrock. Ainsi, quelques litres d'eau ont été injectés dans les puits, puis les sondes Diver installées enregistrent les variations du niveau d'eau.

Une fois le niveau stabilisé, les sondes sont déchargés pour l'analyse des variations de niveaux. Les données sont interprétés par la méthode de Hvorslev, généralisation de la méthode connue de Bouwer and Rice. Cette méthode fournit la valeur locale de la conductivité hydraulique de l'aquifère testé et s'applique aux puits pénétrant totalement ou partiellement un aquifère d'extension supposée infinie. Elle est détaillée ci-dessous (Chapuis 2007).

$$\ln(H_1/H_2) = - KC (t_1 - t_2)$$

Où H_1 et H_2 sont les charges hydrauliques mesurées respectivement aux temps t_1 et t_2 , K est la conductivité hydraulique, et C est un coefficient tenant compte de la géométrie de la zone d'injection.

$C = c / \text{Sinj}$ où c est le coefficient d'injection, et Sinj la surface de la zone.

Si l'eau est injectée dans un tuyau de rayon r et de diamètre D ,

$$\text{Sinj} = \pi r^2 \quad \text{et} \quad c = 2.75D$$

Par la suite, si l'on porte sur un graphique semi-logarithmique le temps t versus la charge $\ln(H)$, nous devrions obtenir une ligne droite représentant le retour du niveau piézométrique au niveau initial dont la pente $p = KC$.

D'où,

$$K = p \operatorname{Sin} j / c$$

Ainsi, à partir de l'équation ci-dessus, les conductivités hydrauliques ont été calculées dans chacun des deux piézomètres, à partir des valeurs des profondeurs d'eau aux différents temps mesurées par la sonde. Les graphiques et les résultats sont exposés ci-dessous (figures 22, 23, 24, 25 et Tableau).

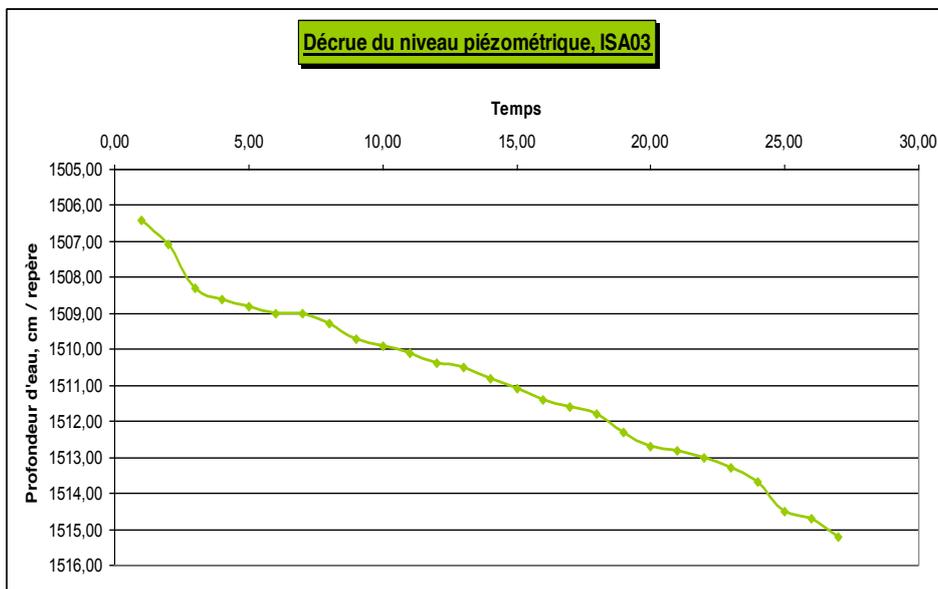


FIGURE 22: DECRUE D'ISA03 A LA SUITE DU SLUG TEST

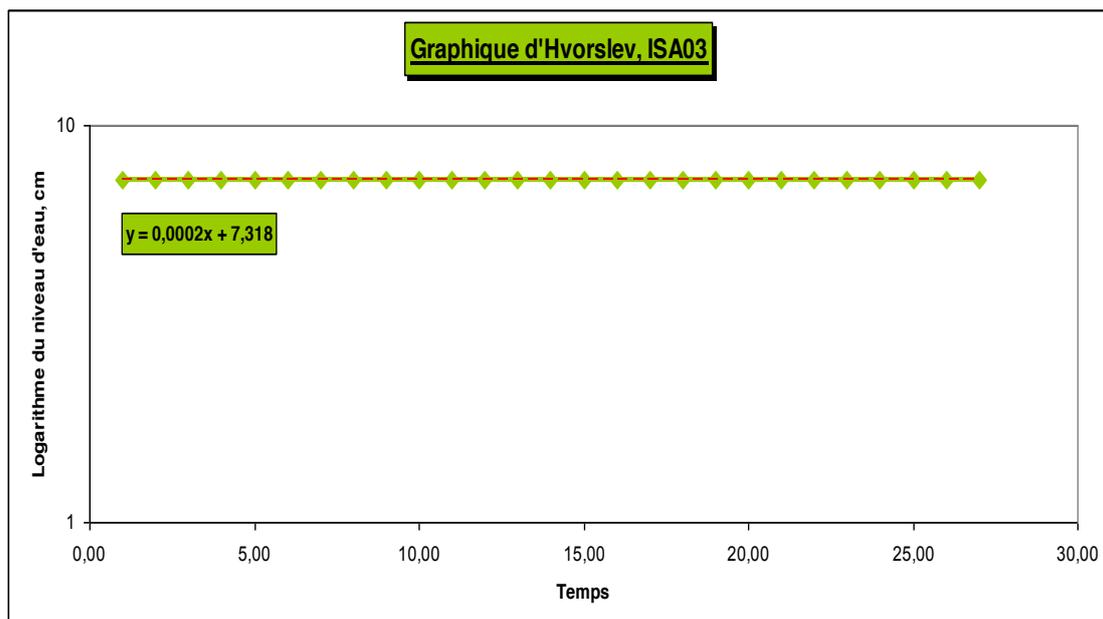


FIGURE 23: GRAPHIQUE D'HVORSLEV, INTERPRETATION DU SLUG TEST, ISA03

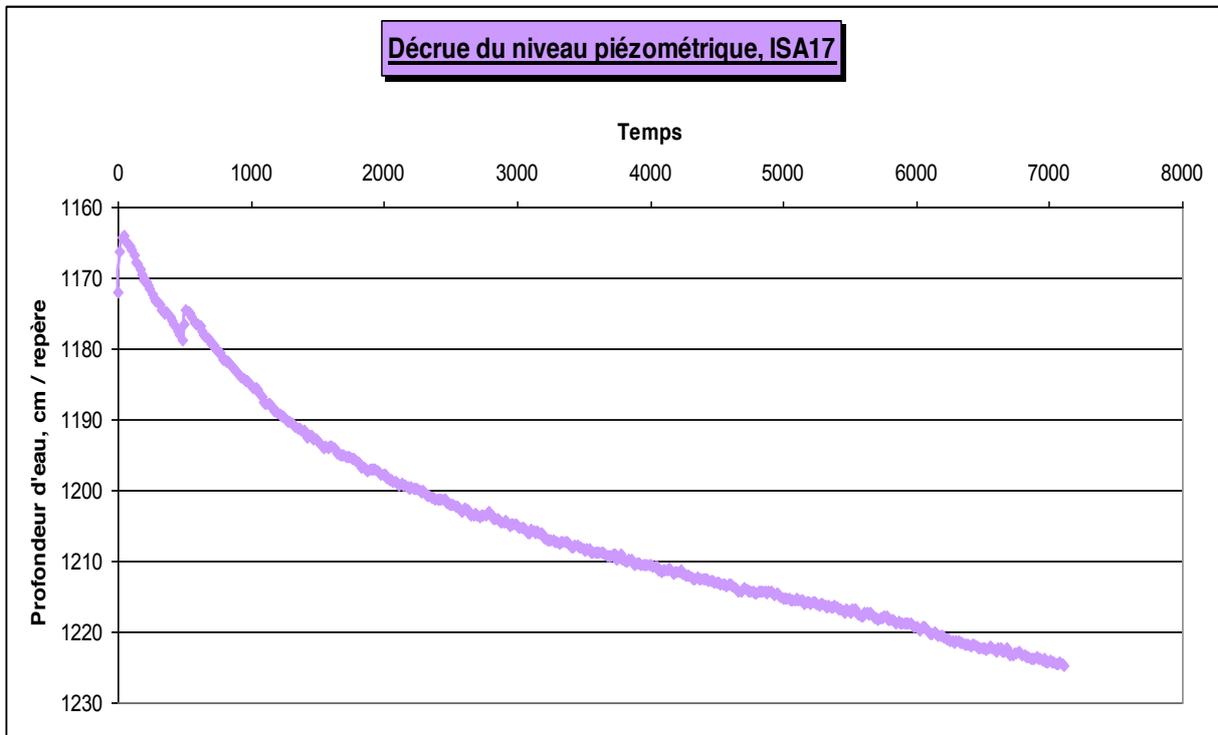


FIGURE 24: DECROUE D'ISA17 A LA SUITE DU SLUG TEST

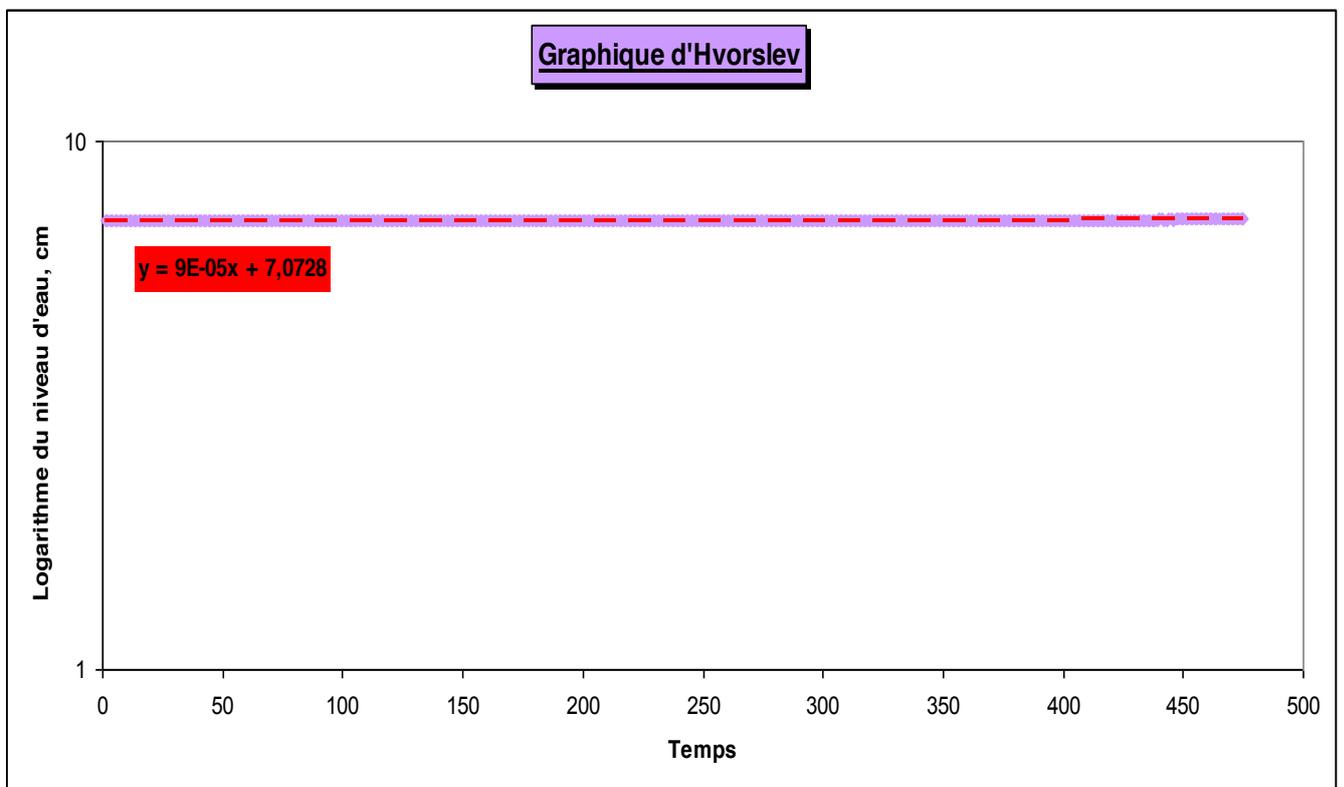


FIGURE 25: GRAPHIQUE D'HVORSLEV, INTERPRETATION DU SLUG TEST, ISA17

	<u>ISA03</u>	<u>ISA17</u>
<u>Pente, p</u>	0.00002	0.00009
<u>Surface d'injection, S_{inj}</u>	0.724 cm ²	0.126 cm ²
<u>Coefficient de forme, c</u>	2.64	2.47
<u>Conductivité hydraulique, cm/s</u>	5,48.10⁻⁵	4,57.10⁻⁶

TABLEAU : RESULTATS D'INTERPRETATION DU SLUG TEST

Les conductivités hydrauliques estimées selon cette méthode varient entre $5,5 \cdot 10^{-7}$ et $4,6 \cdot 10^{-8}$ m/s et diffèrent donc d'un ordre de grandeur entre les deux piézomètres. Ceci a pu être relié à la géologie, à partir des forages analysés préalablement à l'installation des piézomètres. En effet, le piézomètre ISA03 à plus grande profondeur est foré dans une plus forte épaisseur de saprolite « dure » sous les latérites, contenant de nombreuses fractures. En revanche, la crépine d'ISA17 intercepte une saprolite moins épaisse et plus altérée, dite terreuse ou fine, où le pourcentage latéritique va venir en diminuer sa perméabilité par un remplissage des vides notamment. De plus, le log des forages laisse apparaître des horizons plus altérés dans le cas d'ISA17. Ces raisons pourraient expliquer le contraste de perméabilité observé.

4. Fonctionnement hydrogéologique à l'échelle du bassin versant

4.1 Interprétation des mesures de niveau d'eau

Plusieurs campagnes de relevés de niveau d'eau ont été réalisées et on peut ainsi observer la variation de celui-ci dans le temps, et le corrélérer à la géologie du trou de forage. Les trous de forage étant des trous nus, positionnés un peu partout sur le site minier, et parfois dans les zones d'exploitation ou sur les pistes de circulation, il est fréquent que d'une campagne à l'autre ils ne soient plus retrouvés, ou alors qu'ils se soient éboulés et donc bouchés. Ainsi, il y a essentiellement trois trous de forage qui ont pu être mesurés sur plusieurs campagnes, représentés sur la figure 26 avec les mesures sur les deux trous équipés de sondes de suivi piézométrique. Le détail des mesures est présenté en annexe 1.

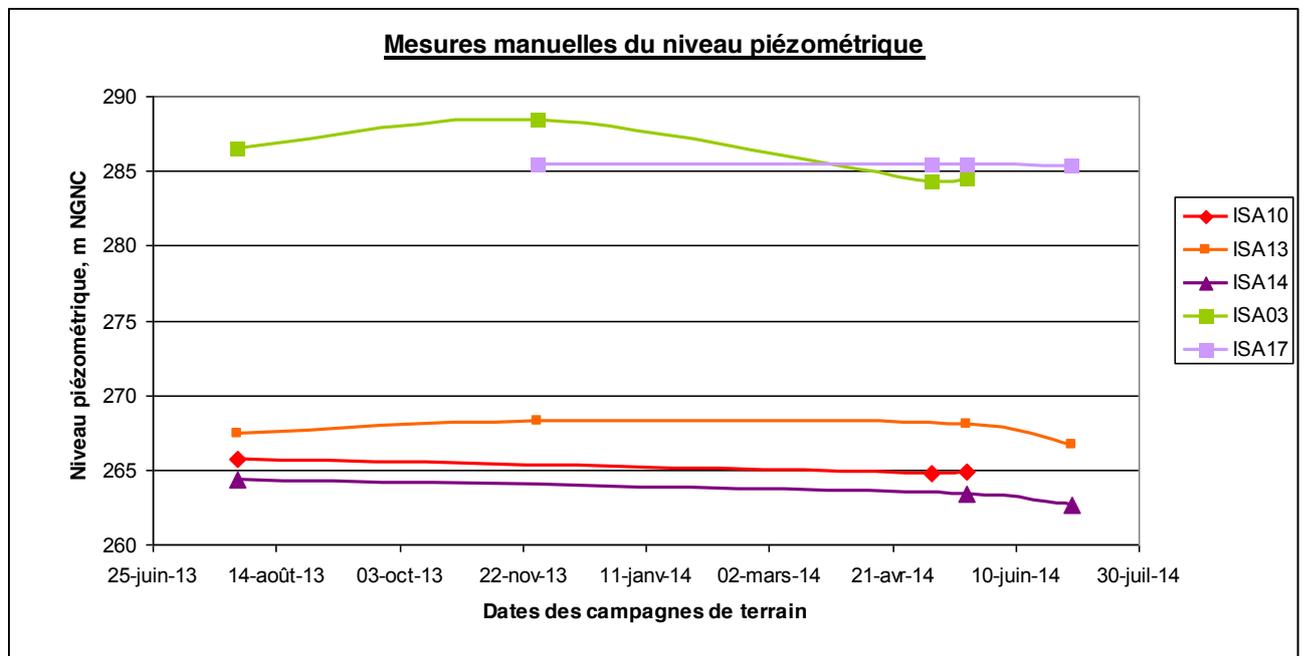


FIGURE 26: VARIATIONS DES MESURES PIEZOMETRIQUES MANUELLES

Le battement de la nappe reste faible sur tout le bassin versant de Poro, de l'ordre d'un à un mètre cinquante NGNC de variation maximum. De manière générale, les niveaux d'eau ont baissé dans tous les trous entre juillet 2013 et juillet 2014. Ceci s'explique facilement par une saison estivale et un début d'année 2014 très secs, les événements pluvieux majeurs susceptibles de recharger la nappe phréatique ont été rares.

Si l'on regarde la géologie des forages, les trois niveaux d'eau se trouvent dans la saprolite, plus ou moins proches de la transition avec la péridotite saine et fluctuent au dessus et au dessous de celle-ci.

4.2 Interprétation de l'infiltration

A partir de la cartographie de l'infiltration potentielle, il est possible de faire une interprétation qualitative de la réponse du bassin versant aux événements pluvieux. Tout d'abord, les données ont été extraites du raster pour évaluer le pourcentage de pixels appartenant à chaque classe de valeurs, et donc le pourcentage de surface fortement infiltrée lors d'une pluie (Tableau).

<u>Classe</u>	<u>Aval</u>	<u>Amont</u>	<u>Bassin</u>	<u>Infiltration</u>
1-1,6	31,02 %	26,97 %	29,87 %	Faible
1,8-2,4	26,61 %	22,90 %	25,57 %	Moyenne faible
2,6-3,2	38,52 %	42,75 %	39,71 %	Moyenne élevée
3,4-4	3,85 %	7,38 %	4,85 %	Elevée

TABLEAU : RESULTATS DE LA CARTOGRAPHIE DE L'INFILTRATION POTENTIELLE

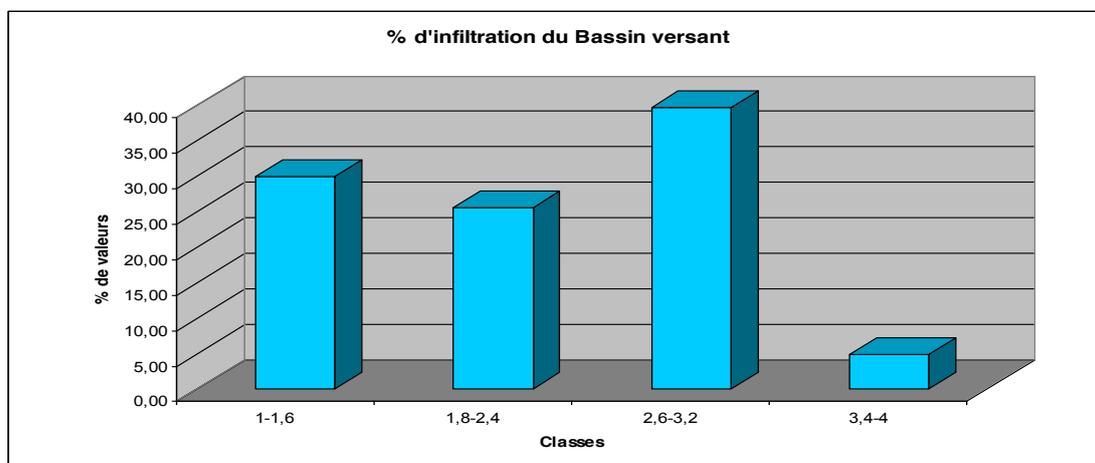


FIGURE 27: REPRESENTATION DES VALEURS D'INFILTRATION DU BASSIN VERSANT

A partir de ces résultats (figure 27 28), une différence notable apparait entre l'amont et l'aval du bassin versant, liée en particulier à la géologie mais aussi à la pente. En effet, le bassin aval est beaucoup plus pentu, recouvert de cuirasse sur le plus haut plateau, puis l'exploitation en terrasses a laissé le bedrock apparent en surface à beaucoup d'endroits. C'est les raisons pour lesquelles les fortes infiltrations sont plus importantes à l'amont, et les faibles infiltrations à l'aval. De plus, à l'aval se trouvent deux grandes plateformes de stockage ainsi que beaucoup de pistes, de canaux de gestion des eaux et de surface latéritique, qui engendrent de faibles infiltrations. En revanche, comme supposé, la petite vallée encaissée à l'est du bassin apparait comme une zone d'infiltration importante, lié à la présence de cuirasse. De plus, celle-ci est un point de confluence des eaux, avec un talweg au fond circulant sur du bedrock.

4.3 Carte piézométrique

Avec les données disponibles sur les piézomètres et les trous de sondage, des essais de réalisation d'une carte piézométrique ont été réalisés. Le but était de tracer une carte à une date donnée qui correspondrait à la date des relevés. Ceci a été réalisé à l'aide du logiciel ArcGIS et ses outils d'interpolation spatiale. Les niveaux d'eau mesurés ont ainsi été ramenés à des hauteurs d'eau (altitude du sol – niveau d'eau) et entrés dans un tableau Excel exporté dans ArcGIS.

Cependant, ces essais traduisent l'inadaptation du réseau d'observation à l'échelle de la zone. En effet, comme on peut le voir sur la carte, les mesures ISA sont très rapprochées spatialement et ne peuvent être extrapolées à l'échelle du bassin versant sans s'éloigner beaucoup trop de la réalité. De plus, les données ANI auraient pu aider à faire l'interpolation entre ces deux groupes de données, mais de par le fait que les trous soient à l'extérieur du bassin versant, ils viennent fausser les calculs et dévier les isopièzes, ce qui n'est plus réaliste.

Une deuxième approche a donc été testée, à l'aide des données géologiques. En effet, une loi linéaire semble relier la profondeur du bedrock et le niveau piézométrique dans les trous de forage. Ceci a permis une interpolation, très hypothétique, du niveau d'eau dans tous les trous pour lesquels la donnée de profondeur du bedrock est disponible. Une fois cette interpolation réalisée, la carte piézométrique résultante peut être tracée sous ArcGIS avec un maillage plus dense de données, à l'aide de l'outil de krigeage (Figure 28).

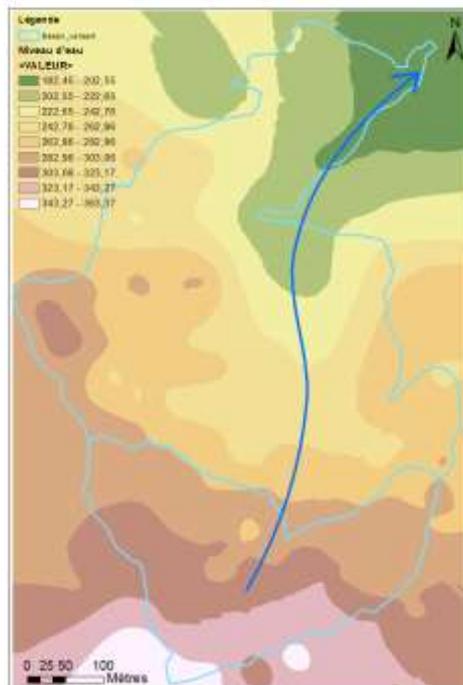


FIGURE 288: CARTE PIEZOMETRIQUE INTERPOLEE

Sur la figure 28 ci-dessus, la carte piézométrique interpolée par la méthode du krigeage montre des hauts niveaux piézométriques sur le haut du bassin versant, en lien également avec la topographie. En partant vers le nord-est de la carte se dessine la vallée encaissée qui draine les eaux jusqu'au seuil aval, en suivant à peu près la flèche bleue. De plus, au regard de la cartographie de l'infiltration potentielle, il est remarquable que les hauts piézométriques correspondent à des zones infiltrantes, comme c'est le cas du bedrock fracturé à l'ouest ou de la cuirasse au sud. Ainsi, les hypothèses admises donnent un résultat cohérent avec le fonctionnement global du bassin versant de Poro.

CONCLUSION

L'étude hydrogéologique du massif de Poro, à Houailou, a permis de venir compléter une étude précédente sur la relation nappe/ruissellement dans un système minier saturé et à profil pédologique complet. A l'inverse, le site de Poro caractérise parfaitement un massif désaturé et largement décapé. L'expérimentation réalisée sur le site de Poro permet de répondre à une des principales questions posées quant au lien entre les eaux de surface et les eaux souterraines, de développer un modèle d'estimation de l'infiltration potentielle et de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de ce massif à la géologie particulière.

Tout d'abord, l'étude combinée des niveaux piézométriques, des débits de surface et des précipitations montre que le système hydrogéologique est déconnecté des eaux circulant en surface. En effet, une différence topographique importante demeure entre la surface de la nappe phréatique et les points bas des écoulements de surface, ces derniers étant plus haut. De plus, l'analyse des variations temporelles montre un décalage important entre les crues souterraines et les crues de surface.

Par la suite, l'infiltration potentielle a pu être déterminée, avec l'appui du modèle Paprika, en se basant sur deux critères majeurs, à savoir la pente du terrain et la géologie de surface. Les surfaces favorisant l'infiltration représente seulement 5% de la surface totale du bassin versant, ce qui implique un ruissellement important, à l'origine du problème d'érosion et d'encombrement des cours d'eau situés en aval. Ceci est lié majoritairement à un dénudement de la surface par l'exploitation et à un bassin versant à fort dénivelé et à faible perméabilité telle que mis en évidence par des essais de slug Test.

En conséquence, l'analyse successive des sites de Tiebaghi et de Poro traduit parfaitement la transformation profonde du fonctionnement hydrologique de ces deux exemples extrêmes.

Dans le premier cas, le bassin versant pilote de Tiebaghi représente un massif minier à faible pente, saturé en eau et recouvert d'une cuirasse latéritique, la réponse hydrologique est alors clairement dépendante de l'état piézométrique de la nappe située dans les altérites. La pluie nette peut être influencée par l'infiltration dans l'horizon nodulaire sous une cuirasse plus ou moins démantelée.

A l'inverse, le massif de Poro caractérise un massif désaturé, à forte pente et à profil d'altération tronqué. Dans ce second cas, l'hydraulicité du système sur une crue d'averse, est clairement déconnecté du système aquifère plus profond.

BIBLIOGRAPHIE

- Chapuis, R.P., 2007. *Guide des essais de pompage et leurs interprétations.*, Gouvernement du Quebec.
- Dewandel, B. et al., 2005. A conceptual hydrogeological model of ophiolite hard-rock aquifers in Oman based on a multiscale and a multidisciplinary approach. *Hydrogeology Journal*, 13, p.708-726.
- Dubois, G. & Join, J.-L., 2007. *Système hydrogéologique du secteur de Dome sur le massif de Tiebaghi, Rapport de Synthèse- Geophysical/IRD, Le nickel-SLN.*
- Espirat, J.J., 1967. *Etude hydrogéologique de la côte Ouest de la Nouvelle Calédonie*, B.R.G.M.
- Freydier, P., 2013. *Analyse des transferts hydro-sédimentaires du petit bassin versant minier de Poro, Nouvelle-Calédonie, pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie.*, CNRT.
- Guyonneau, A., 2012. *Analyse comparative des réponses hydro-sédimentaires des petits bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie.*, CNRT.
- Join, J.-L. et al., 2005. Système hydrogéologique d'un massif minier ultrabasique de Nouvelle-Calédonie. *Comptes Rendus Geosciences*, 337(16), p.1500-1508.
- Retour, O., 2005. *Caractérisation des circulations d'eaux souterraines dans le massif minier de Tiébaghi (Nouvelle Calédonie).*,
- Trescases, J.J., 1975. *L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale: formation des gisements nickélifères de Nouvelle- Calédonie*, ORSTOM.
- Valelnc, 2009. *Verse à stérile de la Kué Est (VSKE). Note préliminaire. Impacts hydrogéologiques.*,
- Verdier, M., 2014. *Site minier de Poro, Structure hydrogéologique du bassin versant et impact sur le ruissellement*, Ecole Polytechnique de Montreal.

ANNEXES

Annexe 1

Tableau des mesures manuelles réalisées dans les forages

Nom	x	y	z	Niveau 29/07/13	Profondeur	Niveau 28/11/13	Profondeur	Niveau 07/05/14	Profondeur
ISA01	368526,071	321703,602	285,215	SEC	269,915	ND	ND	SEC	271,515
ISA02	368550,906	321602,806	295,021	267,371	249,621	SEC	280,821	ND	ND
ISA03	368565,986	321577,868	299,354	286,554	283,354	288,434	285,054	284,234	283,844
ISA04	368545,909	321562,003	298,37	292,07	288,52	ND	ND	ND	ND
ISA05	368586,44	321562,872	299,805	SEC	293,305	ND	ND	ND	ND
ISA10	368626,97	321640,871	275,589	265,689	263,539	ND	ND	264,749	264,289
ISA11	368642,102	321641,988	277,829	SEC	269,229	SEC	269,379	SEC	268,979
ISA12	368646,548	321621,831	277,232	264,132	257,832	ND	ND	ND	ND
ISA13	368625,289	321593,838	279,429	267,429	265,729	268,229	266,329	SEC	266,679
ISA14	368665,875	321601,315	278,872	264,372	261,272	ND	ND	ND	ND
ISA15	368667,096	321580,253	278,42	259,77	254,32	ND	ND	ND	ND
ISA16	368684,147	321580,135	279,783	266,383	258,783	ND	ND	ND	ND
ISA17	368516,311	321581,164	298,084	SEC	286,144	285,424	285,204	285,404	285,204

Nom	Niveau 21/05/14	Profondeur	Niveau 03/07/14	Profondeur
ISA01	ND	ND	SEC	271,57
ISA02	ND	ND	ND	ND
ISA03	284,534	284,014	SEC	283,994
ISA04	ND	ND	ND	ND
ISA05	ND	ND	ND	ND
ISA10	266,189	264,789	SEC	264,889
ISA11	SEC	269,009	SEC	269,389
ISA12	ND	ND	ND	ND
ISA13	268,099	266,779	12,7	266,679
ISA14	263,442	262,072	16,17	262,622
ISA15	ND	ND	ND	ND
ISA16	ND	ND	ND	ND
ISA17	285,394	285,204	12,7	285,204

CHAPITRE 5 : CONTRIBUTION DE METEO FRANCE

**Contribution de Météo-France au projet CNRT
« Fonctionnement des petits bassins versants miniers »**

**ETUDIER L'APPORT DES LAMES D'EAU RADAR CALIBREES
DANS LA PREVISION DES PRECIPITATIONS
DANS LES PETITS BASSINS VERSANTS
EN NOUVELLE-CALEDONIE**

Coordination : Temau Tehei

Conception, étude et développement :

Division Climatologie :

Olivia Yu
Temau Tehei

Division Prévision :

Virgil Cavarero

Division TTI

Thierry Kranitz



METEO FRANCE

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

Acronymes et abréviations

IHM : Interface Homme Machine

RADAR : RADio Detection And Ranging

KNS : Koniambo Nickel SAS

SLN : Société Le Nickel

CNRT : Centre National de Recherche Technologique

DAVAR : Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales

LE : Lame d'Eau

FC : Facteur Correctif

FC OPER : Facteur Correctif OPERationnel

UNC : Université de la Nouvelle-Calédonie

IRSTEA : Institut National de Recherche en Sciences pour l'Environnement et l'Agriculture

Erratum : l'échelle indiquée sur les cartes de lames d'eau RADAR est erronée.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

SOMMAIRE

1	Introduction	4
2	Les RADAR de précipitations en Nouvelle-Calédonie	5
3	Amélioration des lames d'eau RADAR	6
3.1	Description de la méthode de calibration	6
3.2	Les cartes de facteurs correctifs	7
3.3	Evaluations de la méthode	9
3.3.1	Qualité des facteurs correctifs	9
3.3.2	Impact du réseau de mesure sur la calibration	9
4	Travaux pré requis.....	11
4.1	Réalisation d'une IHM permettant de rejouer les situations	11
4.2	Choix des situations hydrologiques significatives et des petits bassins versants miniers	11
4.3	Recueil des données	11
5	Traitement et mise en forme des données	15
5.1	Sites étudiés par épisode	15
5.2	Carte de lames d'eau RADAR et graphiques associés	15
6	Situation de Noël 2011 : FINA	18
6.1	Résumé météorologique	18
6.2	Site de Poro.....	19
6.3	Site de Goro	22
6.4	Site de Poum	24
6.5	Site de Koniambo	26
7	Situation du 2-3 juillet 2013	28
7.1	Résumé météorologique	28
7.2	Site de Poro.....	29
7.3	Site de Goro	30
8	Situation du 17-18 janvier 2014: JUNE	31
8.1	Résumé météorologique	31
8.2	Site de Poum	32
9	Situation du 3-4 février 2014 : EDNA	33
9.1	Résumé météorologique	33
9.2	Site de Poro.....	34
9.3	Site de Koniambo	35
10	Conclusion.....	36

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

1 Introduction

Le projet « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » cherche d'une part à *améliorer la compréhension des mécanismes de fonctionnement* et d'autre part, à *quantifier les flux en amont pour une minimisation de l'impact du transport solide en aval, dans les différents contextes géomorphoclimatiques des petits bassins versants impactés par l'activité minière en Nouvelle-Calédonie.*

La contribution de Météo-France à ce programme pluridisciplinaire, porté par l'Université de la Nouvelle-Calédonie à travers le PPME – EA 3325 (Pôle Pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement), consistait initialement à collecter des données. Il s'agissait d'installer une station de mesure pluviométrique dans la zone de Poro pour la durée de l'étude et de fournir les données des postes météorologiques des partenaires miniers associés au CNRT, les sociétés, KNS, La SLN et VALE NC. Cependant, en début de projet, la fourniture des données météorologiques de Poro a été assurée par la DAVAR qui disposait déjà d'un point de mesure sur place.

Par conséquent, la contribution de Météo-France s'est réorientée vers l'étude de la pertinence des données des RADAR météorologiques dans la détection et la quantification des pluies extrêmes. Il s'agit d'éprouver le système opérationnel de traitement des données RADAR mis au point en 2012 par l'établissement dans des conditions d'utilisation extrêmes : des petites surfaces et de fortes intensités de pluie. Pour Météo-France, cela devrait permettre d'améliorer notre connaissance du système, de définir les conditions d'utilisation et la pertinence de cette donnée dans les zones non équipées de matériel de mesure.

Pour l'industrie minière, les enjeux économiques et les impacts environnementaux face au risque de crue rapide sont triviaux. Une bonne connaissance de la pluviométrie sur les sites d'extraction peut permettre le bon dimensionnement des ouvrages hydrauliques. La prévision d'un risque de pluie intense permettrait la mise en sécurité des personnes, du matériel et des stocks. A posteriori, les lames d'eau radar peuvent servir à connaître les quantités de pluies tombées là où il n'y a pas de mesure, permettant à l'industriel d'affiner sa stratégie de reprise de l'extraction mais aussi d'évaluer les retards et les pertes liés à la teneur en eau des sols par exemple. Toutes ces possibilités dépendent de la qualité des traitements effectués sur les données RADAR.

L'étude des traitements effectués sur les données RADAR météorologiques comporte quatre parties : la première présente de façon succincte le contexte et le mode de fonctionnement des radars en Nouvelle-Calédonie. La seconde partie décrit la méthode de calibration. La troisième partie présente les travaux préliminaires réalisés pour traiter les données utilisées. La quatrième partie analyse la pertinence et la qualité du traitement des données RADAR à travers une sélection de situations météorologiques extrêmes sur les sites d'étude du projet : Poum, Goro, Koniambo, Poro.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

2 Les RADAR de précipitations en Nouvelle-Calédonie

Un RADAR de précipitations est un instrument de télédétection qui permet au météorologue de suivre en temps réel la position, la vitesse de déplacement et l'intensité des précipitations. Concernant la distribution spatiale des pluies, il fournit des informations sur l'étendue de la zone touchée par les plus fortes pluies, contrairement au réseau pluviométrique à la couverture géographique discontinue. En revanche, ce capteur n'estime pas aussi précisément qu'un pluviomètre la quantité d'eau qui touche le sol, en raison notamment des hypothèses et des approximations qu'il est nécessaire d'émettre (car le RADAR n'effectue pas une mesure directe) et des obstacles comme le relief qui peuvent le rendre partiellement aveugle. Chaque RADAR dispose donc d'une configuration unique qui tend à résoudre ces problèmes et chaque donnée RADAR dispose d'un code qualité.

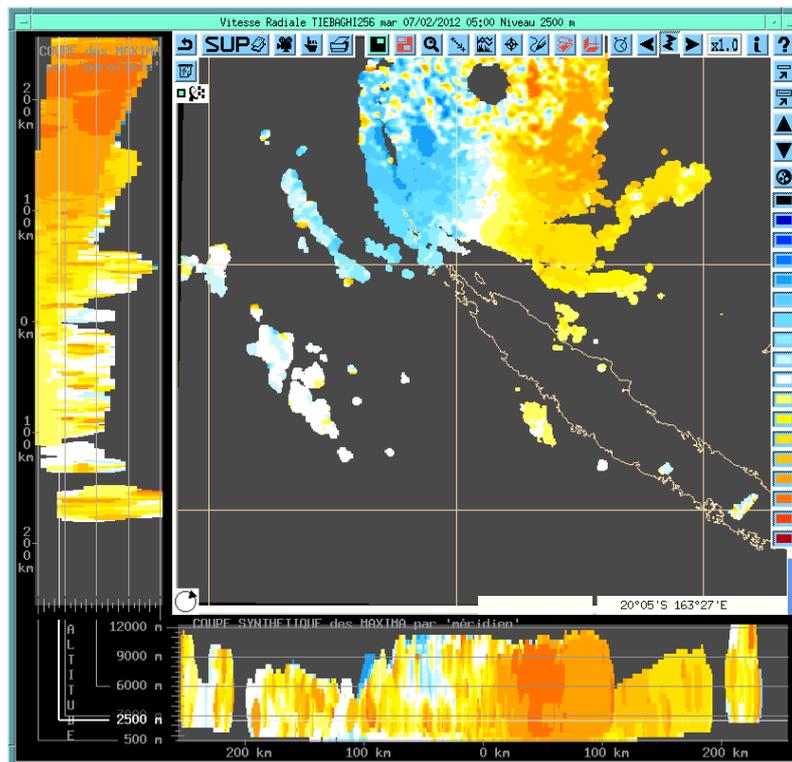


Figure 1: Image des vitesses radiales mesurées par le RADAR de Tiébaghi à 2500 m le 07/02/2012 à 16:00 locales lors du passage du cyclone JASMINE. Sur cette image, on voit nettement l'œil où le ciel est clair. A l'est de celui-ci, on note la présence d'une zone de couleur orange foncé où la vitesse de déplacement des particules à 2500 m est estimée à 140 km/h.

Météo-France dispose en Nouvelle-Calédonie de trois RADAR bandes C localisés à Nouméa, Tiébaghi et sur l'île de Lifou. Les RADAR délivrent des données de réflectivité. Celles-ci sont post-traitées pour donner des lames d'eau censées traduire une quantité de pluie (mm) et une intensité (mm/h).

Une lame d'eau RADAR est une image représentant les hauteurs de précipitations calculées à partir des mesures d'un (ou de plusieurs) RADAR météorologique(s), pendant un intervalle de temps donné (de 5 minutes à 24 heures). Les hauteurs s'expriment en mm/unité de temps. Du côté de la résolution spatiale, le pixel de base est un carré de 1 km sur 1 km.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

3 Amélioration des lames d'eau RADAR

3.1 Description de la méthode de calibration

Entre 2009 et 2013, Météo-France a mené un projet de service « Lame d'eau RADAR PANTHERE » dont le but fut d'améliorer la qualité des lames d'eau RADAR à l'aide de différentes méthodes de calibration.

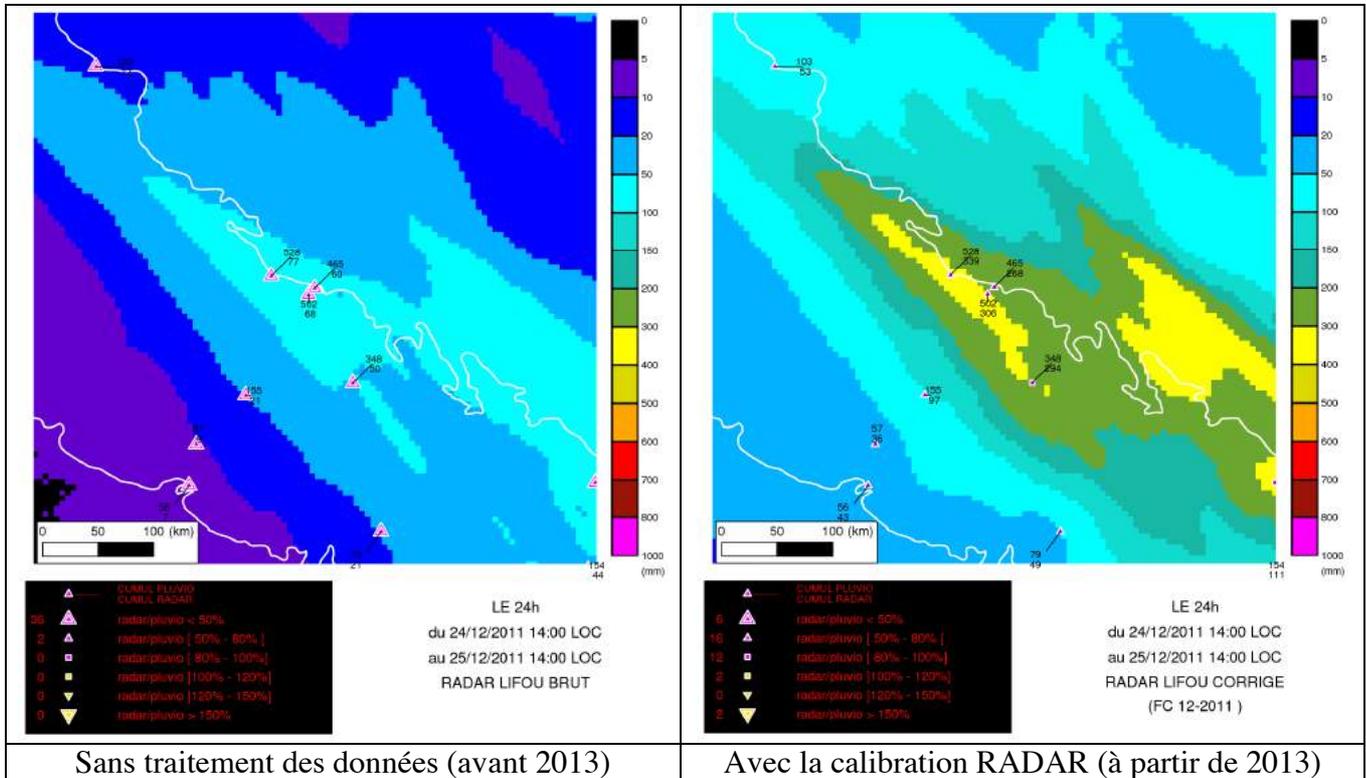


Figure 2 : Comparaison des lames d'eau RADAR brutes et calibrées opérationnelles à Météo-France pour l'épisode de Noël 2011.

Avant 2013, les zones pluvieuses intenses étaient identifiées mais les quantités d'eau présentaient une sous-estimation systématique par rapport aux cumuls enregistrés par les pluviomètres. Le projet d'étude a permis d'améliorer considérablement la qualité des lames d'eau grâce à l'application d'une **correction mensuelle**. Ce projet a abouti à la mise en place d'un programme informatique opérationnel de calibration des images identique à la métropole : « la lame d'eau RADAR PANTHERE ». La technique utilisée consiste à comparer pour chaque pluviomètre la quantité de pluie mesurée à celle estimée par le RADAR¹, puis d'en déduire une carte de facteurs multiplicatifs (FC) à appliquer en chaque pixel des images RADAR, selon la formule :

$$\text{LAME D'EAU CORRIGÉE} = \text{LAME D'EAU BRUTE} \times \text{FACTEURS CORRECTIFS}$$

¹ A la date de rédaction de ce rapport, le traitement est indépendant pour chaque RADAR. Une lame d'eau RADAR mosaïque calibrée n'est pas encore opérationnelle.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

Par la suite, deux types de lames d'eau calibrées sont utilisés :

- **Les lames d'eau calibrées avec des facteurs correctifs opérationnels** : il s'agit des données disponibles en temps réel (pas de temps de cinq minutes) utilisées par les prévisionnistes au quotidien. Une fois par mois, pour chacun des 3 RADAR, une carte de facteurs correctifs est mise à jour. Le calcul prend en compte tous les épisodes significatifs (plus de 5 mm/jour dans les pluviomètres) pendant une période de 3 mois et demi. Ainsi, lorsqu'un épisode pluvieux est en train de se dérouler, les cartes mises à disposition des prévisionnistes sont calculées à partir des lames d'eau brutes et de la plus récente carte de facteurs correctifs mensuels disponibles.

NB : pour les besoins de cette étude, des cartes de FC opérationnelles ont été calculées pour les épisodes qui ont eu lieu avant la mise en place de la calibration des lames d'eau en Nouvelle-Calédonie. Il s'agit des cartes qu'auraient eu les prévisionnistes en temps réel.

- **Les lames d'eau calibrées avec des facteurs correctifs recalculés pour un épisode donné** : pour étudier l'épisode pluvieux des 2-3 juillet 2013 par exemple, une carte de facteurs correctifs a été calculée en prenant en compte seulement les cumuls de précipitations du 2 juillet à 5 h locales au 4 juillet à 5 h locales (correspondant aux journées dites climatologiques des 2 et 3 juillet). Ce jeu a posteriori permet d'obtenir des lames d'eau qui s'ajustent aux cumuls mesurés aux pluviomètres. Toutes les données issues du réseau de stations de Météo-France utilisées dans ce rapport ont été contrôlées et validées par les climatologues de Météo-France.

Remarque importante :

La donnée RADAR utilisée pour être comparée à la mesure pluviométrique est celle du pixel recouvrant la station de mesure. La méthode est donc simple et logique mais plutôt sévère. Nous n'avons pas cherché le meilleur pixel RADAR au voisinage du pluviomètre.

3.2 Les cartes de facteurs correctifs

Pour obtenir les cartes de facteurs correctifs, on calcule une valeur de rapport cumul_pluviomètre/cumul_RADAR en chaque poste, soit sur 3 mois et demi au moins pour les cartes mensuelles, soit sur la durée de l'épisode pour les cartes calculées pour un épisode donné. Puis on spatiale le résultat, c'est-à-dire qu'on interpole les rapports pour estimer les valeurs sur tous les pixels de la grille RADAR en dehors des postes pluviométriques, généralement par une méthode de krigeage ordinaire (la méthode retenue pour l'instant est l'inverse de la distance au carré).

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

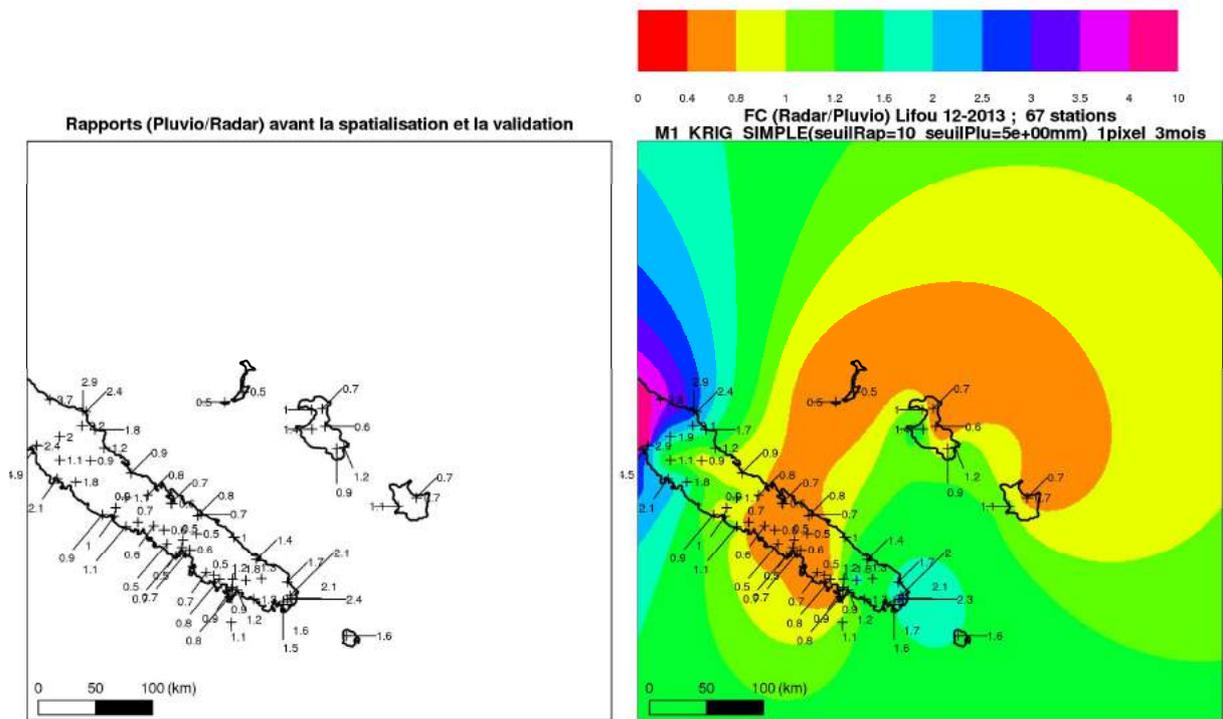


Figure 3 : carte des facteurs correctifs spatialisés pour le RADAR de Lifou en décembre 2013. L'interpolation est réalisée par krigeage simple (KRIG) sur un échantillon de trois mois.

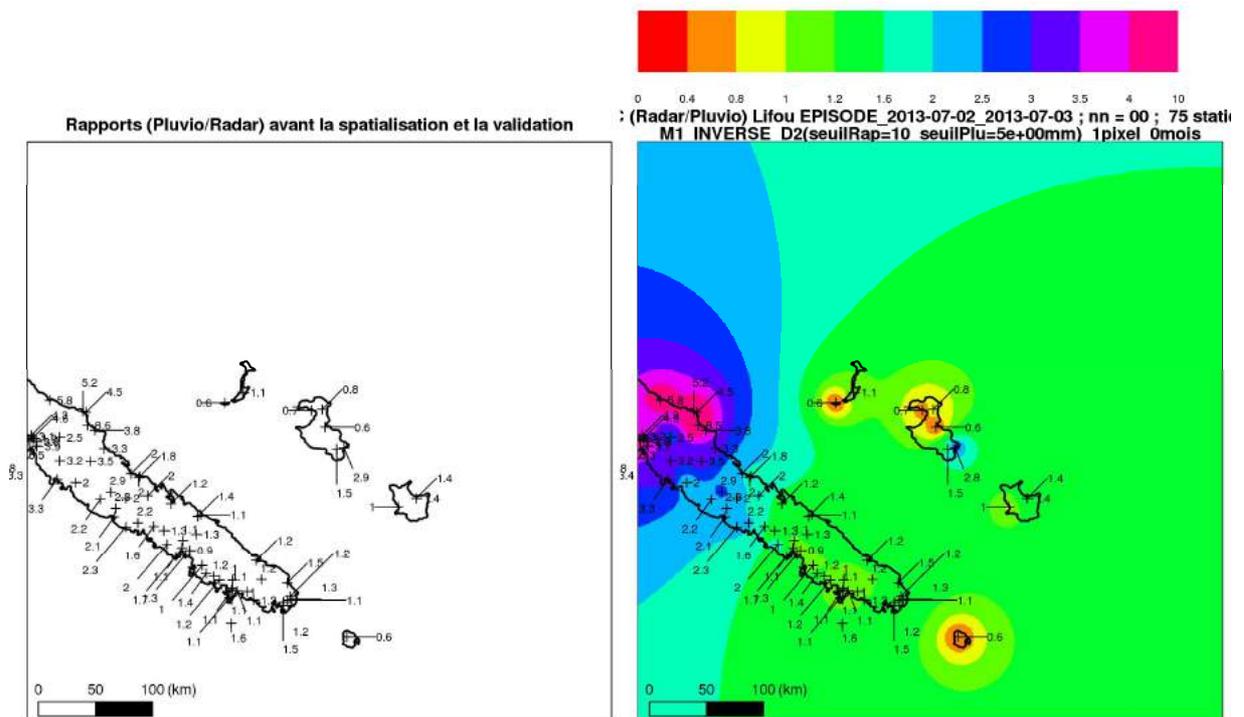


Figure 4 : carte des facteurs correctifs spatialisés avec les données mesurées lors de l'épisode du 02 au 03 juillet 2013. L'interpolation est ici réalisée par l'inverse de la distance au carré (INVERSE D2).

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

3.3 Evaluations de la méthode

3.3.1 Qualité des facteurs correctifs

Les graphiques suivants permettent de visualiser mois par mois l'apport de la correction. Il s'agit des cumuls pluviométriques en abscisses, avec en ordonnées, sur le graphe de gauche les cumuls radar bruts, et celui de droite les cumuls corrigés. Il s'agit pour chaque poste des cumuls totaux sur un mois à moins de 80 km du RADAR et dans une zone peu ou pas masquée.

Plusieurs mesures statistiques sont examinées :

- Le rapport moyen (radar/pluvio) doit se rapprocher de 1, et le nuage de points doit se rapprocher de la bissectrice en rouge.
- L'écart-type des rapports doit diminuer.
- L'erreur quadratique moyenne (RMS error) doit diminuer.
- La corrélation doit augmenter.

Attention : on parle ici de rapports RADAR/pluvio alors que les facteurs correctifs sont des rapports pluvio/RADAR.

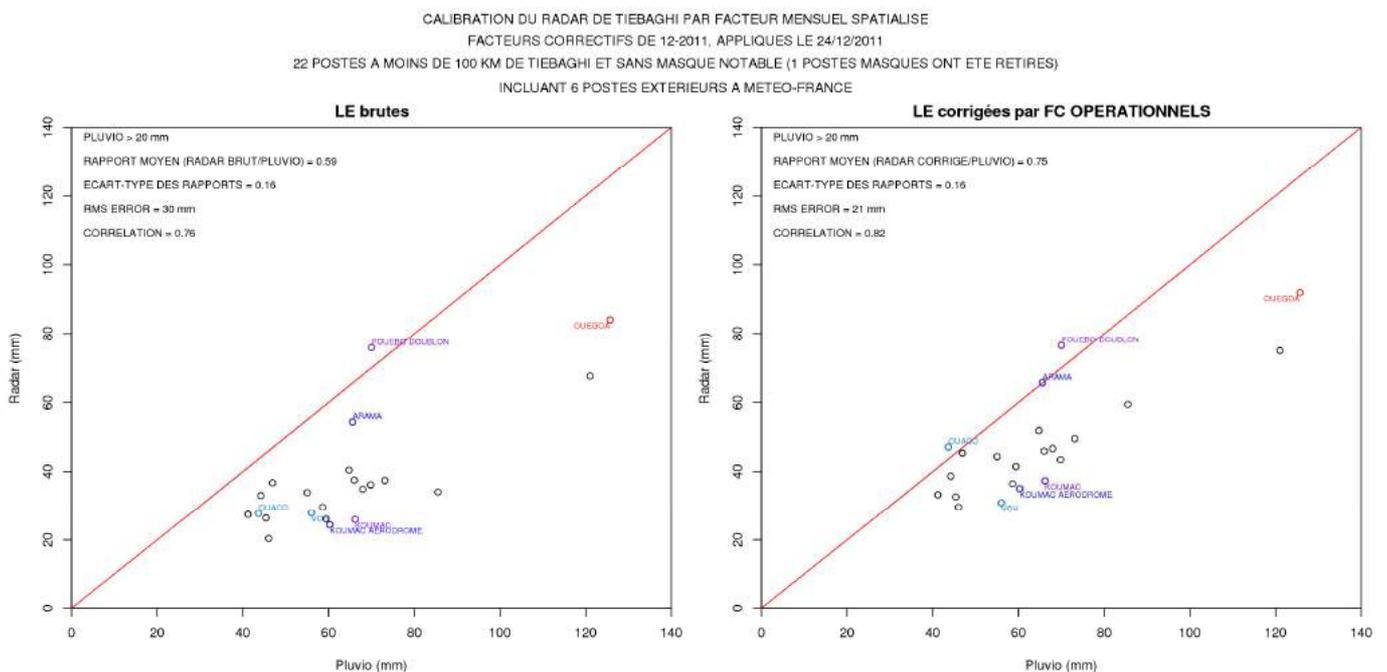


Figure 5 : Evaluation statistique de la qualité des facteurs correctifs mensuels de décembre 2011 appliqués au RADAR de Tiébaghi pour l'épisode du 24 décembre 2011.

3.3.2 Impact du réseau de mesure sur la calibration

La spatialisation des rapports **cumul_pluviomètre/cumul_RADAR** soulève une question supplémentaire : quelle est l'incertitude associée à la valeur du facteur correctif interpolée en un pixel quelconque, où il n'y a pas de poste pluviométrique ?

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

Il est possible d'y répondre en faisant une **validation croisée**, c'est-à-dire en retirant un poste pluviométrique de l'échantillon utilisé pour l'interpolation et en comparant le rapport obtenu alors au rapport de référence que l'on peut calculer en ce poste. On trouve alors que la valeur interpolée est en moyenne égale à la valeur de référence, avec un **écart-type de l'ordre de 30%**. Autrement dit, quand on retire un poste sur les 50 postes environ qui contribuent au calcul de la carte de facteurs correctifs, il peut y avoir une différence de 30% dans la valeur du facteur correctif, ce qui pourrait amener pour l'utilisateur final à un cumul de 130 mm ou de 70 mm au lieu de 100 mm.

Évidemment, ce sont les postes "isolés" qui supportent le moins bien d'être retirés de l'échantillon. Cela souligne l'importance d'avoir un réseau de pluviomètres dense et bien réparti sur tout le domaine.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

4 Travaux pré requis

4.1 Réalisation d'une IHM permettant de rejouer les situations

Pour réaliser cette étude, un logiciel a été créé en interne (par Virgil Cavarero et Thierry Kranitz) pour rejouer les situations sélectionnées avec les données de l'époque, avec et sans facteur correctif. Des tests ont été réalisés pour mettre en évidence l'apport de la donnée mesurée sur l'amélioration de la donnée spatialisée. Tous les résultats ont été critiqués par un utilisateur expert, un chef prévisionniste.

4.2 Choix des situations hydrologiques significatives et des petits bassins versants miniers

Le choix de l'UNC et de l'IRSTEA s'est porté sur cinq situations hydrologiques intenses :

- 1) Le 24 décembre 2011 (ex-dépression tropicale Fina)
- 2) Le 12 mars 2013 (cyclone tropical Sandra)
- 3) Les 2 et 3 juillet 2013 (activité orageuse)
- 4) Les 3 et 4 février 2014 (passage d'un système dépressionnaire dont l'ex-dépression Edna)
- 5) Les 17 et 18 janvier 2014 (dépression tropicale modérée June)

Par ailleurs, quatre sites miniers ont été choisis pour l'étude des petits bassins versants : Goro, Poro, Koniambo et Poum. La taille de certains bassins versant est inférieure à la résolution des RADAR, soit le kilomètre carré.

4.3 Recueil des données

Météo-France dispose de stations pluviométriques automatiques en Nouvelle-Calédonie fournissant des données de pluie au pas de temps 6 minutes. L'ensemble du réseau de pluviomètre est sollicité pour réaliser la calibration. Des données complémentaires ont été fournies par les miniers et la DAVAR.

Certains miniers sont en partenariat avec Météo-France, c'est le cas de VALE pour la zone d'étude de Goro. Ces stations sont assimilées au réseau de Météo-France comme des postes en temps réel, elles n'apparaissent donc pas dans la liste des postes complémentaires mais ont bien été utilisée dans le projet.

Ce recueil de données est indispensable pour l'étude car, en densifiant le réseau de mesures, il est possible de comprendre et d'évaluer l'influence du réseau de mesures sur la détermination du facteur correctif mensuel et ainsi, d'améliorer la qualité de ce dernier.

Il a aussi été nécessaire de définir un pas de temps commun entre les différents réseaux de mesure. Les images radar ont un pas de temps de 5 minutes et les pluviomètres de 6 minutes. Dans un souci d'homogénéiser les données des pluviomètres et des RADAR, le pas de temps le plus fin utilisé dans le cumul des lames d'eau RADAR est de 30 minutes.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

Zones d'étude	Nom de station	Latitude	Longitude	Altitude
Koniambo (KNS)	KNPRG02-RG002	-20,96539656	164,789095	
	KNPRG03	-20,97914771	164,80510815	
	KNPRG05	-21,73063586	165,56909819	
	Voh Tiéta RG006	-20,92783966	164,7346343	
	Vavouto 1 RG007	-21,01303175	164,6988751	
	Massif Talua Gauche RG010	-20,97279041	164,7897937	
	Massif Pandanus-RG011	-21,01384013	164,8309346	
	Talua Gauche UG-RG013	-20,99145674	164,7682781	
	MAR Pandanus-RG018	-21,00514012	164,77178	
	MAR MIA-RG019	-20,99188809	164,7951186	
	RG21_Cuve Golder-RG021	-20,99105828	164,8128803	
Poro (DAVAR)	Poro 1 - Amont-DAVAR	-21,31	165,691	455 m
	Poro 2 - Aval-DAVAR	-21,299	165,702	199 m
	Poro Aubry	-20,89071954	165,26360351	
Poum (SLN)	Poum - Povio SLN	-20,24351238	164,03694729	
	Poum - Tich SLN	-20,24729429	164,0245702	

Figure 6 : Stations extérieures ajoutées à la liste des stations Météo-France pour l'étude.

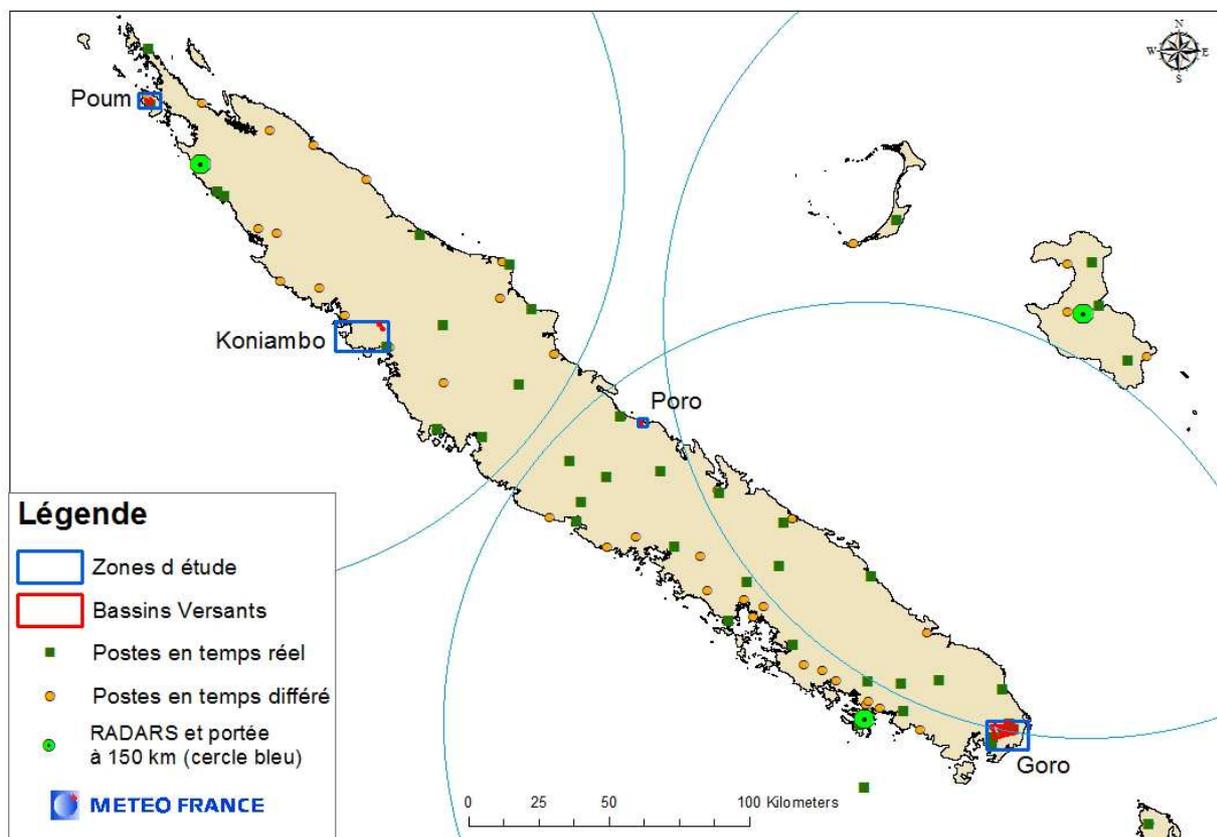


Figure 7: Carte des zones étudiées et du réseau standard de pluviomètres et de RADAR de Météo-France. La portée à 150km de chaque RADAR est représentée par une portion de cercle bleu à titre indicatif.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

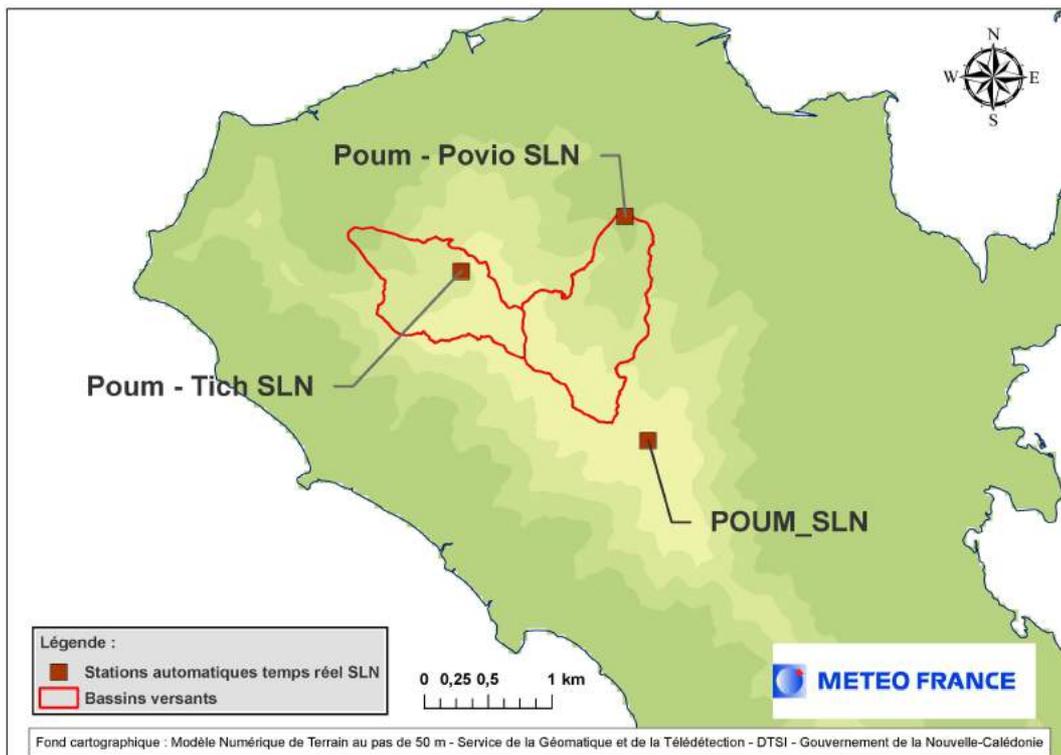


Figure 8 : Site minier de Poum.

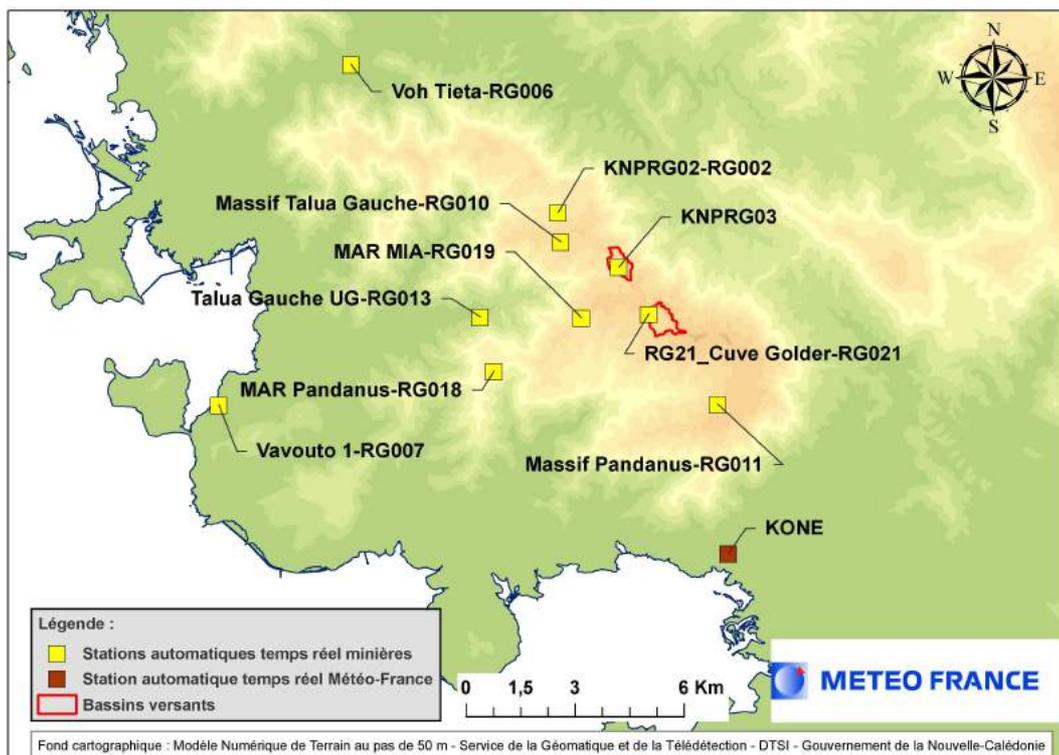


Figure 9 : Site minier de Koniambo.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

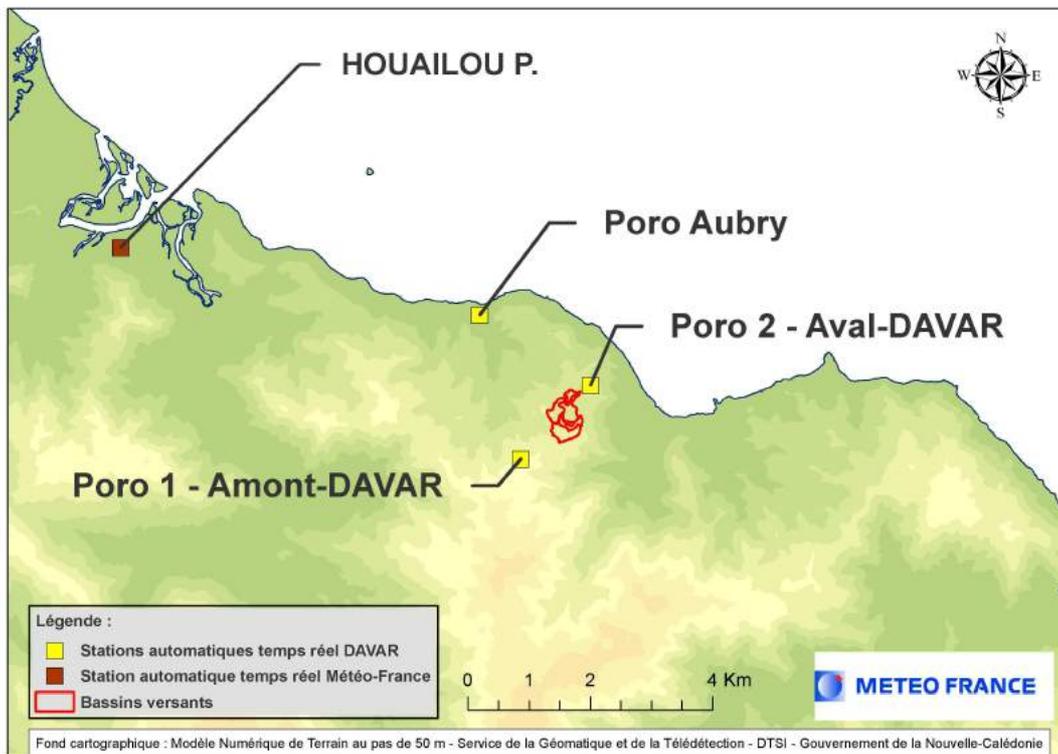


Figure 10 : Site minier de Poro.

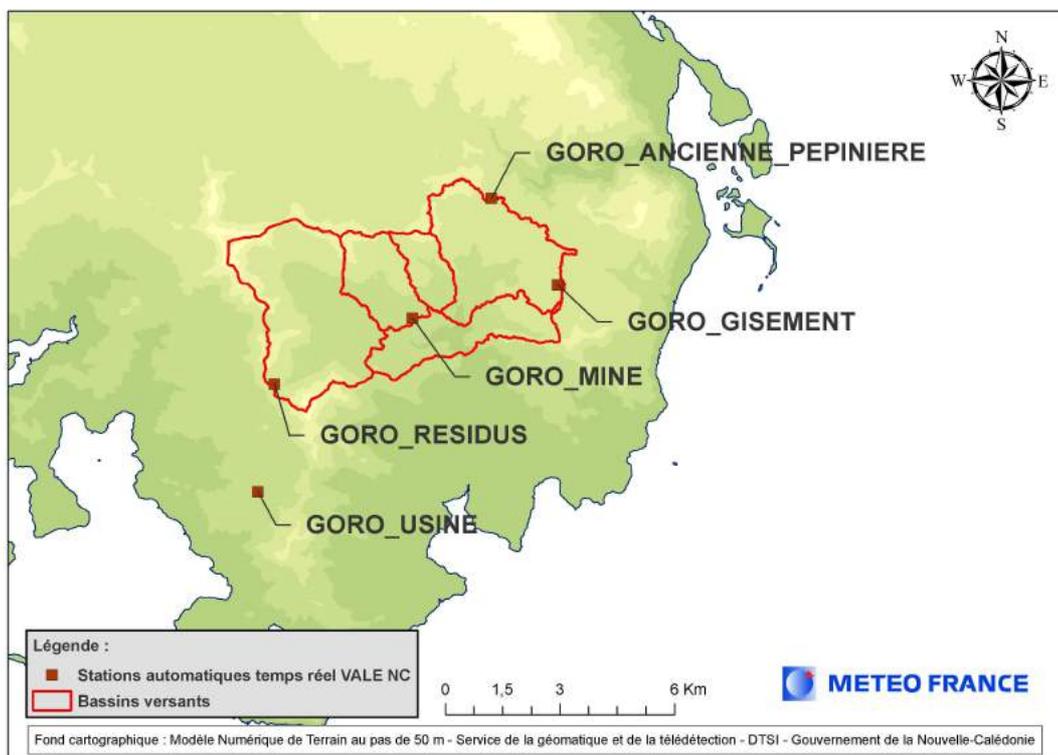


Figure 11 : Site minier de Goro.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

5 Traitement et mise en forme des données

5.1 Sites étudiés par épisode

Les données de pluie 6 minutes fournies par les stations minières et la DAVAR ont été intégrées au calcul des lames d'eau RADAR. Les stations Météo-France aux données douteuses (parce que le pluviomètre était bouché par exemple) ont été évincées des calculs.

Un épisode pluvieux donné ne touche pas l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie avec la même intensité. C'est pourquoi, pour une situation donnée, nous n'étudierons que certains sites, en fonction de la situation météorologique et parfois du RADAR qui peut tomber en panne au moment de l'épisode. C'est d'ailleurs pour cette dernière raison que la situation du 12 mars 2013 ne sera finalement pas étudiée car le RADAR de Tiébaghi était en panne (voir Tableau 1).

	Poum	Koniambo	Poro	Goro
24 décembre 2011	Tiébaghi	Tiébaghi	Lifou	Lifou
12 mars 2013	Radar de Tiébaghi en panne.			
2 juillet 2013			Lifou	Lifou
17-18 janvier 2014	Tiébaghi		Lifou	
3-4 février 2014		Tiébaghi	Lifou	

Tableau 1 : Sites étudiés (en vert) et RADAR sélectionnés.

5.2 Carte de lames d'eau RADAR et graphiques associés

Deux types de produits sont réalisés à partir de l'outil développé en interne permettant de rejouer des situations et de produire de nouvelles lames d'eau calibrées en fonction de données mesurées par les pluviomètres, les cartes VIRAP et des séries comparatives chronologiques.

- Des cartes **VIRAP (Visualisation des RAPports radar/pluviomètres)**

L'image d'une **lame d'eau RADAR** calibrée (ou corrigée) se présente sous la forme de plages de couleurs représentant les cumuls vus par le RADAR. Les postes de mesure pluviométrique sont représentés sous la forme d'un triangle ou d'un carré, en fonction du ratio **cumul mesuré au pluviomètre/cumul estimé par le RADAR** qu'ils présentent. Ces ratio figurent sur la carte : le chiffre du haut indique la mesure du pluviomètre, le chiffre du bas celle calculée par le RADAR. Enfin, la légende sous la carte indique le nombre de rapports cumul pluvio/cumul RADAR.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

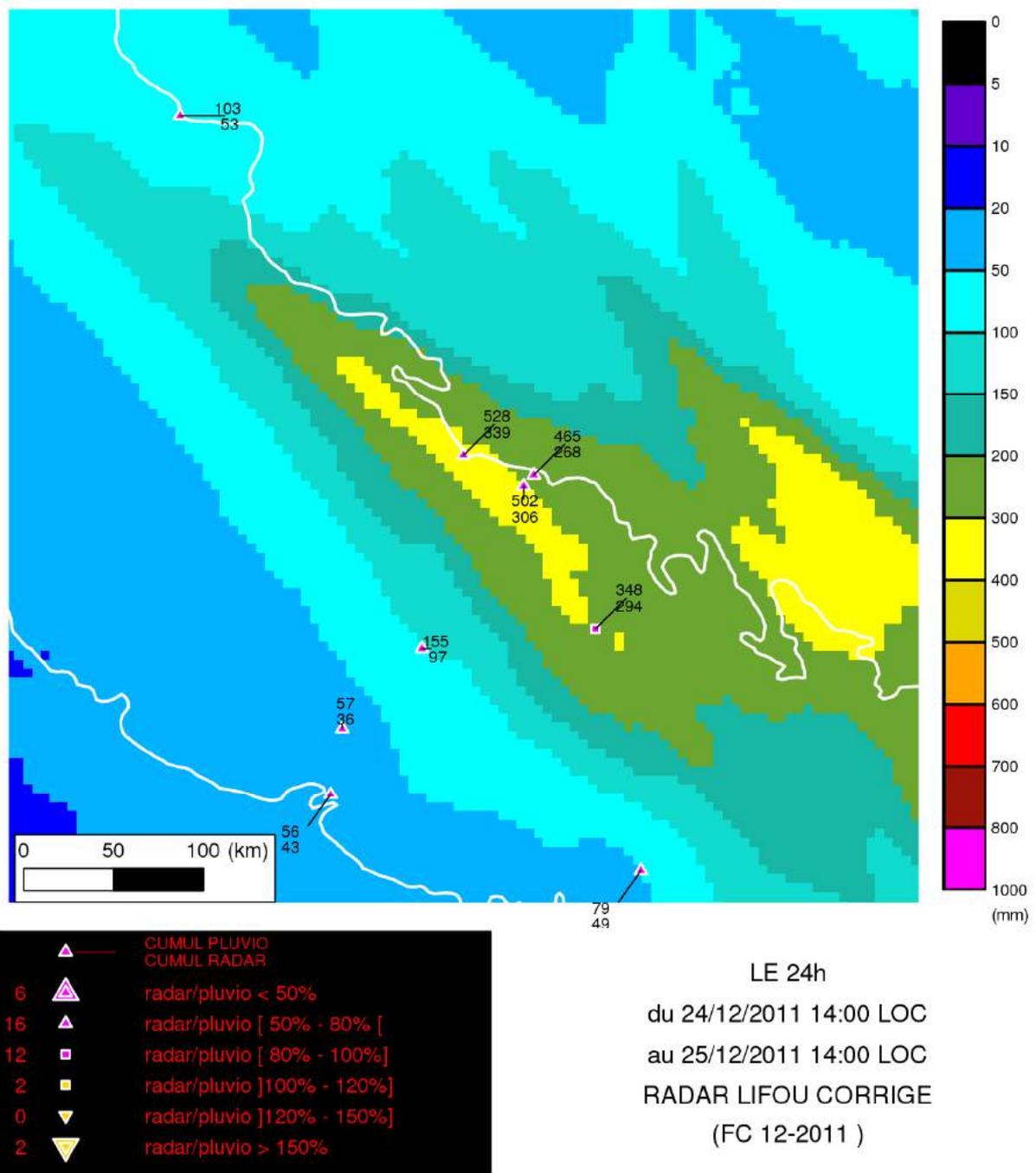


Figure 12: Lame d'eau calibrée du RADAR de Lifou, d'une profondeur de 24h, entre le 24/12/2011 14h locales et le 25/12/2011 14h locales, centrée sur le site de Poro. La correction utilise le facteur correctif mensuel de décembre 2011 qui aurait été opérationnel le 24/12/2011.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

- Des **séries temporelles** par poste.

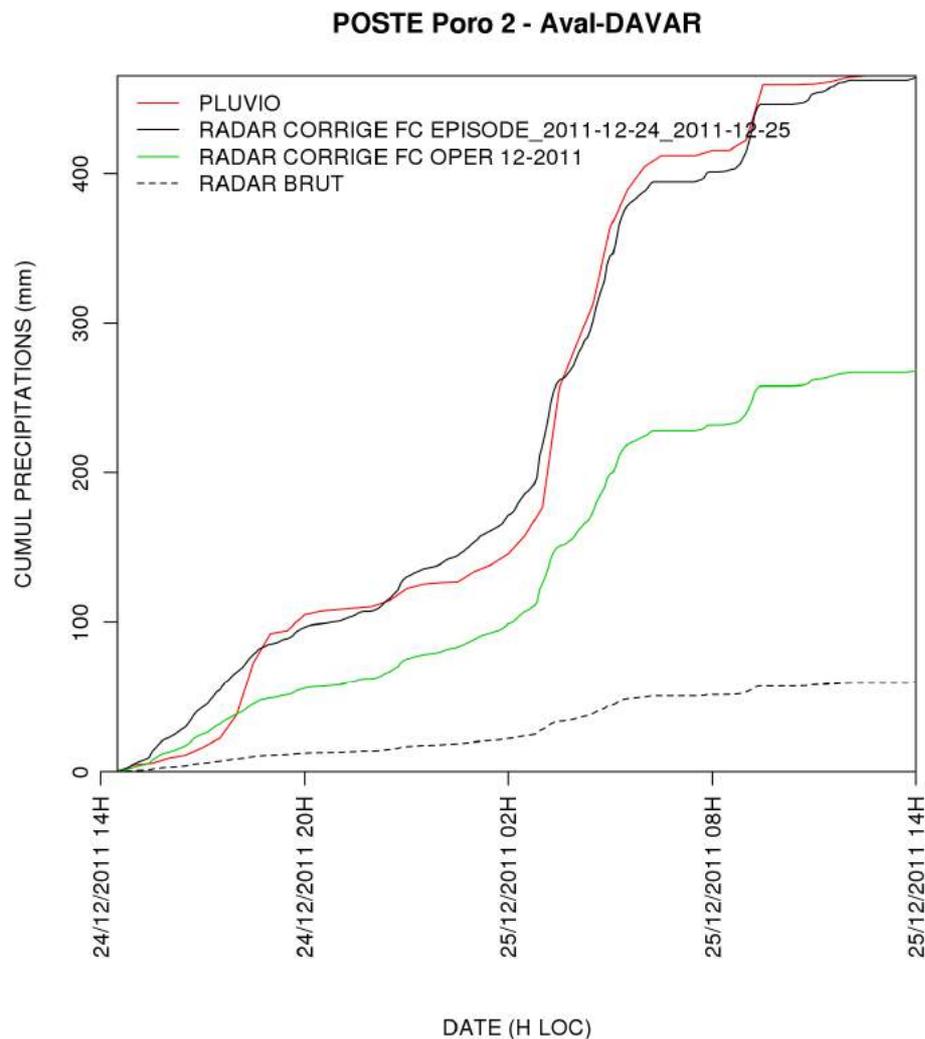


Figure 13 : série temporelle pour le poste de Poro 2 – Aval (DAVAR) entre le 24/12/2011 14h locales et le 25/12/2011 14h locales.

La série temporelle représente le cumul semi horaire des précipitations mesuré sur une période 24 heures du pluviomètre d'un poste en particulier (le poste de Poro 2- Aval de la DAVAR, en l'occurrence sur la figure et les cumuls du RADAR (brut, corrigé avec le facteur mensuel et corrigé avec le facteur épisodique). Cette série permet d'apprécier la qualité de la correction apportée au RADAR.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

6 Situation de Noël 2011 : FINA

Cette situation présente l'avantage de disposer des trois RADAR opérationnels et d'avoir balayé l'ensemble des zones d'étude. Il est proposé une analyse détaillée des résultats sur chaque site de la performance des lames d'eau RADAR calibrées.

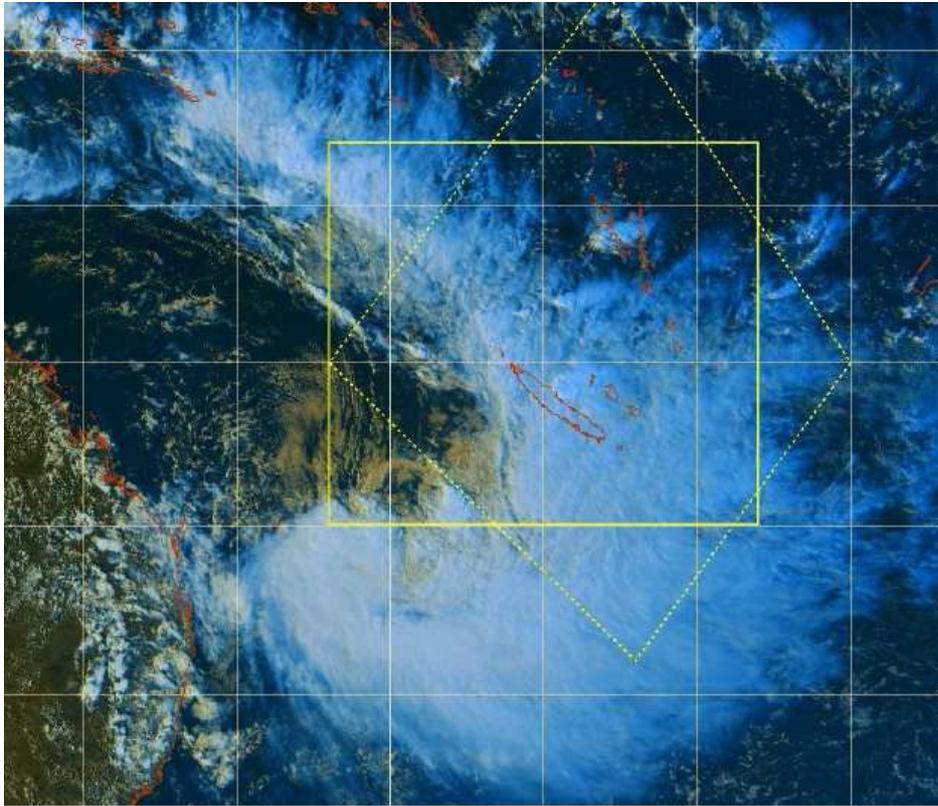


Figure 14 : Image satellite composition colorée le 24 décembre 2011 à 16h00 locales.

6.1 Résumé météorologique

Le 24 décembre 2011, la Nouvelle-Calédonie se trouve sous l'influence de l'ex-dépression tropicale « FINA ». A 17 heures locales, cette dernière se localise à environ 900 km dans l'ouest de Nouméa et à environ 250 km au sud des Chesterfield et se déplace vers le sud-sud-est. Des cellules orageuses, alors portées dans un flux de secteur Nord, se bloquent sur les versants est de la chaîne où de fortes averses sont observées à partir de la fin de journée du 24 décembre. Ces pluies atteignent leur paroxysme en fin de nuit suivante, sur le sud de la côte Est et l'extrême sud de la Grande Terre, avant de lentement s'évacuer vers l'île des Pins et les Iles Loyauté en cours de journée du 25.

Les pluies ont d'abord concerné la partie nord du territoire avant de se renforcer en descendant vers le sud, et c'est sur la **côte Est** et l'**extrême Sud de la Grande Terre** que les averses orageuses ont été les plus intenses. Ainsi, parmi les 4 sites d'observation, les zones de **Poro** et de **Goro** ont été les plus exposées aux fortes pluies. **Poum** a été moins concerné car les noyaux de fortes précipitations se sont déplacés à l'est de la zone. Enfin, à **Koniambo**, les pluies se sont concentrées sur le versant nord-est du massif.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

6.2 Site de Poro.

La lame d'eau RADAR calibrée avec le FC mensuel (FC OPER) localise assez bien le gradient de cumuls entre Poindimié et Houaïlou, ainsi qu'entre les stations de la chaîne et celles de la côte Est. Même si le traitement via le facteur correctif mensuel opérationnel des données RADAR sous-estime les cumuls, on voit quand même les noyaux de fortes précipitations (supérieures à 300 mm) sur le versant est du relief dans la zone entre Houaïlou et Kouaoua ainsi que leur étendue vers le nord, en dehors de la zone de mesure des pluviomètres.

Avec l'utilisation du FC EPISODE, on constate que la zone de fortes pluies est plus étendue, l'extension du noyau de fortes précipitations vers le nord de la zone est confirmée. De plus, les Rapports cumul Pluviomètre / cumul RADAR (RPR) sont proches de 1. Dans ce cas-ci, la calibration avec le FC épisode apporte une nette amélioration à la qualité de l'image RADAR.

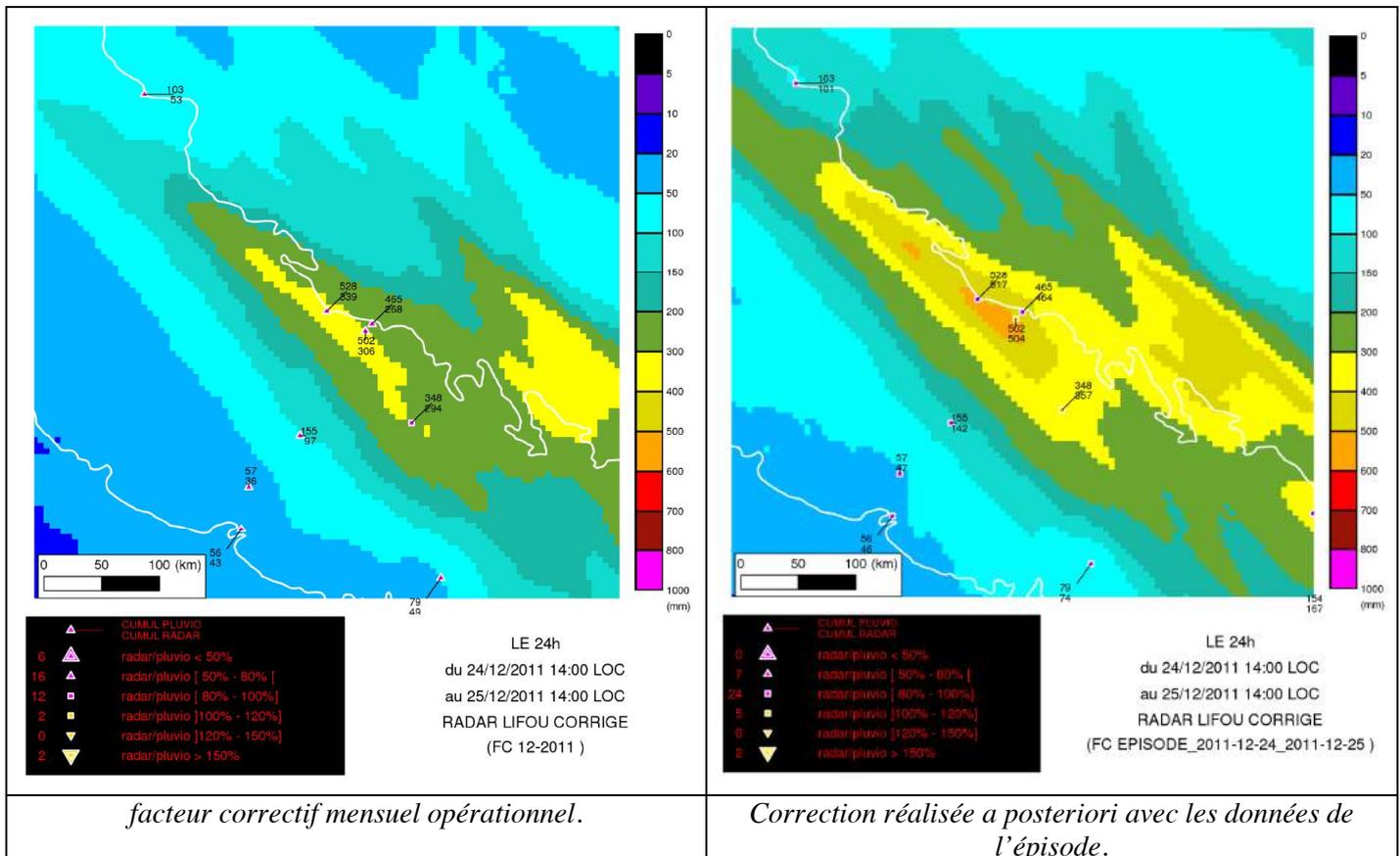


Figure 15: Lames d'eau corrigées du RADAR de Lifou entre le 24/12/2011 14h locales et le 25/12/2011 14h locales, centrée sur le site de Poro.

Sur le graphique (Figure 16), on voit que le FC EPISODE (courbe noire) améliore nettement les valeurs RADAR obtenues par le FC OPER (courbe verte) de 50% environ sur l'ensemble de la période de 24 heures. Cependant, on constate que le FC EPISODE semble trop fort et linéaire pendant les six premières heures, il est supérieur aux données mesurées par le pluviomètre (en rouge). La lame d'eau

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

calibrée opérationnelle présente toutefois des améliorations significatives par rapport à une lame d'eau brute (en pointillés sur le graphique).

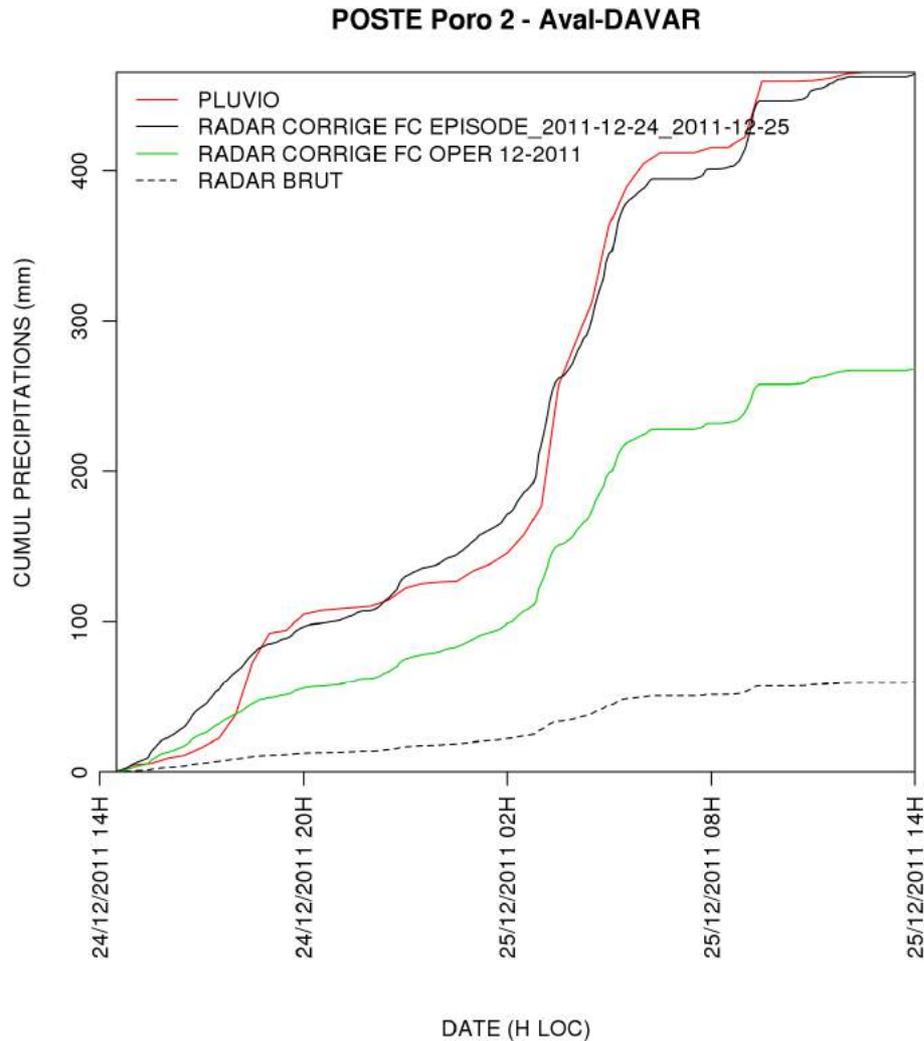


Figure 16: série temporelle pour le poste « Poro 2 – Aval (DAVAR) » entre le 24/12/2011 14h locales et le 25/12/2011 14 h locales.

Les courbes du graphique (Figure 17) montrent que l'épisode de pluie entre 18h et 19h semble non détecté par le RADAR de Lifou. En revanche, l'épisode entre 03h et 04h du 25/12 semble bien vu par le RADAR. Lorsqu'on analyse les images des deux épisodes au pas de temps horaire (Figure 18), on peut remarquer que lors du premier épisode (de 18h à 19h le 24/12), le noyau de forte précipitation est situé dans un vaste système qui s'étend de la côte à Lifou. Ce n'est pas le cas pour le second épisode (de 03h à 04h le 25/12). L'épisode est plus localisé sur Poro et il y a moins de nuages pluvieux sur l'axe Lifou-Poro.

Cela permet de mettre en évidence les **phénomènes d'atténuation** générés par les rideaux de pluies. C'est une composante que les prévisionnistes retrouvent assez régulièrement en opérationnel.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

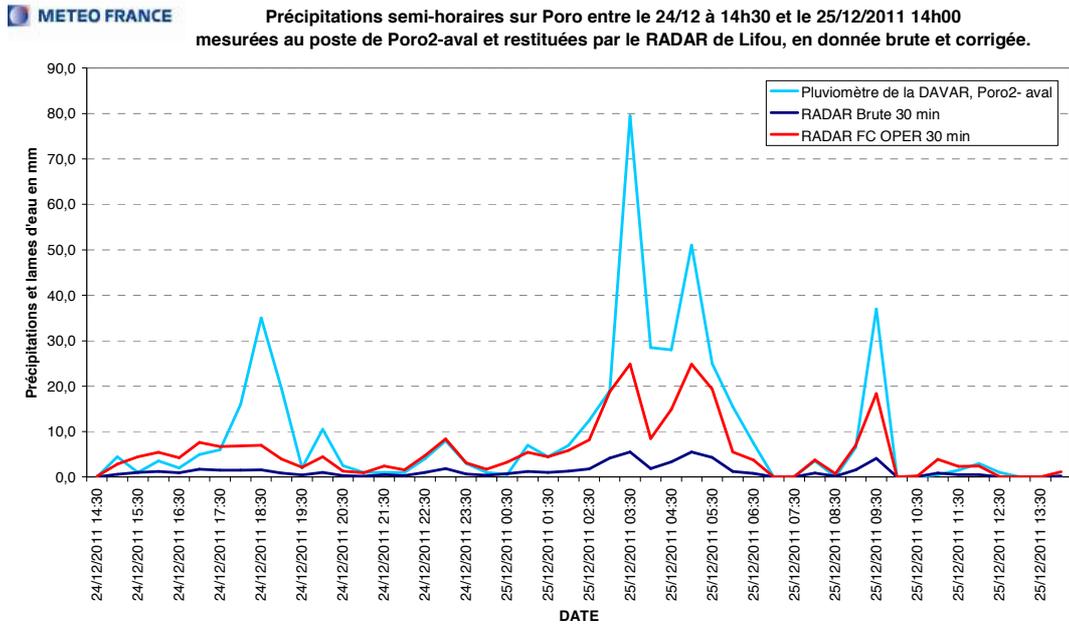


Figure 17 : série temporelle pour le poste « Poro 2 – Aval (DAVAR) » entre le 24/12/2011 14h locales et le 25/12/2011 14h locales.

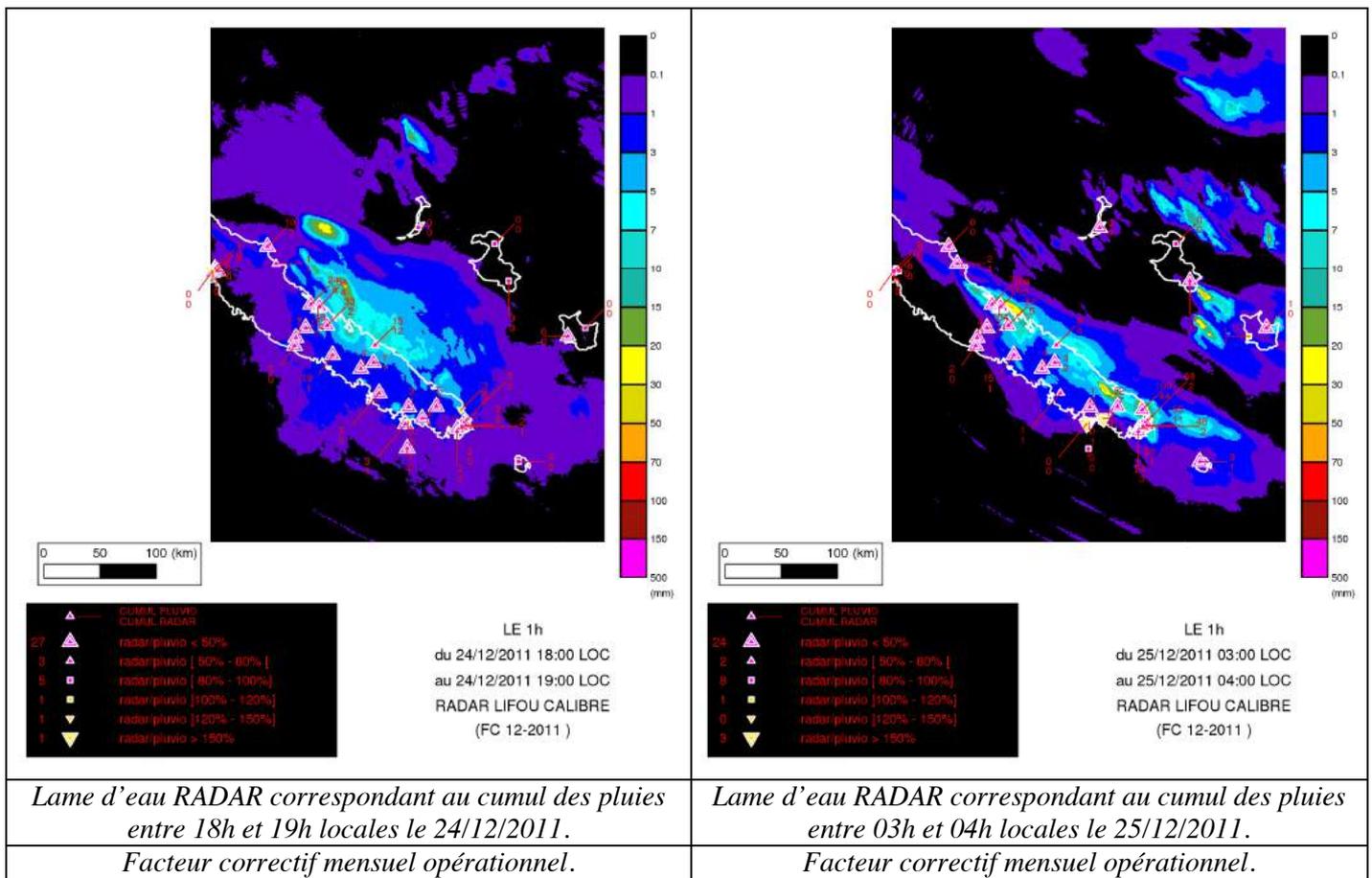
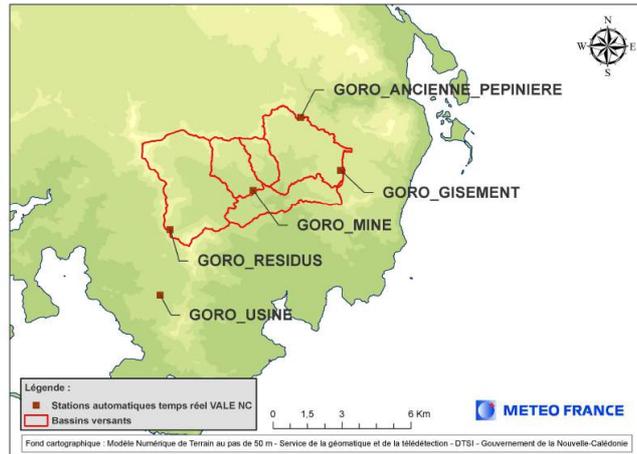


Figure 18 : mise en évidence des phénomènes d'atténuation dus aux rideaux de précipitations entre le RADAR et la zone d'étude (ici Poro).

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

6.3 Site de Goro



La lame d'eau RADAR FC OPER montre un noyau de précipitations (supérieures à 500 mm) bien concentré dans l'est de Goro et plutôt bien corrélé avec les mesures des pluviomètres. La correction FC EPISODE améliore légèrement, mais peu la spatialisation des valeurs intenses cumulées sur 24 heures sur la moitié orientale de la carte (Figure 19). Cela s'explique par le fait que les postes de VALE sont déjà pris en compte dans la calibration mensuelle opérationnelle et que nous n'avons pas enrichi le réseau de stations complémentaires pour le calcul du FC EPISODE.

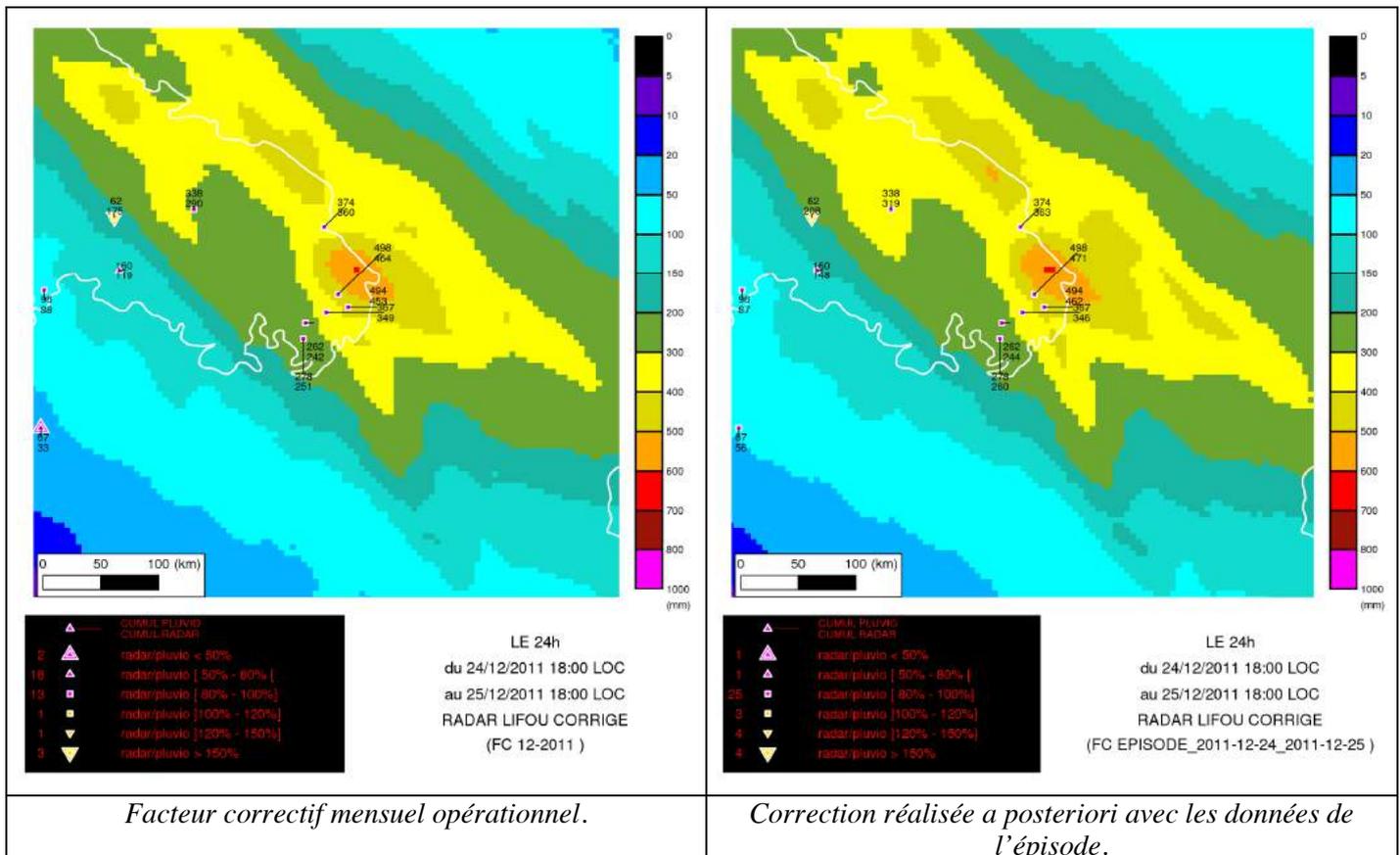


Figure 19: Lames d'eau corrigées du RADAR de Lifou entre le 24/12/2011 18h locales et le 25/12/2011 18h locales, centrée sur le site de Goro.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

Sur la série temporelle, on constate la bonne qualité des cumuls mesurés par le RADAR corrigé, très proches des cumuls mesurés à la station, notamment jusqu'à minuit en heure locale (Figure 20). Les données recueillies indiquent des intensités proches de 10 mm/h. Ensuite, entre 02h00 et 06h00 du matin, à l'approche des cellules précédemment sur Poro, on enregistre entre 35 et 55 mm/h. La sous-estimation des intensités maximales s'explique en partie par le phénomène d'atténuation des précipitations.

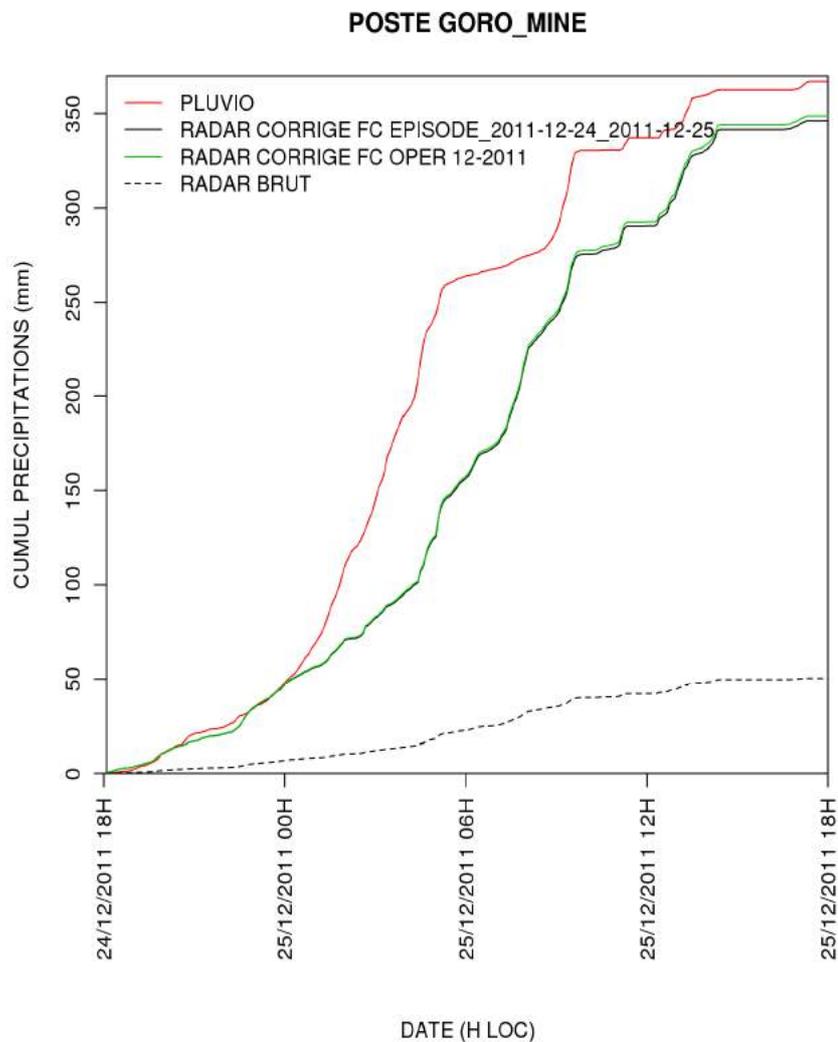


Figure 20: Série temporelle pour le poste GORO_MINE (METEO-FRANCE) entre le 24/12/2011 18h locales et le 25/12/2011 18h locales.

En conclusion, les lames d'eau proposées par le RADAR de Lifou présentent des perspectives d'utilisation intéressantes pour la zone de Goro. Il convient de ne pas exclure le RADAR de Nouméa pour l'étude des zones sur l'extrême ouest de la zone.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

6.4 Site de Poum

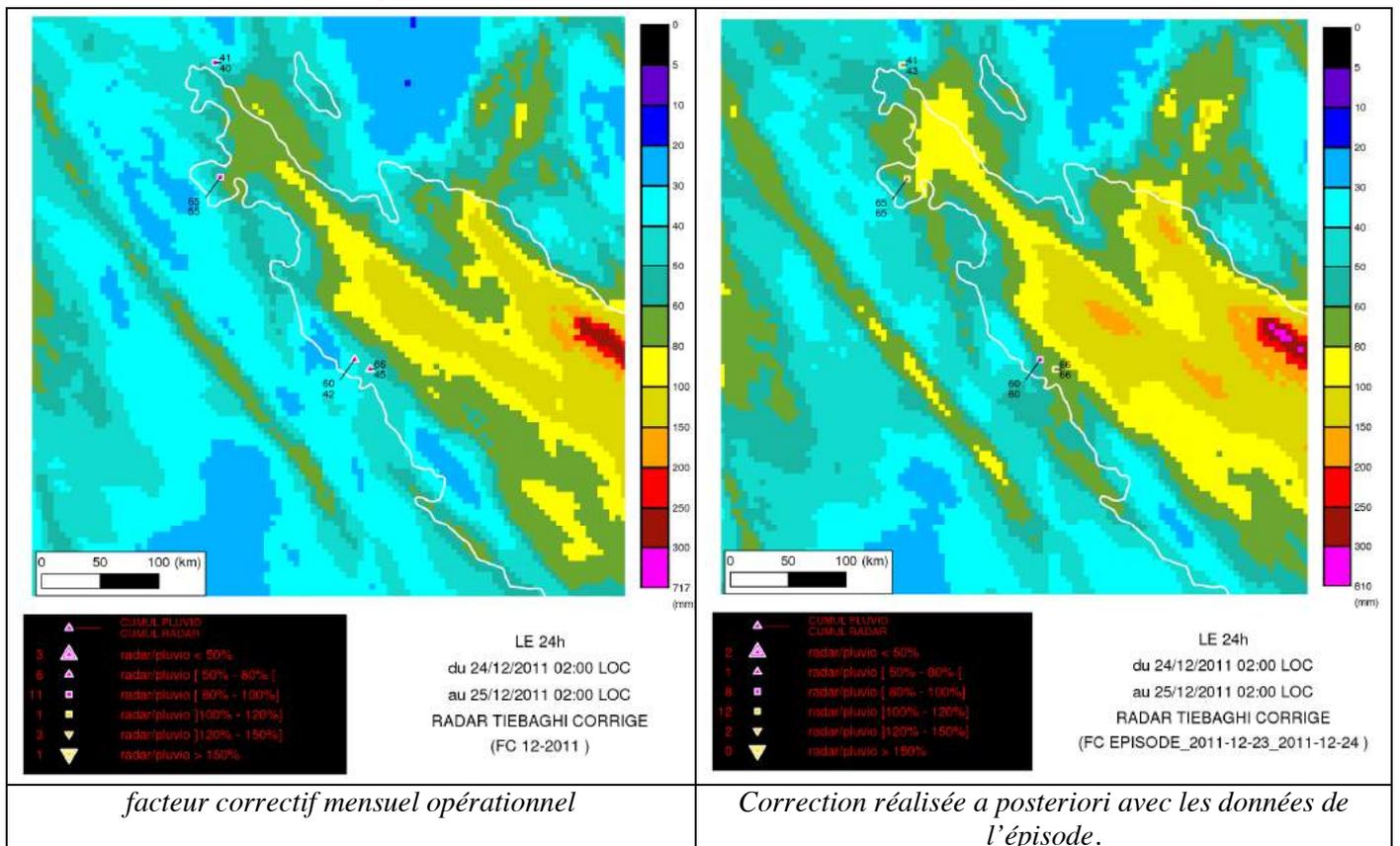
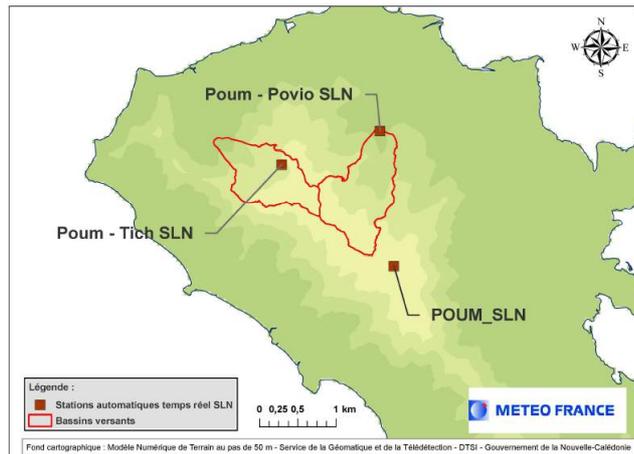


Figure 21 : Lames d'eau corrigées du RADAR de Tiébaghi entre le 24/12/2011 02h locales et le 25/12/2011 02h locales, centrée sur le RADAR de Tiébaghi.

Le RADAR sélectionné pour l'étude de Poum est celui de Tiébaghi, il est situé à moins de 30km de distance de la zone en hauteur. Poum n'a pas été la plus concernée par les plus fortes pluies de l'ex-dépression FINA. Pour cet épisode, le massif était uniquement équipé de la station partenaire de Météo-France dénommé « Poum SLN ». Les cartes des lames d'eau montrent que les mesures du RADAR sont assez proches des cumuls enregistrés par les pluviomètres (Figure 21). On remarque également une amélioration de la qualité des données sur la carte réalisée par le FC-EPISODE qui se traduit par l'extension des zones intenses.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

Sur la série temporelle, on voit que les pics d'intensité enregistrés par le pluviomètre sont les mêmes que ceux mesurés par le RADAR (Figure 22). Le RADAR utilisant un facteur correctif FC OPER présente une bonne corrélation avec le pluviomètre tant dans la chronologie de l'épisode que pour les quantités mesurées.

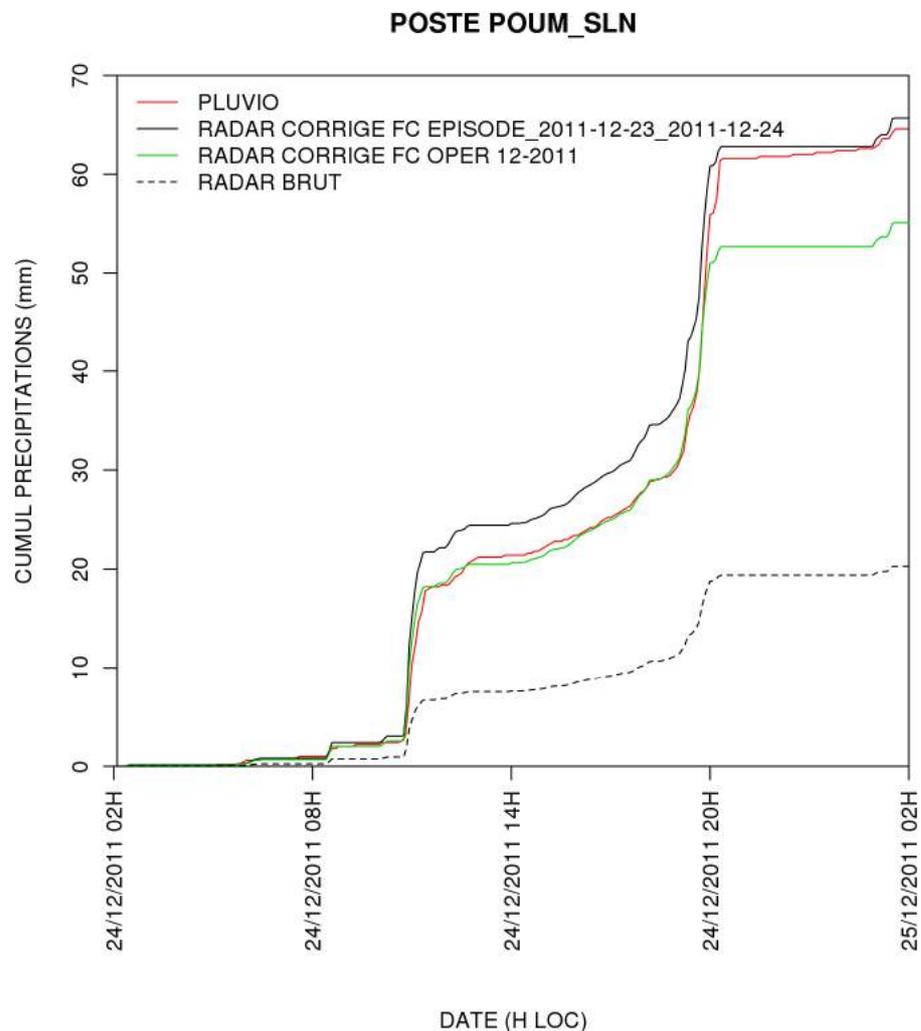


Figure 22: série temporelle pour le poste POUM_SLN (METEO-FRANCE) entre le 24/12/2011 02h locales et le 25/12/2011 02h locales.

En conclusion, les lames d'eau proposées par le RADAR de Tiébaghi présentent des perspectives d'utilisations intéressantes pour la zone de Poug.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

6.5 Site de Koniambo

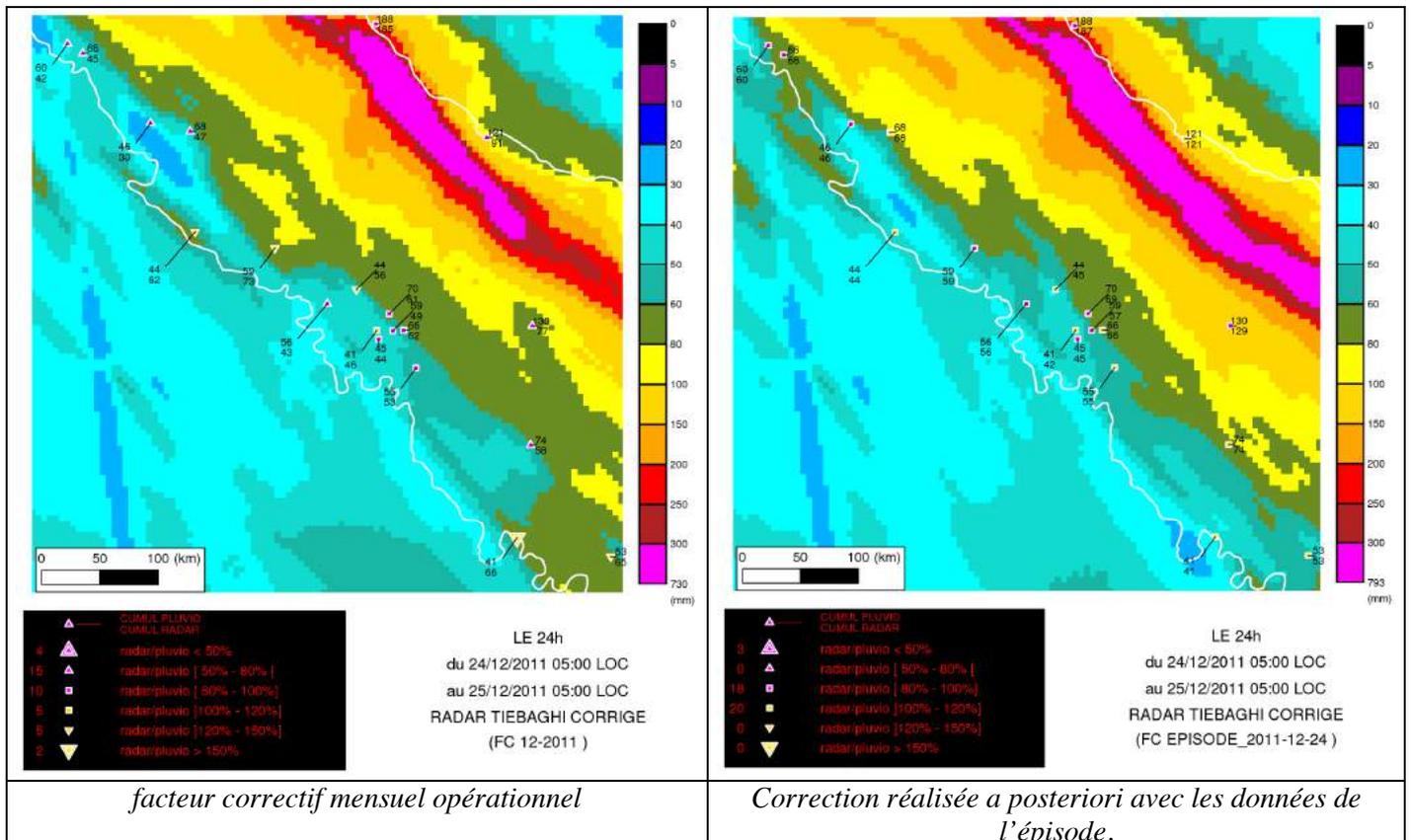
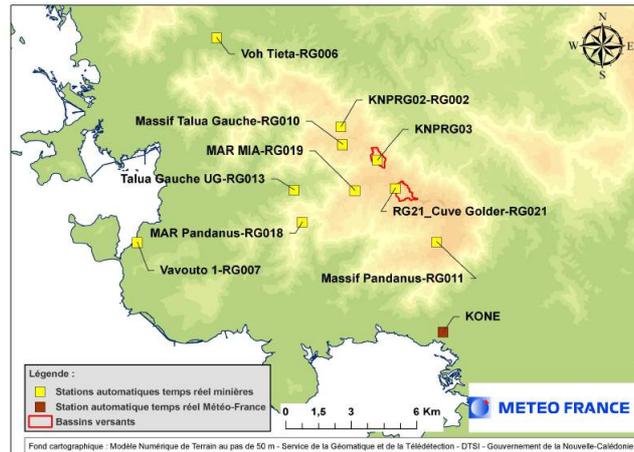


Figure 23 : Lames d'eau corrigées (facteur correctif mensuel) du RADAR de Tiébaghi entre le 24/12/2011 05h locales et le 25/12/2011 05h locales, centrées sur le poste Météo-France de Koné.

Comme pour Poum, on distingue nettement la différence de pluviométrie entre le bassin de Oundjo et le bassin de Voh. Les pluies au nord-est du massif du Koniambo sont plus conséquentes. Les stations proches des crêtes enregistrent des valeurs proches de 60-70 mm en 24h alors que celles en contrebas du massif, comme à Vavouto, mesurent des valeurs plus faibles, de l'ordre de 40 mm en 24h.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

La série temporelle du poste de KNPRG02-RG002 met en évidence la qualité du RADAR avec une correction FC OPER (Figure 24). En effet, même si ce poste n'est pas pris en compte dans le calcul du FC OPER, les quantités estimées par le RADAR sont corrélées avec les données du pluviomètre.

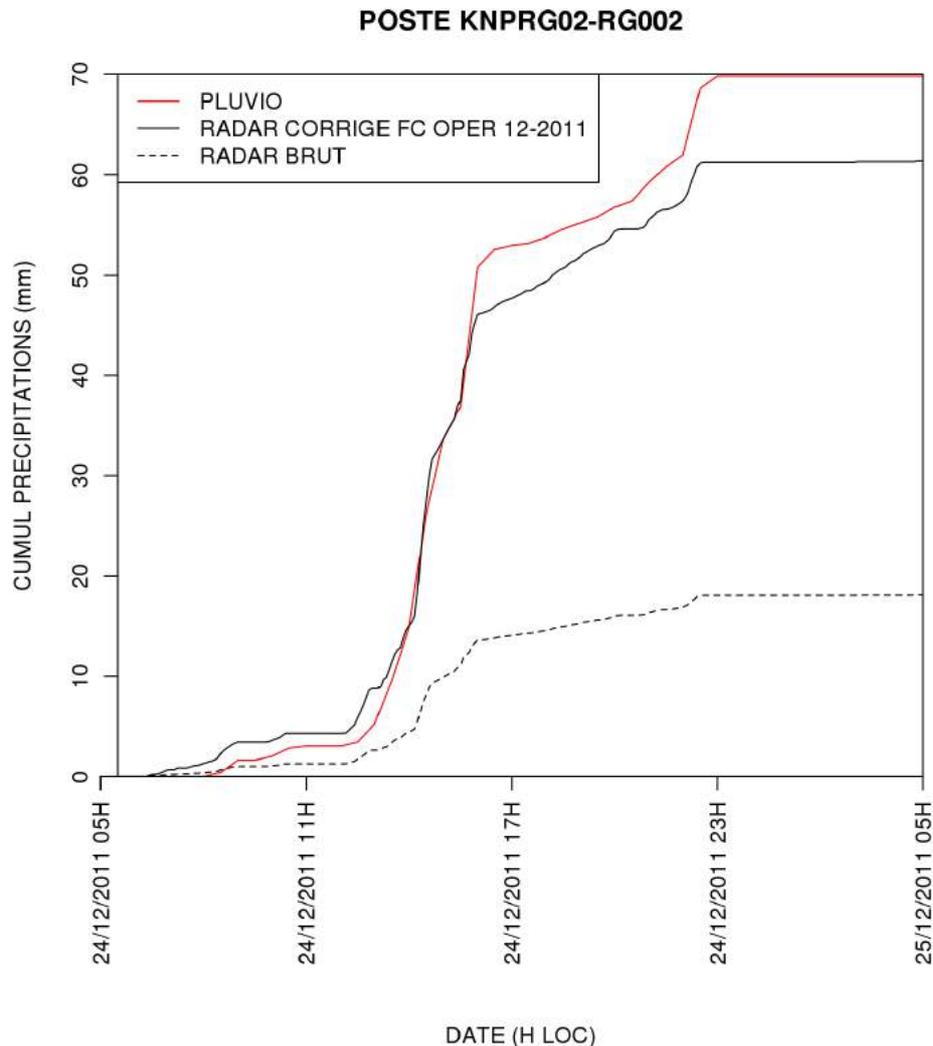


Figure 24 : Série temporelle pour le poste KNPRG02-RG002 situé sur le massif du Koniambo (DAVAR) entre le 24/12/2011 05h locales et le 25/12/2011 05h locales.

En conclusion, les lames d'eau proposées par le RADAR de Tiébaghi présentent des perspectives d'utilisation intéressantes pour la zone de Koniambo.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

7 Situation du 2-3 juillet 2013

7.1 Résumé météorologique

Les 2 et 3 juillet 2013, l'apport d'air chaud et humide en basse couche dans un flux de nord-est a provoqué des précipitations diluviennes sur la chaîne et le quart sud-est de la Grande Terre.

Le 2 juillet, un vaste ensemble orageux se forme dans la région de Poindimié et se déplace lentement vers le sud-est en longeant la côte Est, apportant des quantités de pluie très importantes sur l'est et le sud de la Grande Terre. Dans la nuit du 02 au 03/07, alors que la première vague orageuse s'évacue, des conditions atmosphériques propices aux orages abordent le pays par l'ouest. Elles régénèrent l'activité orageuse qui va persister sur le quart sud-est de la Grande Terre jusqu'en milieu de journée du 03/07.

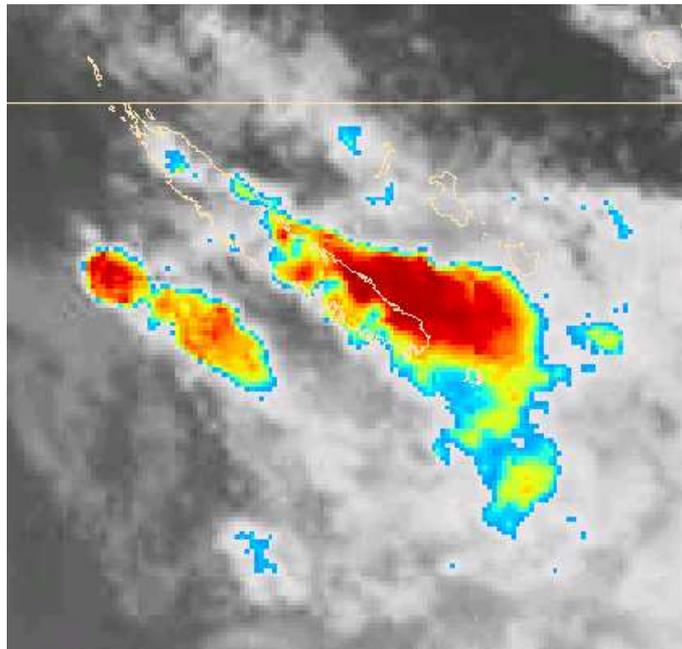


Figure 25: Image dans la gamme infrarouge produite par le satellite MTSAT02 le 02/07/2013 à 18h locales (GMT +11). Les cellules orageuses figurent en orange et rouge. Source : Météo-France.

Les mesures effectuées en continu par les pluviomètres automatiques du réseau de Météo-France, les quantités de pluies relevées par les observateurs bénévoles sur une journée (de 05h à 05h), les quantités de précipitations déduites des mesures des 3 RADARs météorologiques, ainsi que les images du RADAR embarqué sur le satellite TRMM, mettent en évidence que les pluies les plus conséquentes ont affecté le **quart sud-est de la Grande Terre**, ainsi que le **Grand Sud**.

Pour cet épisode, il est donc intéressant d'étudier l'apport des lames d'eau RADAR sur les zones de **Poro** et de **Goro**.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

7.2 Site de Poro

Sur la lame d'eau, un noyau de fortes précipitations est visible à l'intérieur des terres, le long de la côte Est (Figure 26). Le pluviomètre de Houailou se situe aux abords de ce noyau. Les pics d'intensité visibles sur les séries temporelles sont en phase. Néanmoins, les écarts entre les données mesurées au pluviomètre et celles mesurées par le RADAR s'expliquent de nouveau par l'atténuation des précipitations entre Poro et le RADAR de Lifou.

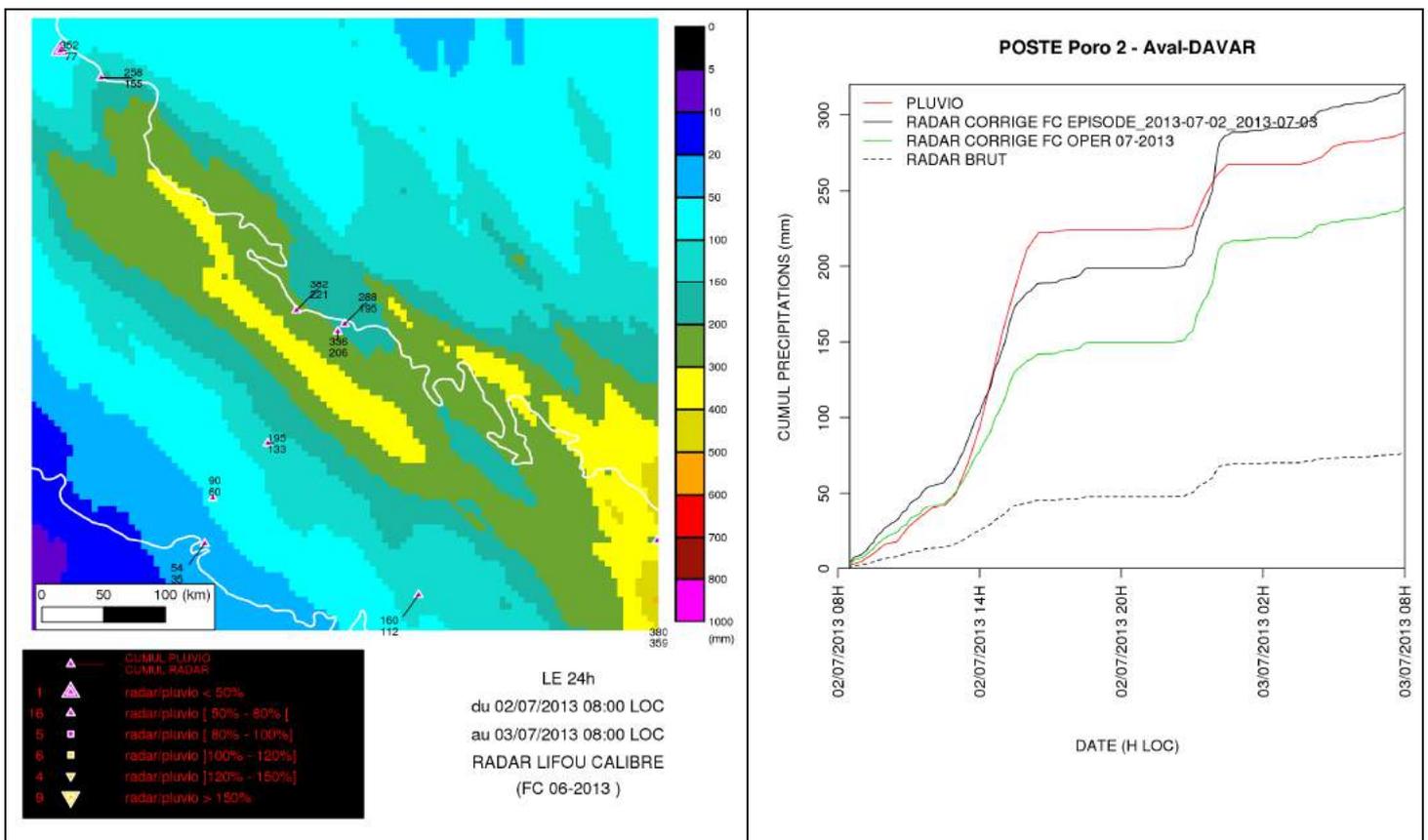
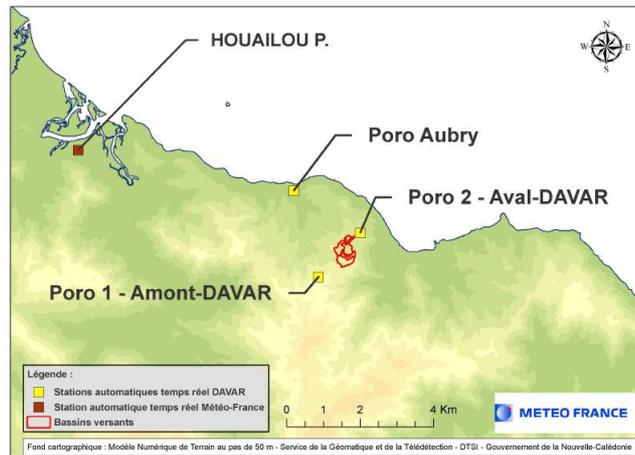


Figure 26: Lame d'eau corrigée (FC OPER) de Lifou centrée sur le site de Poro et séries temporelles associées entre le 02/07/2013 08h locales et le 03/07/2013 08h locales.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

7.3 Site de Goro

L'image RADAR permet de voir les précipitations les plus fortes tombées durant cet épisode au niveau du massif du Humboldt. La région de Goro cumule des quantités d'eau comprises entre 400 et 500mm entre 14h00 le 02 juillet et 14h00 le 03 juillet. Les résultats obtenus pour le RADAR en FC OPER sont pour certains postes proches de ceux mesurés aux pluviomètres (erreur inférieure à 20%).

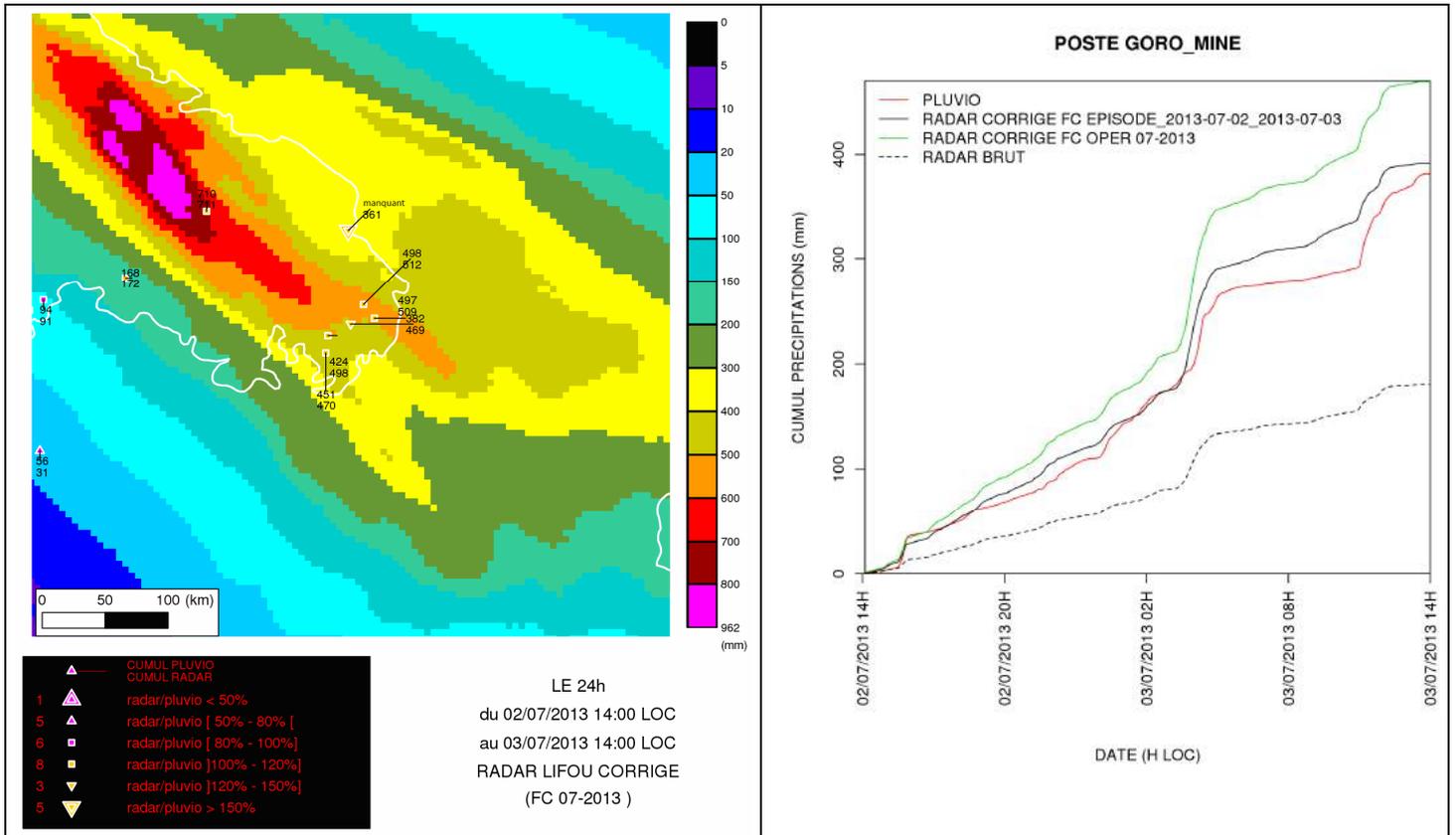
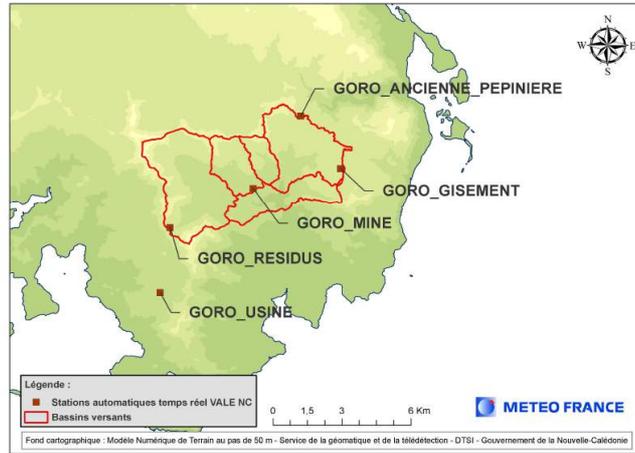


Figure 27: Lame d'eau corrigée (facteur correctif mensuel) du RADAR de Lifou centrée sur le site de Goro entre le 02/07/2013 14h locales et le 03/07/2013 14h locale et les séries temporelles associées.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

8 Situation du 17-18 janvier 2014: JUNE

8.1 Résumé météorologique

La dépression tropicale modérée JUNE se situe à environ 280 km dans le nord nord-ouest des îles Bélep le vendredi 17 janvier à 17 heures (heure de Nouméa). Dans la nuit de vendredi à samedi, son intensité reste stable tandis qu'elle se déplace vers le sud sud-est, ce qui l'amène à 65 km dans le nord-ouest de Bélep au lever du jour. Poursuivant sa trajectoire, elle passe à 20 km dans l'ouest de Koumac puis à 50 km de Koné vers 17 heures locales. Elle est alors à son maximum d'intensité qu'elle maintient, tout en poursuivant en direction du sud sud-est durant la nuit de samedi à dimanche, ce qui l'écarte très de la Grande Terre.

Les précipitations ont certes concerné l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie, mais ce sont surtout les communes du **nord de la côte Ouest** et celles de la **côte Est** qui ont été touchées par les averses les plus soutenues. Cependant, seul le site retenu pour l'étude des lames d'eau RADAR durant cet épisode est **Poum**.

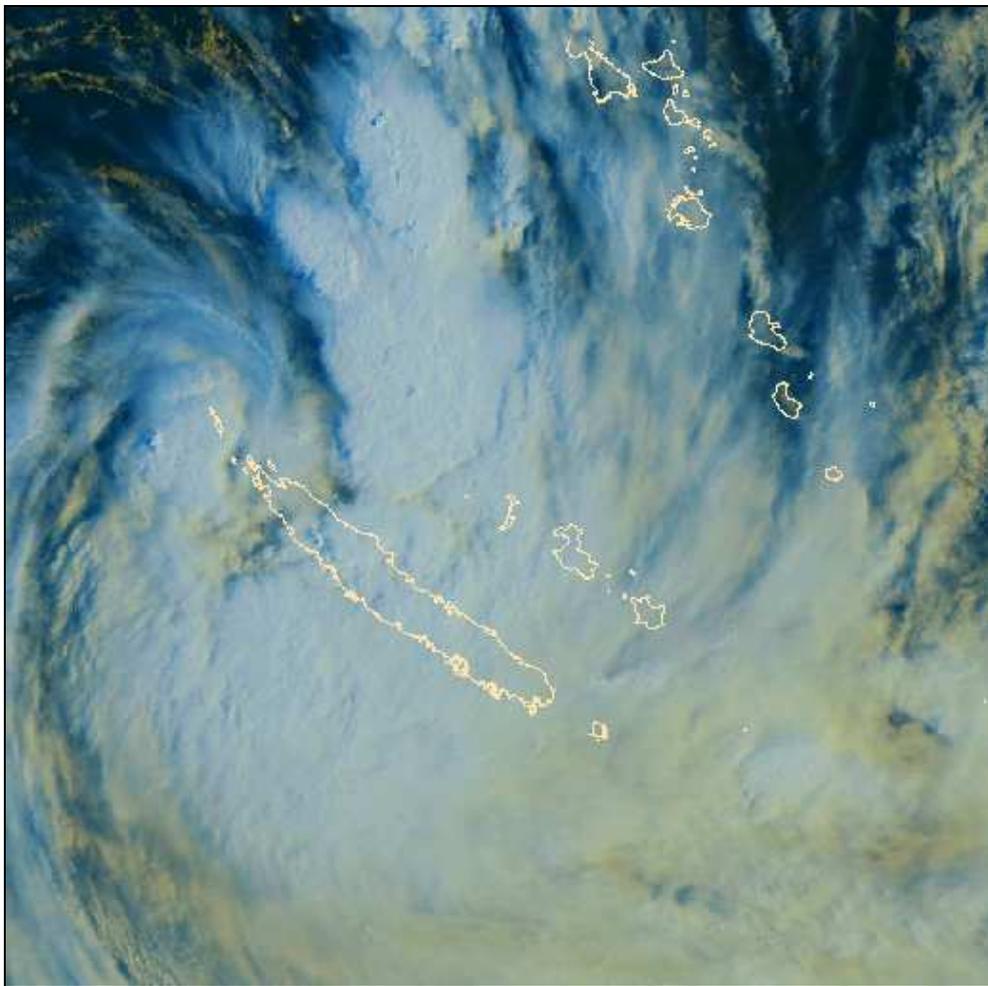


Figure 28 : Composition colorée d'images issues du satellite MTSAT-2 – 18/01/2014 à 8h locales.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

8.2 Site de Poum

Les quantités d'eau mesurées par le RADAR de Tiébaghi sont inférieures à celles relevées par les pluviomètres, notamment sur Povio, d'un facteur 2. Dans ce cas, l'atténuation par les précipitations n'est plus l'unique explication. Le RADAR a eu un problème de télécommunication et la visite sur place a montré d'autres défauts, notamment que le radar de Tiébaghi est bloqué en site à 0°. Cela a un impact direct sur la qualité des lames d'eau RADAR. Néanmoins, la spatialisations des plus fortes pluies est correcte.

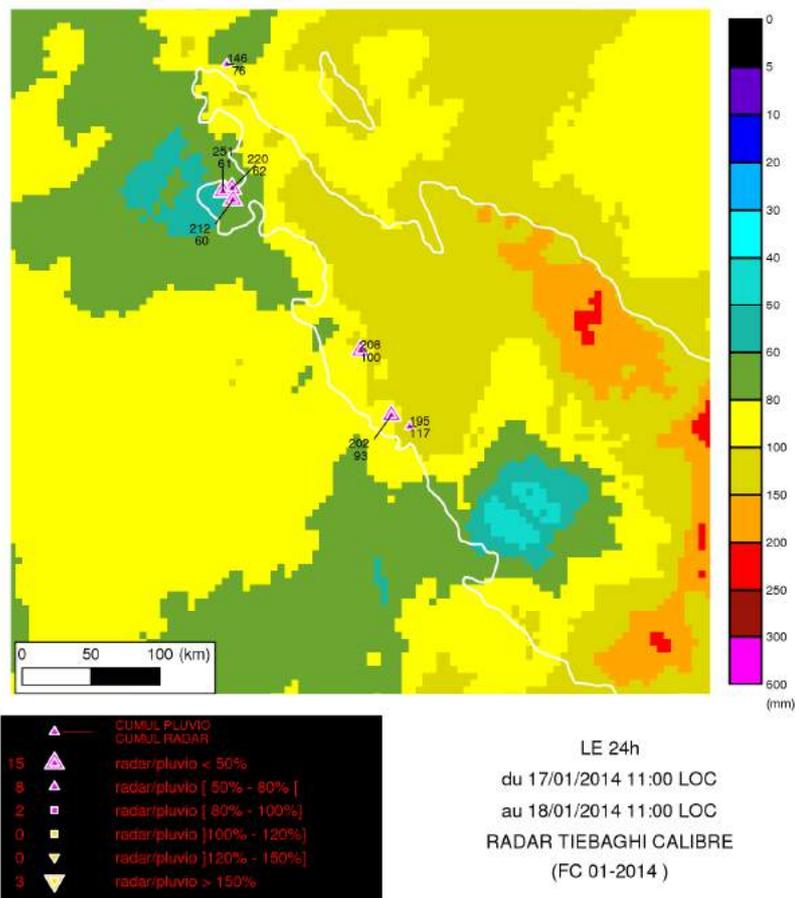
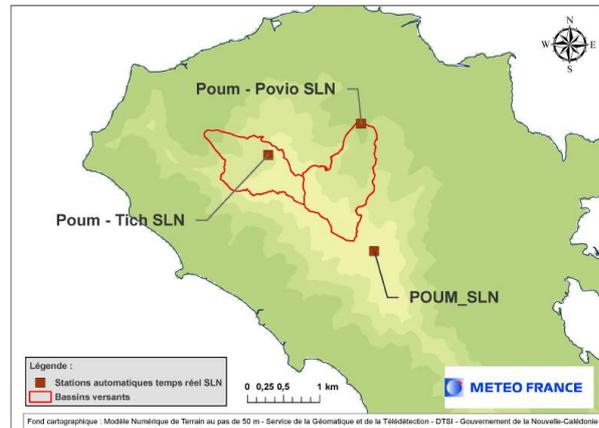


Figure 29: Lame d'eau corrigée (facteur correctif mensuel) du RADAR de Tiebaghi entre le 17/01/2014 11h locales et le 18/01/2014 11h locales, centrée sur le RADAR de Tiébaghi.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

9 Situation du 3-4 février 2014 : EDNA

9.1 Résumé météorologique

Lundi 3 février, une vaste zone dépressionnaire s'étend du nord du Vanuatu au nord de l'Australie. On y trouve 2 minima comme l'illustre la figure 2. L'un est situé au nord-ouest de la Nouvelle Calédonie. L'autre, situé au sud des îles Salomon, est l'ex-dépression tropicale EDNA qui a intéressé quelques jours auparavant la côte australienne.

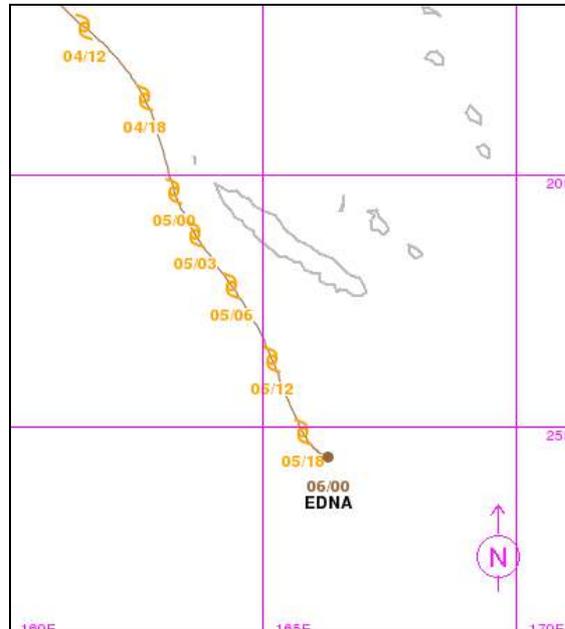


Figure 30: Trajectoire cyclonique du phénomène tropical EDNA.

Le premier minimum se décale vers le sud-est pour se rapprocher de la Nouvelle-Calédonie et circule dans la journée de mardi 4 suivant une trajectoire parallèle à la côte Ouest de la Grande Terre à environ 250 km à l'ouest. Ce minimum oriente le flux sur la Nouvelle Calédonie au nord-est drainant de l'air tropical chaud, humide et très instable. Les pluies gagnent par le nord lundi et s'étendent à l'ensemble du pays dans la nuit de lundi à mardi. Elles persistent toute la journée de mardi avec un maximum d'intensité l'après-midi.

Dans le même temps, l'ex-dépression tropicale EDNA suit une trajectoire similaire qui la rapproche de la Nouvelle Calédonie (figure 3). Elle se renforce à nouveau et sera de nouveau classée en dépression tropicale modérée le 4 dans l'après-midi. Elle se maintient au stade de dépression tropicale modérée tout au long de son déplacement vers la Nouvelle-Calédonie. Elle passe à environ 60 km à l'ouest des Bélep puis à 90 km à l'ouest de Koumac avant de suivre une trajectoire vers le sud sud-est qui l'éloigne progressivement de la Grande Terre.

Les plus fortes précipitations se sont produites lors du passage de la première dépression du 3 au 4 février 2014. Comme c'est habituellement le cas en pareille situation, les averses les plus soutenues étaient localisées sur la **côte Est** de la Grande Terre, ainsi que sur les massifs montagneux (Panié, Tchinguou, Aoupinié, Humboldt, Kouakoué). Le fait exceptionnel est l'occurrence de pluies tout aussi fortes **en plaine sur le côté Ouest au centre de la Grande Terre**, notamment à Bourail, Moindou et

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

La Foa. Vue la localisation des pluies au cours de cet épisode, les sites miniers étudiés sont **Poro** et **Koniambo**.

9.2 Site de Poro

Pour cet épisode, la mesure pluviométrique de Houailou est manquante. Le RADAR présente des cumuls proches de ceux des pluviomètres.

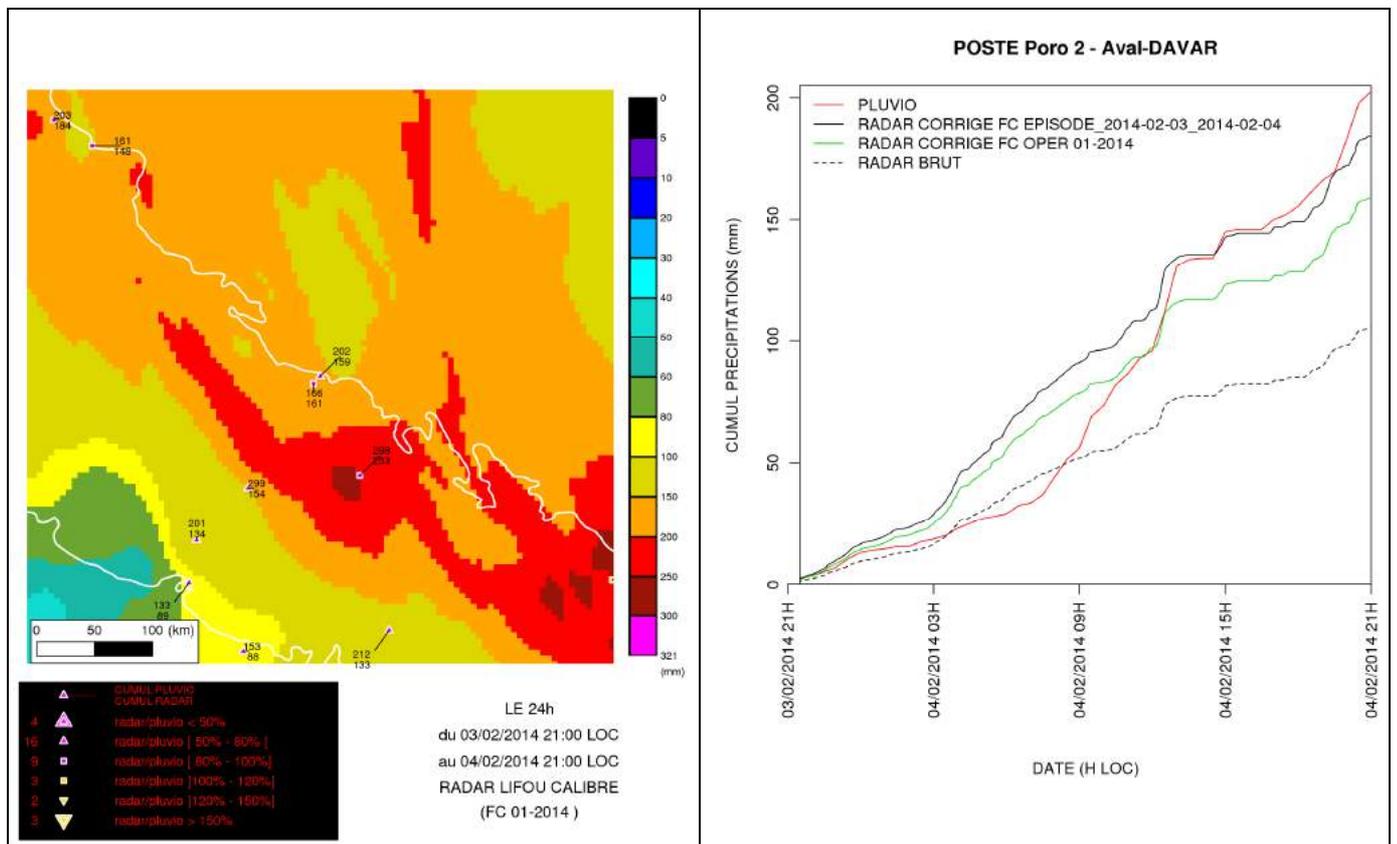
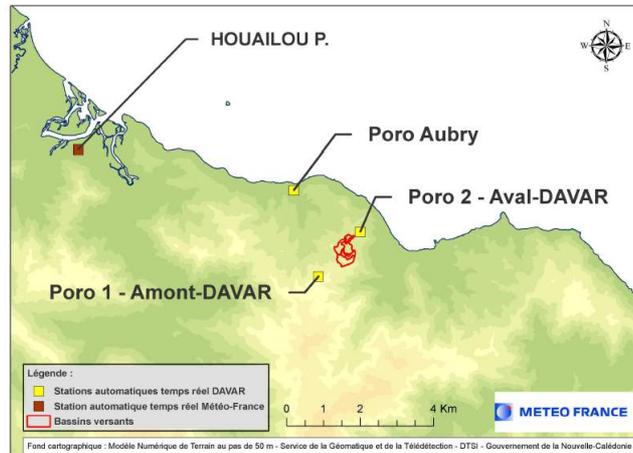


Figure 31: *Lame d'eau corrigée (FC OPER) et séries temporelles du RADAR de Lifou entre le 03/02/2014 21h locales et le 04/02/2014 21h locales.*

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

9.3 Site de Koniambo

Sur l'image de la lame d'eau, on voit un noyau de fortes pluies (supérieures à 200mm) sur le massif du Koniambo (Figure 32). Les données obtenues pour le poste « KNPRG03 » sur la période comprise entre le 03 février à 19h et le 04 février à 19h sont de 175,6mm au pluviomètre. La série temporelle « RADAR CORRIGE FC OPER » surestime en début de période les intensités, puis finit par s'en rapprocher, ce qui est plus satisfaisant que les résultats précédents. Cela s'explique par une grille de correction mensuelle qui tient compte des fortes intensités enregistrés le mois précédent lors du passage de la dépression JUNE.

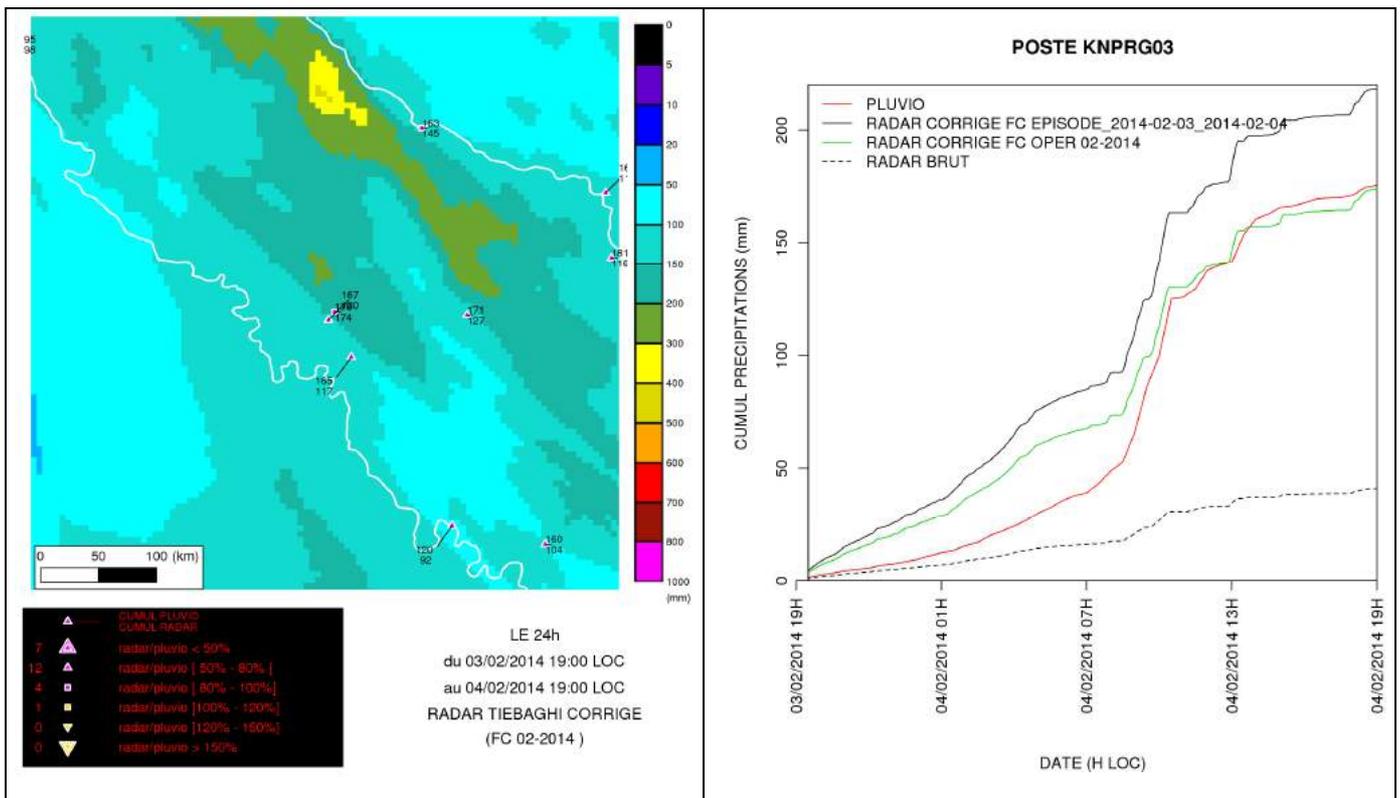
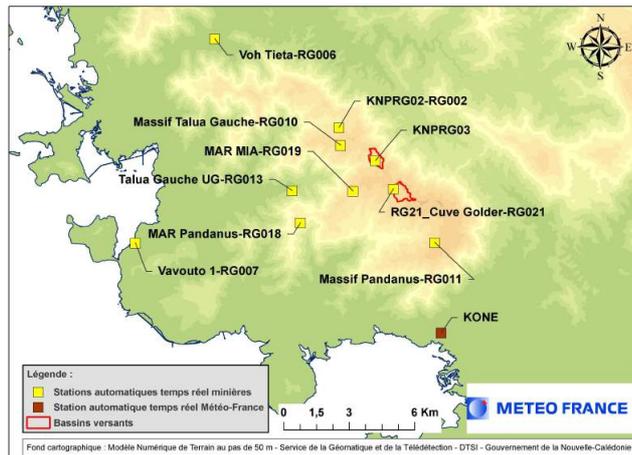


Figure 32: lame d'eau corrigée (FC OPER) et séries temporelles du RADAR de Tiébaghi entre le 03/02/2014 19h locales et le 04/02/2014 19h locales, centrée sur Koné.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

10 Conclusion

La méthode d'évaluation choisie pour cette étude est simple mais sévère. Les résultats obtenus permettent de mettre en exergue les points suivants :

- La lame d'eau RADAR rejouée avec les données recueillies lors d'un épisode pluvieux « FC EPISODE » améliore la répartition spatiale et les intensités de pluie.
- Les pics d'intensité du RADAR corrigé par le facteur correctif opérationnel (FC OPER) sont en phase avec les mesures pluviométriques.
- Le biais des lames d'eau réalisée par le FC OPER sur un pixel de 1 km² est en moyenne de 30% lors d'épisodes extrêmes quel que soit le RADAR sur une période de 24 heures. Il peut être intéressant d'étudier les lames d'eau sur un domaine plus étendu que celui du pixel le plus proche.
- La qualité des facteurs correctifs est dépendante du nombre et de l'intensité des épisodes au cours des mois précédents, ce qui conduit à une forte variation de leurs valeurs.
- Une zone étendue de pluie ou une zone de fortes précipitations située entre le RADAR et le site d'intérêt génère une atténuation dégradant la qualité de la lame d'eau.
- Il est possible d'obtenir de meilleurs résultats à l'échelle des bassins versants en densifiant le réseau de pluviomètres.
- Les lames d'eau RADAR sont en voie d'amélioration grâce à de nouveaux traitements en cours de tests en métropole : calibration au pas de temps horaire (actuellement le pas de temps est mensuel) et discrimination entre les pluies convectives et les pluies stratiformes. Par ailleurs, depuis juin 2014, des corrections ont été apportées aux différents RADAR de Nouvelle-Calédonie, permettant de diminuer les phénomènes d'atténuation par les précipitations.

Nous avons vu qu'il était possible d'utiliser les lames d'eau RADAR pour estimer les précipitations intenses à l'échelle kilométrique et d'en poursuivre l'amélioration. Deux problématiques se posent à présent :

- Dans quelle mesure les résultats présentés dans ce rapport peuvent-ils servir au projet d'étude sur les petits bassins miniers néo-calédoniens ? A savoir notamment la quantification des flux d'eau et de sédiments en provenance des bassins miniers et la réponse d'un bassin minier à un épisode pluvieux intense ?
- Les lames d'eau RADAR constituent un bon outil de prévision des pluies intenses. A l'échelle des très petits bassins versants d'échelle infra kilométrique comme ceux de Poro, leur utilisation est limitée. Sur d'autres, de plus grande taille, comme ceux de Goro ou de Poum, leur fiabilité a été démontrée. Intégrées à un système d'alerte fortes pluies sur la zone minière, elles peuvent constituer une aide à la décision d'enjeux économique, social et environnemental.

NB: Toute rediffusion totale ou partielle de ce projet est soumise à l'accord préalable de Météo-France

Chapitre 8

Conclusions.



VIII. Chapitre 8 : Conclusions.

VIII.1. Présentation Générale.

Le chapitre des conclusions est divisé en deux volets principaux.

Le premier présente sous une forme condensée, plus aisée à lire, les éléments considérés comme étant les plus significatifs de leur travail par les différents contributeurs. Ces résumés écrits par les auteurs des contributions principales sont présentés au sein de deux sous-ensembles qui correspondent aux deux dominantes complémentaires et étroitement imbriquées du programme : l'approche qualitative et l'approche quantitative du fonctionnement des petits bassins versants miniers, bien qu'il ne soit pas aisé de les distinguer de façon formelle du fait des étroites interactions présentes entre toutes les facettes du programme

Le schéma synoptique présenté à la figure 1 du rapport et reproduit ici permet de visualiser ces deux approches complémentaires d'un travail collectif où chacune des contributions alimente la compréhension globale des grandes caractéristiques des flux solides (MES) et liquides issus des petits bassins versants miniers.



Le second volet se veut être une analyse synthétique et critique des résultats produits en regard des objectifs majeurs que s'était donné le programme en termes de connaissance et de comparaison géographiques, géomorphologiques et climatiques des petits bassins versants miniers néo-calédoniens. Cette analyse débouche en fin de chapitre sur les perspectives qui s'ouvrent au terme de ce programme.

VIII.2. Les éléments forts des différentes contributions.

VIII.2.1. Les points forts de l'approche qualitative des contributions du consortium.

VIII.2.1.1. Le volet Géosciences (UNC) - Synthèse des pages 21 à 45

Une cartographie détaillée des formations de surface des bassins versants emboîtés de Poro étudiés par le programme a été produite. Cet « *input* » important des modélisations réalisées sur ces bassins a permis de distinguer 9 types de surface classées qualitativement par ordre de susceptibilité décroissante à l'émission de MES en période de précipitations. Sans surprise, ce sont les surfaces dénudées (pistes et plate-formes) qui sont les milieux émetteurs les plus forts tandis que ce sont les surfaces couvertes de végétation (maquis intact et maquis dégradé) qui en émettent le moins.

Pour accéder à une approche plus quantitative des MES pouvant être émises en période de précipitations, le programme avait prévu de réaliser des mesures sur parcelles d'érosion sur le site de Poro. Ces dernières n'ont pas pu être réalisées du fait des difficultés rencontrées par le CFTMC à nous épauler dans la démarche. Des zones favorables ont été recensées sur ce site et durant la phase initiale du projet où l'implantation sur Poro a été espérée, les éléments de ce dispositif et les équipements météorologiques souhaitables ont été acquis. Un dispositif opérationnel de mesure a été conçu à partir de pièces de chaudronnerie classique, de tuyaux PVC et de cuves en plastique pour permettre la duplication facile d'un modèle pouvant être facilement monté pour un coût modeste, avec l'assistance des engins de chantier qui sont disponibles sur les sites miniers. L'échec connu à Poro a entraîné la recherche d'un site de substitution, finalement trouvé dans la région de Prony avec l'assistance de la SLN. Des problèmes ont également été rencontrés en termes de sécurité des équipements et la réalisation des mesures a été différée.

Parce qu'il est celui sur lequel on dispose de la base de données la plus complète acquise dans le cadre du programme et parce que son accès est sécurisé, le site de Poro constitue indéniablement la zone la plus favorable pour réaliser ce type de mesures et l'UNC les réalisera dans les mois à venir s'il est possible d'obtenir l'assistance (temps pelle et personnel associé) du CFTMC à la mise en place des équipements.

Pour trouver une voie de compensation à cet échec sur les parcelles d'érosion, l'équipe géosciences de l'UNC a financé sur fonds propres une étude complémentaire centrée sur l'exploitation de l'imagerie satellitaire hyperspectrale (*cf.* programme CNRT Cartha) dans les zones périphériques aux bassins emboîtés de Poro (couverture nuageuse trop importante à ce niveau), afin de préciser l'environnement géologique proche des bassins étudiés.

Les produits de ce travail sont, d'une part, une cartographie renseignant de manière qualitative sur la minéralogie des sols à la résolution de 4m, dans une zone proche des bassins emboîtés de Poro (carte de serpentinisation et des oxydes de fer) et d'autre part, une cartographie du régo-lite par classification fine des sols nus de Poro. Cette cartographie complémentaire des travaux menés par les autres partenaires du consortium, toujours réalisée à la résolution de 4m permet de reconnaître et de spatialiser 4 classes au sein du régo-lite : cuirasse, latérite, saprolite et roche mère (péridotite).

VIII.2.1.2. Le volet caractérisation physico-chimique des MES (UNC) - Synthèse des pages 80 à 119

Au sein de ce projet « fonctionnement des petits bassins versants miniers », les travaux effectués dans le cadre de la partie « Etude des propriétés physico-chimiques des MES » ont pour objectif de caractériser la nature des matières en suspension et d'étudier les facteurs physico-chimiques qui sont susceptibles d'induire leur agrégation.

Pour modéliser le transport de ces MES le long des bassins versants, les paramètres physiques des particules, tels que leur taille et leur densité sont nécessaires. Parmi ces modélisations, certaines décrivent les mécanismes de sédimentation dans les lacs ou dans les bassins de décantation, comme c'est le cas dans ce projet. Dans ce but, la tâche concernant « l'étude de la gestion des flux sédimentaires par bassin de décantation en contexte minier » réalisée par Alain RECKING et Audrey CHILLOU, a été consacrée à l'étude de la rétention et de la décantation des MES dans les décanteurs du bassin versant de Poro. La vitesse de chute des MES, qui nécessite de connaître la taille et densité des particules, a été déterminée.

De façon complémentaire, nous nous sommes intéressés à la nature de ces MES et des facteurs qui influencent leurs agrégations. Leur formation est contrôlée par différents paramètres comme : les conditions hydrodynamiques d'écoulement qui influencent la statistique des chocs entre particules, la présence de matière organique dans le milieu, l'agglomération de nature bactérienne ou encore les charges électrostatiques à la surface des particules.

Nous nous sommes particulièrement intéressés à ces interactions électrostatiques. Leur rôle est important dans le cas de particules minérales, leurs effets peuvent être concrètement observés par la très lente sédimentation des MES qui est à l'origine d'une importante turbidité, qui peut durer plusieurs jours, dans les décanteurs ou les cours d'eau.

Dans un premier temps, nous avons déterminé la nature des phases minérales, par diffraction de DRX, et la taille de particules, par granulométrie LASER, pour des échantillons prélevés le long du bassin versant de Poro. Les échantillons sont constitués de Goethite en majorité (70 à 85 %), et dans des proportions plus faibles de Willemsite, d'Antigorite et de Quartz. La proportion de Goethite diminue à l'approche de l'embouchure du bassin versant. Les distributions en taille des agrégats se décalent vers les plus grandes tailles, de l'amont vers l'aval, pour des valeurs moyennes plus faibles proches de l'embouchure, ce qui est cohérent avec le résultat précédent qui montre un changement de composition de l'échantillon à son arrivée dans des eaux plus salées.

Ensuite, des dosages potentiométriques, effectués sur des échantillons issus des prélèvements dans le milieu naturel et ne comportant *a priori* qu'une seule phase minérale, ont été réalisés pour caractériser les charges de surface des composés identifiés précédemment. Nous avons pu observer que, pour la Goethite, la Willemsite et l'Antigorite, le comportement de charge de surface observé est cohérent avec les résultats de la littérature.

Dans le cas de mélanges de phases minérales, il a été possible de calculer la charge globale en fonction du pH des échantillons, à l'aide de la somme pondérée des charges de chaque phase minérale considérée indépendamment. De plus, nous avons effectué des mesures sur trois échantillons obtenus, à l'aide des préleveurs sur le bassin versant de Poro, choisis pour leur variabilité en proportion de phases. Les mélanges de particules adoptent un comportement de

charge globale intermédiaire au comportement de chaque phase minérale, ce qui confirme les équilibres acido-basiques entre les surfaces des différentes phases minérales.

Une étude concernant la sédimentation des particules ensuite a été mise en œuvre. Un suivi de l'évolution de la taille des particules au cours du temps, effectuée par granulométrie LASER, nous a permis de montrer qu'au-delà de 50 s des petits agrégats de l'ordre d'un à trois micromètres disparaissent pour former des objets dont le diamètre est 10 fois supérieur. Des acquisitions vidéo des échantillons au cours de la sédimentation ont révélé que les vitesses de chute du front des particules sont proches d'un échantillon à l'autre. En revanche, c'est le temps nécessaire pour que le phénomène se déclenche qui diffère.

Pour rendre compte des effets de charges électrostatiques en surface des particules, nous avons préparé plusieurs échantillons à différents pH. Pour les échantillons dont la proportion de Goethite est supérieure à 85 %, il a été possible de remarquer que la majorité des particules sédimente pour des valeurs de pH proches du point de charge nul de la Goethite. Pour les échantillons dont la fraction de Goethite est inférieure à 85 % par rapport aux autres phases, des phénomènes plus complexes ont lieu. Il a été possible d'observer, pour ces échantillons et des $\text{pH} < 6,5$, qu'une forte floculation laisse place à un surnageant translucide. Dans le cas des valeurs de pH supérieures à 11, la dispersion paraît stable alors que, pour des valeurs intermédiaires de ce paramètre, une sédimentation partielle est visible. Nous avons pu ainsi montrer que les forces électrostatiques jouent un rôle important lors de la formation des agrégats micrométriques à partir des particules minérales dont la taille initiale mesurée par microscopie électronique, est égale à quelques centaines de nanomètres.

A l'issue de ce travail, nous pouvons remarquer que la formation d'agrégats de taille micrométrique, dans les décanteurs par exemple, peut être optimisée par le contrôle des interactions électrostatiques entre particules. Pour cela, il est possible d'ajouter des sels qui auront pour effet d'écranter ces répulsions ou encore d'ajouter des flocculants organiques qui rendent les surfaces des particules hydrophobes. La première solution est de loin la plus respectueuse de l'environnement. Quelle que soit la solution choisie, il serait nécessaire d'étudier, dans chaque cas la nature des particules en suspension et des agrégats formés pour trouver le sel (ou le flocculant organique) le plus efficace compte tenu de la variabilité de composition des échantillons et des mécanismes de formations des agrégats le long du bassin versant.

VIII.2.1.3. Le volet Evolution de la chimie des eaux (UNC) - Synthèse des pages 120 à 162

Les massifs miniers sont riches en éléments métalliques (Fe, Mn, Ni, Al, Cr...) dont certains sont potentiellement toxiques. Lors des fortes pluies, les terrains miniers mis à nu par l'activité minière sont érodés et les matériaux érodés sont transportés vers les écosystèmes littoraux. Les eaux de ruissèlement de la mine au lagon sont alors enrichies en éléments métalliques, dans la fraction particulaire (fraction granulométrique supérieure à $0.45\mu\text{m}$), mais également potentiellement dans la fraction dissoute (fraction granulométrique inférieures à $0.45\mu\text{m}$). Au cours de leur trajet, les matières en suspension (MES) d'origine minière peuvent en effet libérer les éléments métalliques qu'elles contiennent et modifier la composition chimique de la fraction dissoute des eaux de surface. La mobilité, la biodisponibilité (fraction d'une substance ayant la possibilité d'être absorbée et d'être utilisée par le métabolisme d'un organisme vivant) et la toxicité des éléments métalliques dépend de leur spéciation c'est-à-dire

de leur forme chimique, qui dépend elle-même des conditions environnementales (pH, E_h , teneur en oxygène dissous, en matière organique et en ligands inorganiques, ...). Dans la fraction particulaire, les métaux peuvent être présents sous forme de précipités ou adsorbés à la surface de particules minérales ou organiques. Dans la fraction dissoute, ils peuvent être libres sous forme de cation métallique, sous forme oxydée anionique, liés à des ligands organiques ou inorganiques dissous pour former des complexes. L'étude de la spéciation des éléments métalliques dans les eaux de surface dans un bassin versant minier est essentielle pour une meilleure estimation du risque écotoxicologique lié à la dispersion des éléments métalliques contenus dans les sédiments miniers.

Le volet III de la réponse à l'appel à projet a pour but, d'une part de déterminer si la composition chimique des eaux de ruissellement des bassins versants miniers évolue sur le parcours de la mine au lagon et, d'autre part, de déterminer comment elle évolue avec la pluviométrie. Des calculs de spéciation sont également réalisés à partir des paramètres physico-chimiques mesurés. Il est attendu que la concentration en éléments traces métalliques dissous diminue par dilution, sauf si les MES libèrent des éléments traces métalliques, ce qui compense alors la dilution. Cette réaction de solubilisation peut être une désorption de métal adsorbé à la surface des MES par compétition avec un cation majeur ou par complexation avec un ligand (organique ou inorganique) ; elle peut aussi être une réaction de solubilisation du métal inclus dans les phases minérales plus ou moins bien cristallisées par formation de complexes avec un ligand fort. Ce travail a donc également pour objet de cerner les réactions potentiellement impliquées dans les réactions de solubilisation des éléments traces métalliques le long du parcours.

Cette première étude a permis de montrer que dans les eaux de ruissellement du bassin versant minier de Poro, les concentrations en éléments traces métalliques évoluent finalement assez peu le long du parcours de la mine au lagon, sauf pour le chrome hexavalent, dont la concentration sur site minier est très supérieure à la concentration dans le village. Par contre la concentration en éléments traces métalliques évolue avec la pluviométrie. Malgré la dilution des eaux de surface par la pluie, confirmée grâce à la diminution de concentration du chlore, les concentrations peuvent augmenter avec la pluviométrie. C'est le cas du nickel dans la rivière et à l'embouchure, du fer et du manganèse à l'embouchure uniquement. Ces éléments pourtant peu solubles sont alors très probablement libérés à partir des matières en suspension. La concentration en aluminium est plutôt constante, donc l'aluminium est également mobilisé, mais juste suffisamment pour compenser la dilution.

Dans ce contexte minier, les concentrations en carbone organique dissous sont le plus souvent très faibles et insuffisantes pour complexer le fer, l'aluminium et le manganèse. D'après calculs, seuls le nickel et le chrome (III) sont significativement liés à la matière organique dissoute. Cela implique que la matière organique peut favoriser des réactions de solubilisation du nickel à partir des MES. L'ion cyanure peut également contribuer à des réactions de transfert du nickel de la fraction particulaire vers la fraction dissoute, car il lie fortement le nickel. L'aluminium et le fer sont liés uniquement à l'ion hydroxyde, ce qui peut expliquer que l'aluminium soit peu mobilisé. Le fer l'est plus que l'aluminium car présent en plus grande quantité dans les MES. A l'embouchure, la solubilisation par compétition pour les sites d'adsorption est fortement probable.

L'étude des concentrations en chrome dans les eaux superficielles et de la réactivité des sédiments miniers a permis de montrer que les sédiments sont des vecteurs de chrome hexavalent facilement mobilisable dans les eaux superficielles. En effet, le chrome est adsorbé

à la surface des particules et est libéré sous sa forme hexavalente exclusivement. Donc la matière organique dissoute ne participe pas à la solubilisation du chrome, puisque le Cr(VI) ne se lie pas à la matière organique. Par contre la matière organique peut réduire le chrome (VI) en chrome (III), qui est alors maintenu en solution par formation de complexe avec la matière organique. Les MES étant des réservoirs de chrome hexavalent, nous recommandons, pour une exploitation minière durable compatible avec la préservation des écosystèmes en aval, de prévenir le transport de matière en suspension y compris les plus petites particules dont la concentration massique en chrome (VI) peut atteindre jusqu'à 900mg/kg. Pour limiter la dispersion de chrome sous cette forme toxique, il est également possible d'étudier des solutions pour réduire le chrome à l'exutoire et faciliter la transition Cr(VI)-Cr(III). Des articles sont disponibles dans la littérature sur le traitement des effluents de tanneries riches en chrome hexavalent avec des débris de végétaux. Après étude de faisabilité et d'efficacité il pourrait, par exemple, être envisagé de placer à l'exutoire des débris de végétaux traversés par les flux d'eau pour réduire le chrome et limiter la circulation du chrome sous sa forme la plus toxique.

VIII.2.1.4. Le volet Informatique partie A : « Modélisation de l'érosion des bassins versants à grande échelle ». (UNC) - Synthèse des pages 163 à 263

L'objectif initial de ce volet est de développer des méthodes (de fouille de données) automatiques ou semi-automatiques permettant d'étudier et de suivre l'évolution de l'érosion à grande échelle. L'instrumentation des petits bassins versants est une étape nécessaire pour une meilleure compréhension de l'érosion. Toutefois, l'équipement de plusieurs bassins est coûteux et difficile à mettre en place à grande échelle. L'objectif était donc d'automatiser l'analyse des données (et leur croisement) et de l'étendre à grande échelle, en se servant d'autres données plus facilement accessibles et en évitant une instrumentation difficile voire impossible de grands bassins versants.

Dans ce cadre, nous avons développé des outils permettant d'analyser des séries d'images satellites et de les croiser avec toutes autres données disponibles sur la zone d'étude (p.ex. lithologie, végétation, occupation du sol). Les méthodes développées se veulent génériques, permettant de croiser toutes couches de données pour trouver des corrélations, d'identifier les effets de certains facteurs sur l'érosion du sol (ou d'autres phénomènes), et de décrire des tendances. Le processus mis en place est un processus complet qui va de la préparation des données jusqu'à la restitution des résultats pour les experts. Un premier prototype (voir figure ci-dessous), prenant en compte toutes les étapes du processus, a été développé pour permettre de suivre les évolutions de différents objets d'intérêt (p.ex. l'érosion ou la végétation) sur de grandes zones.

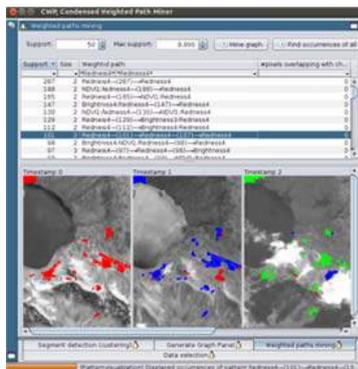


Figure 1: Prototype permettant de suivre l'évolution d'objets d'intérêt à grande échelle

Cette méthode a été appliquée sur deux zones d'études (Poro et une partie du Grand Sud), ayant des données et des superficies différentes, afin de démontrer la généralité de l'approche. Les premiers résultats démontrent l'intérêt de la méthode développée. Ils permettent notamment de mettre en avant des zones où l'érosion semble avoir augmenté ou au contraire des zones où l'érosion semble avoir diminué. Grâce à notre méthode, il est possible de conforter ces tendances en les croisant avec d'autres indicateurs. Par exemple, la figure 2 montre une potentielle diminution de l'érosion des sols de certaines zones de Poro entre 1999 et 2002. Or, notre méthode permet de voir que cette diminution est corrélée à un fort indice de végétation, ce qui vient appuyer la tendance précédente. Au-delà de l'érosion, notre approche a permis de mettre en avant d'autres phénomènes, tels que la modification du type de végétation sur certaines zones. Bien entendu, toutes ces tendances doivent encore être confortées par une « validation terrain ». L'intérêt de notre approche est de mieux cibler cette intervention sur le terrain car les zones d'étude peuvent être étendues et difficiles d'accès.

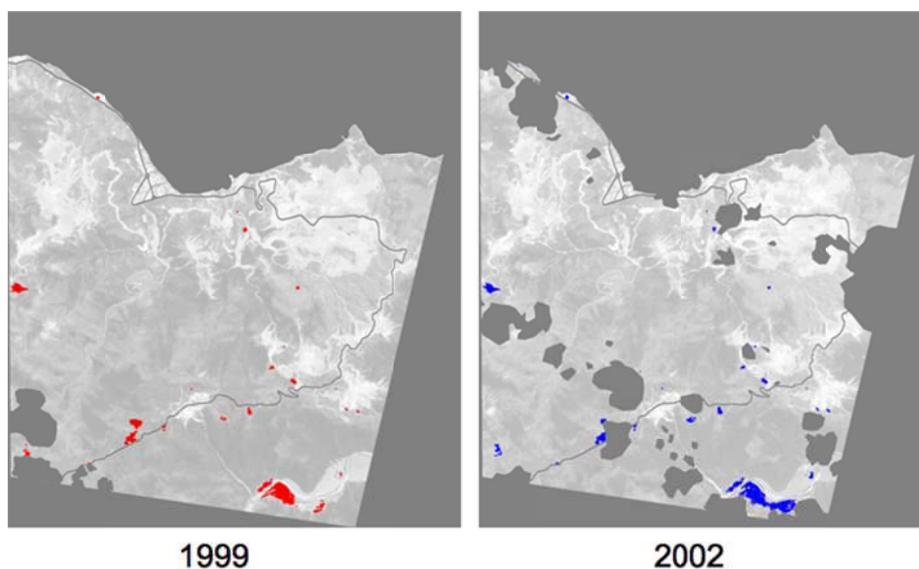


Figure 2: Exemple de zones ayant connu entre 1999 et 2002 une très forte diminution de leur indice de rougeur (un indicateur d'érosion) et qui ont en 2002 un fort indice de végétation.

VIII.2.1.5. Le volet télédétection à technologie passive appliqué aux problématiques de morphologie dynamique fluviale (IRD) - Synthèse des pages 359 à 405

Au sein du groupe-projet, l'équipe de l'ESPACE-DEV (IRD) a été sollicitée pour contribuer au développement d'approches scientifiques complémentaires très diversifiées qui visent notamment à évaluer les potentialités de la télédétection à technologie passive sur les problématiques de morphologie dynamique fluviale en Nouvelle-Calédonie. Plus précisément, il s'agit de mettre en place des méthodologies pour l'étude de l'érosion et des changements du milieu (petit bassin versant), contraints par un épisode pluvieux intense, grâce à l'utilisation de la télédétection et de la modélisation.

Les méthodologies utilisées, soit apportent des finalités scientifiques prometteuses en proposant des voies de développements scientifiques, soit aident à la compréhension des changements du milieu et du phénomène d'érosion, en donnant des indications quantitatives (modifications des superficies des classes ; matières arrachées à l'exutoire).

Une première étape de recherche exhaustive d'images satellitaires a été réalisée sur des données possédant des résolutions spatiale et temporelle adaptées à la problématique de l'érosion d'un petit bassin versant (environ 30 km²). Les résultats nous ont amené à considérer que les données issues du capteur RapidEye étaient suffisantes (5m au niveau 3A et permet l'obtention d'une image tous les 24 heures sur un même site). Des essais ont été réalisés sur d'autres données mieux résolues spatialement (Formosat2) et spectralement (Hymap).

Les images aéroportées hyperspectrales ont apporté, quant à elles, un fort pouvoir de discrimination des objets et les résultats, malgré la couverture importante de nuages, sont plus que prometteurs. La possibilité d'associer un type de substrat à une classe de végétation à partir de traitements automatiques est particulièrement novatrice.

Avec une résolution spatiale de 3,4 m (après géo-correction), les images issues du capteur Formosat-2 apportent une information détaillée, améliorée par le canal additionnel "RedEdge" de RapidEye. En effet, ce dernier nous a permis d'atténuer les confusions entre les classes et apporte ainsi des résultats fiables notamment pour les images datées de 2011 et 2012.

Comme pour l'image de Formosat-2, l'image RapidEye de 2010, obtenue gratuitement grâce au programme EQUIPEX GEOSUD, possède un niveau de pré-traitement qui ne permet pas une bonne précision géométrique. Les quantifications en superficie des objets au sol, dans cet environnement montagneux de Poro, ne sont donc pas possibles ou alors avec de grandes imprécisions. Elle nous a permis cependant de caler notre modèle de traitement d'image et de mettre en place une typologie des classes adaptée à la problématique. Une fois les images RapidEye de 2011 et 2012 obtenues (achat auprès d'un organisme australien) au niveau 3A (orthorectifiées, 5 m de résolution spatiale), l'application des méthodes de traitement ont apportés des résultats intéressants sur la migration de classes (passage d'une classe à l'autre). Cependant, les dates d'acquisition étant relativement proches, les variations en superficies sont minimales.

La classification d'occupation des sols réalisée à partir de l'image RapidEye de 2011 a été utilisée pour l'étude d'érosion par l'application du modèle empirique USLE. Ce modèle, établi pour un milieu bien particulier (tempéré américain), est cependant difficilement applicable tel quel dans un milieu tropical insulaire comme la Calédonie sans précautions. La conséquence de cette différence environnementale est que les résultats obtenus ici ne sont exploitables que pour des comparaisons relatives, entre plusieurs bassins versants. Une autre solution serait de collecter toutes les données de terrain (granulométrie précise,...) nécessaires à la construction d'un modèle USLE spécifique à l'environnement calédonien.

Une dernière solution adoptée dans ce projet, est de confronter les résultats du modèle USLE à des données de terrain. Ainsi, l'instrumentation du BV réalisée par l'équipe de l'IRSTEA a permis d'apporter des valeurs de référence au modèle utilisé pour passer ainsi de données de perte en sol (t/ha/an) à un indice d'apport sédimentaire.

Enfin, au-delà des descriptions des limites techniques des données utilisées, cette étude a montré que l'apport de la télédétection et de la modélisation pour la thématique d'érosion sur petits bassins versant en milieu tropical insulaire (île haute) est important. Elle est cependant tributaire de données exogènes (reconnaissance de terrain, cartes, données hydrologiques...) afin de caler les modèles et d'obtenir des résultats fiables. Il serait également intéressant de disposer de données de terrain sur d'autres bassins versants connexes, moins anthropisés, afin de mesurer précisément l'importance de l'impact de l'activité minière sur Poro.

Les méthodes de traitement développés ici sont suffisamment génériques pour être applicables à d'autres jeux de données et permettrait d'analyser les changements sur d'autres bassins versants. Ceci apporterait des informations primordiales pour une analyse plus exhaustive de la problématique d'érosion à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie.

VIII.2.2. Les points forts de l'approche quantitative des contributions du consortium.

VIII.2.2.1. Le volet « hydrologie minière (IRSTEA) - (Synthèse des pages 259 à 368).

Déroulement des missions d'irstea dans le projet :

L'Unité de recherche "Erosion Torrentielle, neige et avalanches" (ETNA) d'Irstea avait plusieurs missions au sein du projet CNRT-PBVM :

- Assurer l'assistance technique pour le choix, l'instrumentation, la maintenance et le suivi des bassins et sites de mesure ;
- Analyser et interpréter les données disponibles ou recueillies dans le cadre du programme puis mettre en œuvre des modélisations hydro-sédimentaires ;
- Participer à la formation des partenaires calédoniens et transférer les compétences acquises dans le domaine du suivi des petits bassins versants miniers.

La **participation d'Irstea** au projet s'est étalée sur la période 2010-2014, principalement au cours de **missions sur le territoire** (15 missions en tout) complétées par des **activités scientifiques au centre Irstea de Grenoble**. Les chercheurs d'Irstea ont encadré les **deux stages** de niveau Master prévus dans leur proposition et **six stages** financés par l'UNC (trois stagiaires du projet Hydromine et trois stagiaires du présent programme).

Ces activités techniques et scientifiques ont été complétées par des **actions d'animation et de formation**. La création d'un **groupe "instrumentation"** à partir de janvier 2012 a permis de mettre en commun les expériences ou les difficultés rencontrées par les différents acteurs des suivis en milieu minier. Ce groupe a permis des échanges entre praticiens sur les sites, des visites réciproques d'installation et même des prêts de matériel. Il s'est réuni cinq fois entre 2012 et 2014.

Les **séminaires de formation en hydrologie appliquée aux petits bassins versants** miniers ont été réalisés en mars 2013 et novembre 2014 et ont concerné une cinquantaine de participants pour chaque session. Les documents pédagogiques du séminaire sont disponibles en ligne sur le portail de l'UNC, de même que l'enregistrement vidéo des présentations de mars 2013.

Un **séminaire de formation sur le transport solide** a été réalisé fin novembre 2014, juste avant la restitution du programme, objet de ce rapport. Il a rassemblé une cinquantaine de participants également.

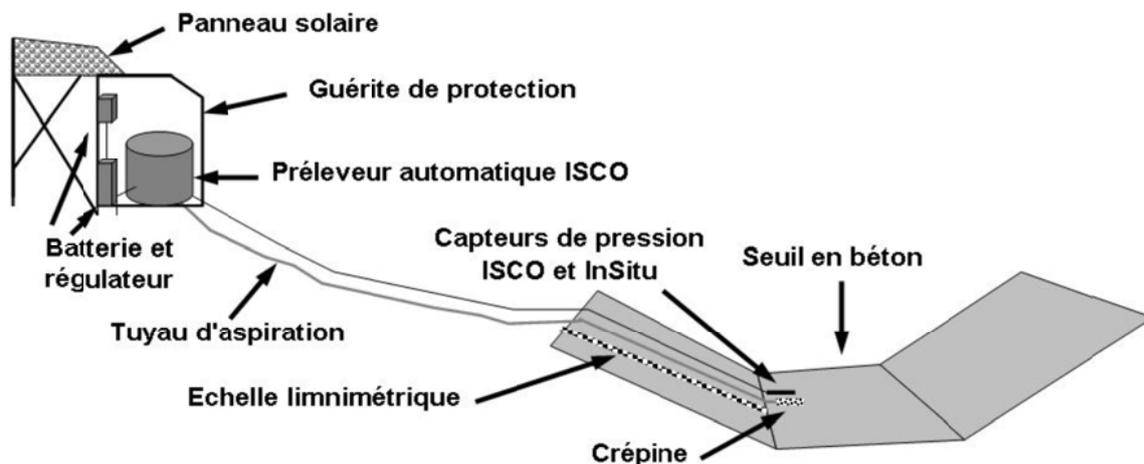
Irstea a présenté l'avancement de ses travaux au moins une fois par an **au comité de pilotage**, soit à Nouméa, soit en visio-conférence depuis Grenoble. Les missions sur le territoire ont été majoritairement consacrées au choix des sites d'études, à la définition des équipements à prévoir ou à améliorer, au recueil des données auprès des compagnies minières ou de leurs sous-traitants, aux travaux en commun avec les partenaires du projet, ainsi qu'à l'encadrement des stagiaires pendant leur séjour sur le Territoire.

Choix et équipements des sites pour le projet

Pour atteindre les objectifs du projet, il était nécessaire de mettre en place des mesures des différentes composantes des crues torrentielles sur un bassin versant minier. Le site de Poro, déjà instrumenté dans le cadre du projet Hydromine constituait le site pilote du projet, mais était complété par plusieurs petits bassins versants équipés par les sociétés minières, sur la base du volontariat de ces compagnies (KNS, SLN, VALE). Les sites retenus finalement sont Poro (site pilote), Goro (VALE), Koniambo (KNS), Poum (SLN). Ils sont suffisamment bien répartis sur la Grande Terre pour aborder la diversité des contextes climatiques et géomorphologiques des sites miniers du Territoire. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des bassins retenus.

Site minier	Poro		Poum		Koniambo		Goro		
gestionnaire minier	CFTMC		SLN		KNS		Vale		
Nom_BV	Poro amont	Poro aval	Pôvio	Titch	SW34	SW35	Wadjana	KN15	KO6
superficie (km ²)	0.090	0.304	0.995	0.778	0.482	0.366	2.720	2.110	3.840

Une "station type" a été définie pour le suivi des débits et des transports en suspension (MES). Elle est résumée sur le schéma ci-dessous. Un turbidimètre, une mesure en continu des vitesses (doppler) et une transmission GSM (ne figurant pas sur le schéma) sont des compléments qui améliorent la qualité des données produites. Le site doit de plus comporter un ou plusieurs pluviographes selon la taille du bassin.



1

Un SIG interopérable a pu être construit sur les quatre sites miniers du projet grâce aux couches d'information transmises par les compagnies minières et aux données disponibles auprès de la DITTT. Ces données ont été géo-référencées dans le système RGNC Lambert 91 et sont consultables en ligne sur le portail de l'UNC, sous réserve des autorisations d'accès convenues avec les mineurs. Elles permettent d'extraire l'essentiel des informations disponibles pour l'analyse hydrologique. Leur exploitation dans l'avenir pose néanmoins le problème de leur actualisation dans la mesure où la situation évolue très rapidement en domaine minier.

Résultats obtenus sur le site pilote de Poro

Entre **décembre 2008 et novembre 2013**, 415 épisodes pluvieux supérieurs à 5 mm ont été recensés à Poro. Les **116 épisodes moyens et forts** (pluie supérieure à 40 mm) ont fait l'objet d'analyses graphiques et statistiques détaillées.

De 2009 à 2013, la **pluviométrie annuelle**, en moyenne de **2200 mm**, a varié pratiquement du simple au double (1460 mm en 2009 et 2720 mm en 2012). L'épisode de **Noël 2011**, avec **plus de 500 mm en 40 heures**, représente à lui seul 23 % de la pluviométrie moyenne annuelle. A toutes les échelles de temps, les différences entre les deux pluviomètres de Poro amont et Poro aval sont minimales (inférieures ou égales à 6 %). La "**pluie limite**" pour initier les processus de ruissellement sur les deux bassins de Poro s'établit autour de **15-20 mm**.

Les **débits maximums observés** sont de 3.6 m³/s à l'amont et de 9.2 m³/s à l'aval, soit respectivement **41 et 30 m³/s/km²**. Ces valeurs extrêmement élevées comparativement à ce qui s'observe sur les bassins plus grands de la région (DAVAR, 2006) confirment la **nécessité de disposer de mesures pour les tous petits bassins** afin d'obtenir des règles de dimensionnement adaptées. Seule la **poursuite des mesures sur le long terme** permettra de réaliser des analyses fréquentielles. A Poro, les événements les plus importants se sont produits pour les saisons cycloniques 2012 et 2013, soit plus de trois ans après le début des mesures. La pluie et surtout la fraction intense des précipitations sont les variables qui expliquent le mieux le débit de pointe

A l'échelle de l'épisode pluvieux, les **coefficients de ruissellement** (ou écoulement rapide de crue) sont **extrêmement variables** et peuvent s'observer dans une **fourchette comprise entre 0.1 et 0.9**, à Poro amont comme à Poro aval. Le **coefficient d'écoulement moyen**, estimé par la pente de la relation pluie incidente/lame ruisselée est de **0.75 à 0.8 pour Poro amont et 0.5 à 0.6 pour Poro aval**. Les débordements qui s'observent en cas de fortes crues ne permettent pas de conclure sur les coefficients d'écoulement des épisodes forts à Poro aval.

Les **temps de concentration sont très variables : 9 à 16 min à Poro amont et 12 à 21 min à Poro aval**. Les **formules de la littérature** couramment utilisées par les bureaux d'étude s'avèrent fortement **inadaptées** et fournissent des valeurs allant de deux à dix fois les valeurs observées. Les méthodes de calcul proposées par Irstea pour les bassins de montagne ou par la Davar pour les bassins à forte pente fournissent des résultats légèrement inférieurs à ces valeurs, mais dans le même ordre de grandeur.

Pour l'étude des transports en suspension (**MES**), sur la période 2009-2013, 973 échantillons ont été traités à Poro amont et 647 à Poro aval (**1620 analyses**), représentant 95 crues échantillonnées dont 57 échantillonnées aux deux stations. Dans la plupart des cas, l'absence d'échantillons en cours de crue est due au fait que les 24 flacons disponibles étaient déjà pleins et les défauts de prélèvements par panne du matériel sont très rares. Les **concentrations** mesurées varient entre **0.002 g/l et 28 g/l**. Les concentrations sont en moyenne **plus faibles à l'aval qu'à l'amont, sauf pour la crue du 25 décembre 2011**. Les matériaux en suspension sont **extrêmement fins** avec des diamètres médians (D50) s'éageant, entre **4 et 13 µ à l'amont, 5 et 30 µ à l'aval**

De manière classique, on n'observe **pas de relation claire entre concentration et débit** sur l'ensemble des échantillons mais des relations avec courbes **d'hystérésis à l'échelle de la crue** : à Poro amont, les crues sont généralement plus chargées en montée qu'en décrue. La

situation inverse s'observe à Poro aval. On peut en déduire que les phénomènes d'arrachement dominant à Poro amont, ceux de transport dominant à Poro aval.

A l'échelle événementielle, il apparaît **que le flux total de MES** peut être correctement **estimé à partir du débit maximum de la crue**, l'association avec la **fraction intense des précipitations** améliore encore la prédiction.

Pour calculer les **flux annuels**, les flux des épisodes non échantillonnés ont été estimés à l'aide du débit de pointe de l'épisode. Sur l'ensemble de la période, les flux des crues non échantillonnées ne représentent que 8 à 13 % du total. **Le flux total sur la période est de 360 t à l'amont et 920 t à l'aval**, soit en moyenne 72 et 185 t par an respectivement. **Les épisodes forts (plus de 85 mm de pluie) représentent 75 % des flux à l'amont et 90 % à l'aval. A lui seul, l'épisode FINA représente 25 % du flux amont et 50 % du flux aval.** Ceci confirme la nécessité de réaliser des suivis dans la durée et de se donner les moyens d'obtenir des mesures sur les épisodes extrêmes.

Les **décanteurs** situés entre les deux stations ont des volumes faibles au regard de la règle 2h/2ans. Au cours de la période 2009-2013, les volumes écoulés à Poro amont ont dépassé la capacité de FRN01 au moins 22 fois, soit en moyenne 4 fois par an. Ces **ouvrages sont efficaces sur les petites crues seulement**. Lors de la crue exceptionnelle du **24 décembre 2011**, l'ouvrage n'a assuré **aucune rétention des sédiments**.

Résultats obtenus sur les autres sites

L'analyse et l'interprétation des résultats sur les autres sites souffrent du **manque de données validées sur des chroniques suffisantes**. En particulier, lorsque les **événements forts** ne sont pas mesurés, il est difficile de conclure car les résultats de Poro ont mis en évidence la **non-linéarité des réponses**, tant en débit liquide qu'en débit solide.

On a globalement obtenu des **coefficients d'écoulement plus faibles sur les sites miniers de Koniambo et de Poum**. Ils s'expliquent à la fois par les différences morphologiques et par des différences météorologiques. Cependant, sur ces sites, on observe également une **forte augmentation des coefficients d'écoulement pour les crues fortes**.

Les concentrations mesurées sont dans le même ordre de grandeur qu'à Poro, sauf pour le bassin SW35 de Koniambo, soumis à d'intenses travaux de terrassement à partir de 2012, qui enregistre des concentrations plus fortes.

L'épisode **Freda** permet de procéder à des comparaisons entre sites. L'absence de données disponibles pour cet événement à Goro n'a pas permis la comparaison entre les sites les plus touchés. Les périodes de retour sur les courtes durées de pluie sont comparables pour tous les sites, mais le caractère soutenu des précipitations a rendu l'événement plus exceptionnel à Poro. Les exportations de matériaux sont nettement plus modérées à Poum et Koniambo, sauf pour SW35 qui était soumis à une intense activité de terrassement pendant cette période.

Les **difficultés d'estimation des débits et des flux solides** confirment la nécessité **d'adapter les dispositifs de mesure et les stratégies de suivi pour pouvoir observer les événements extrêmes**. Enfin, l'ajout de **turbidimètres, en parallèle des préleveurs**, permettrait de limiter les incertitudes sur les calculs de flux.

Modélisations Pluie-débit-érosion

A Poro, les **modélisations pluie-débit** avec le modèle HEC-HMS ont donné de **bons résultats**. Les paramètres PI et CN peuvent être déterminés en fonction de la durée de temps sec T_s et de l'intensité maximale I_{max15} . Les résultats sur les **modélisations sédimentaires** sont **plus mitigés**. Le paramètre K de l'équation MUSLE a été utilisé comme paramètre de calage et on obtient de bons résultats en validation sur 4 épisodes seulement.

Les premiers tests sur **Koniambo** ont donné de **bons résultats**, qui sont même meilleurs qu'à Poro pour la **modélisation du transport solide**, mais ces tests ne portent que sur quelques épisodes, ce qui vient tempérer ces résultats certes encourageants. Il serait souhaitable également de tester ce modèle sur les données de Poum. D'autres types de modèles devraient être testés pour la modélisation de l'érosion.

Conclusion

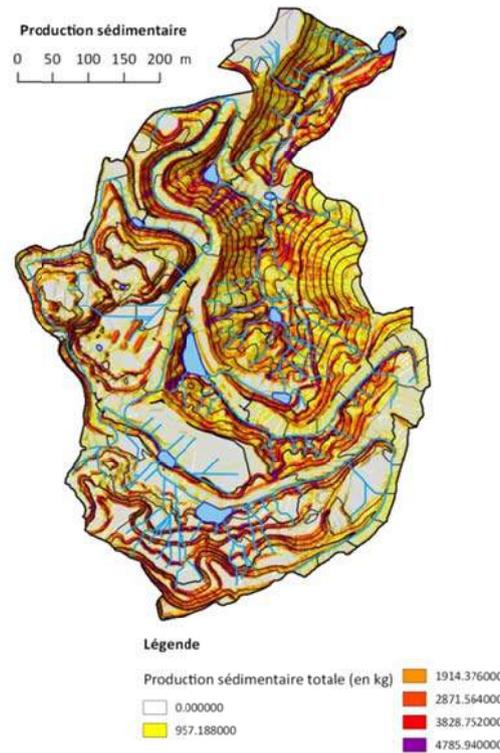
Au terme des quatre années du projet, le bilan est certes mitigé, mais les avancées sont notables. Les résultats obtenus sur Poro ont montré l'intérêt de mesures en continu et de suivis hydro-sédimentaire sur les sites miniers. Ce n'est qu'au prix d'un suivi sérieux pendant la saison cyclonique et d'une analyse fine des données que des résultats exploitables peuvent être obtenus. Ceci implique une critique et une validation dans des délais courts après le recueil des données.

Le projet a souffert de certains retards dans la mise en place et la gestion des stations, ainsi que dans la production de chroniques exploitables. Néanmoins, la situation s'est fortement améliorée en fin de projet et les données qui sont maintenant produites vont fournir des chroniques exploitables pour l'analyse hydro-sédimentaire des bassins versants miniers. Toutefois, une coordination est nécessaire pour harmoniser les pratiques entre les différents sites et produire des données permettant des analyses comparables entre elles.

VIII.2.2.2. Le volet modélisation à l'échelle du bassin versant de Poro et pour l'événement majeur du 25/11/2011 (Bluecham) - Synthèse des pages 46 à 79

La modélisation de l'érosion à fine échelle sur le petit bassin versant de Poro lors de l'événement pluvieux du 25 décembre 2011 (dépression Ex-Fina) a été réalisée à partir du modèle hybride développé par Bluecham SAS en partenariat avec l'Université de la Nouvelle-Calédonie (volet Géosciences) sur la base du modèle MUSLE.

La production sédimentaire a été estimée pour l'ensemble du bassin versant au pas horaire à partir du 24 décembre 2011 à 14:00 et jusqu'au 25 décembre 2011 à 16 : 00. Elle est majoritairement localisée sur les secteurs en talus. L'ensemble du talweg aval apparaît plus sensible à l'érosion et ce, dès le début de l'événement.

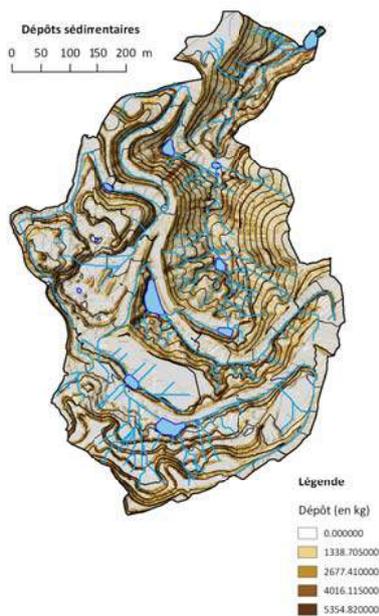


CARTE DE LA PRODUCTION SEDIMENTAIRE

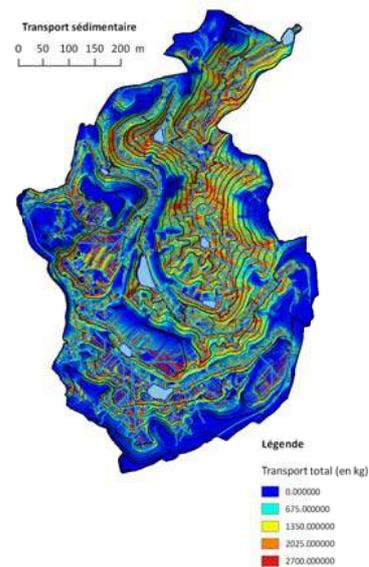
Le transport (T_{out}) et le dépôt de sédiments (D) ont été estimés selon la formule de Tarboton :

$$T_{out} = \min\{S + \sum T_{in}, T_{cap}\} \quad D = S + \sum T_{in} - T_{out}$$

Les résultats sont produits sous la forme de deux cartes : la carte des dépôts et la carte des transports sédimentaires.



CARTE DES DEPOTS SEDIMENTAIRES



CARTE DES TRANSPORTS SEDIMENTAIRES

La confrontation des données de terrain et des estimations issues de la modélisation montrent que la modélisation sous-estime les quantités de sédiments mesurés à l'exutoire lors du maximum d'intensité. Cependant, les flux de sédiments estimés par la modélisation (transportés et déposés à l'exutoire) apparaissent fortement corrélés ($r = 0.87$) avec les mesures réalisées sur le terrain.

Il a été trouvé sur les estimations issues de la modélisation un phénomène de boucle similaire à ceux observés sur le terrain entre les débits et la concentration en sédiment : après un pic d'intensité de précipitation, le flux de sédiment estimé reste plus élevé lors de la diminution de l'intensité des précipitations que lors de l'augmentation de l'intensité des précipitations. Il a été également observé des zones de pertes de flux vers l'extérieur de la zone ainsi que des zones de pollution des flux provenant de zones en amont, hors secteur d'étude. La prise en compte des pertes et des apports de ces secteurs permettrait d'améliorer les estimations réalisées dans le cadre de cette modélisation.

VIII.2.2.3. Le volet Hydrogéologie (Université Réunion) – Synthèse des pages 406 à 459.

Dans le cadre du projet CNRT « Fonctionnement des petits bassins miniers », un volet spécifique relatif au contexte hydrogéologique et aux relations eaux superficielles/eaux souterraines a été proposé par l'Université de La Réunion.

Pour cette analyse, nous présentons les résultats de deux bassins versants expérimentaux menés sur deux sites contrastés :

- Le site de Tiébaghi nord qui représente un bassin versant naturel dans un massif saturé en eau avec un profil d'altération complet sous cuirasse ;
- Le site de Poro qui représente un bassin versant sur un massif désaturé en eau, largement anthropisé avec un profil d'altération tronqué. Ce site a fait l'objet d'une instrumentation spécifique au projet.

Massif saturé sous cuirasse :

Sur le site de Tiébaghi, le niveau à grenailles, très perméable, situé immédiatement sous la cuirasse joue un rôle prépondérant dans l'évolution du régime piézométrique et hydrologique. Ainsi, la situation relative du toit de la nappe vis-à-vis de ce niveau nodulaire est à l'origine de la variation observée du coefficient de ruissellement pour plusieurs crues d'averse.

Nous avons ainsi défini deux types de fonctionnement : en étiage et en hautes eaux (caractérisé par le niveau moyen des piézographes).

Au cours d'un événement pluvieux isolé de 87mm, on a pu estimer le ruissellement et l'évaporation à 22mm soit 25% de la lame d'eau précipitée. Il est évident que ces valeurs dépendent de la situation de la nappe avant l'évènement et de l'intensité de l'épisode pluvieux. La variabilité temporelle du coefficient de ruissellement traduit bien le rôle prépondérant de la cuirasse et de l'horizon nodulaire sous-jacent pour expliquer la variabilité du fonctionnement hydrologique d'un petit bassin versant et la saturation des latérites.

Massif désaturé à profil d'altération tronqué :

Sur le site de Poro l'équipement piézométrique réalisé à proximité d'un chenal d'écoulement a permis de montrer que les eaux souterraines ne contribuent pas significativement à l'écoulement de surface lors des événements pluvieux. Ceci est confirmé par :

- le décalage important entre la crue superficielle et la crue souterraine,
- le maintien d'une zone désaturée pendant l'épisode de crue qui confirme la déconnexion des deux systèmes.

Par ailleurs, l'infiltration potentielle a pu être déterminée, avec l'appui du modèle Paprika, en se basant sur deux critères majeurs, à savoir la pente du terrain et la géologie de surface. Les surfaces favorisant l'infiltration représentent seulement 5% de la surface totale du bassin versant, ce qui explique les coefficients d'écoulement importants, supérieurs à 55%, pour des averses de plus de 85mm (Navarrot 2012).

L'étude a permis de mettre ce résultat en relation avec le dénudement de la surface par l'exploitation, le fort dénivelé de ce massif et la faible perméabilité du substratum subaffleurant telle que mis en évidence par des essais de slug Test

VIII.2.2.4. Le volet apport des lames d'eau radar (Météo-France NC) - Synthèse des pages 492 à 528

En Nouvelle-Calédonie, il existe un réseau institutionnel de plus de 100 pluviomètres (Météo-France et DAVAR). Les capteurs des miniers sont venus enrichir les données déjà présentes pour ce projet d'étude.

Cependant, bien que ce réseau soit dense, il est réparti de façon hétérogène et peut connaître quelques défaillances, trois RADAR hydrométéorologiques (bande C) complètent donc ce dispositif. Pour être comparées à des mesures pluviométriques, les réflectivités RADAR sont transformées selon des lois mathématiques en lames d'eau (en millimètres par m²). En revanche, la résolution horizontale des cartes de lame d'eau RADAR est de 1km².

Entre 2011 et 2013, Météo-France a amélioré la qualité des mesures RADAR en développant une méthode de calibration. Cette dernière consiste à interpoler spatialement le rapport entre les mesures des pluviomètres et celles du RADAR, appelé par la suite « carte des facteurs correctifs ».

L'étude réalisée dans le cadre du projet « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » porte sur la qualité de la détection des quantités de pluies liées à des épisodes extrêmes sur des petits bassins versants miniers. L'étude consiste en l'analyse statistique des biais entre les valeurs observées aux pluviomètres et les valeurs de lames d'eau correspondante. Nous avons également évalué les cartes produites comme le ferait un prévisionniste en mode opérationnel.

L'expertise a porté sur les épisodes et les sites suivants :

Episodes pluvieux	Poum	Koniambo	Poro	Goro
24 décembre 2011	Tiébaghi	Tiébaghi	Lifou	Lifou
12 mars 2013	Radar de Tiébaghi en panne.			
2 juillet 2013			Lifou	Lifou
17-18 janvier 2014	Tiébaghi		Lifou	
3-4 février 2014		Tiébaghi	Lifou	

Tableau 1 : Sites étudiés (en vert) et RADAR sélectionnés.

Les principaux résultats et bénéfices mis en exergue dans cette étude :

- En 2013, l'utilisation d'une carte de facteurs correctifs mensuels a été retenue pour une utilisation en mode opérationnel (FC-OPER). Elle améliore la lame d'eau RADAR par rapport à une LE BRUTE d'environ 20%. Les améliorations sont surtout notables pour les quantités inférieures à 100mm en 24h, mais évidemment moindres pour les quantités extrêmes. Cela permet de prendre en compte la variabilité saisonnière entre saison humide et saison sèche mais, par construction, cela a tendance à lisser les résultats.
- Un second facteur correctif a été développé pour ce projet afin de rendre plus réalistes la spatialisation des quantités mesurées (FC-EPISODE). Il est réalisé a posteriori avec les données mesurées lors de l'épisode pluvieux. Il permet de reconstituer les séries de données sur les sites d'étude dépourvus de pluviomètre ou victimes d'un matériel défaillant.
- L'impact de l'absence d'un pluviomètre sur la méthode a également été évalué. On trouve que la valeur interpolée est en moyenne égale à la valeur de référence, avec un écart-type de l'ordre de 30%. Autrement dit, quand on retire un poste sur les 50 postes environ qui contribuent au calcul de la carte de facteurs correctifs, il peut y avoir une différence de 30% dans la valeur du facteur correctif, ce qui pourrait amener pour l'utilisateur final à un cumul de 130 mm ou de 70 mm au lieu de 100 mm. Cela souligne l'importance de bien concevoir le réseau de suivi et de l'entretenir.
- Le principal biais en situation de pluie intense s'explique par une atténuation du signal RADAR. Ce phénomène survient lorsque le signal traverse plusieurs zones de fortes précipitations situées entre le RADAR et la zone d'étude. Il faut en tenir compte dans l'interprétation des résultats.
- Enfin, en juillet 2014, les résultats de l'étude ont aussi conduit à revoir la paramétrisation des RADAR et de la chaîne de post-traitement.

Aujourd'hui, la Nouvelle-Calédonie dispose d'une base de données sur les pluies extrêmes importante et fiable. Les outils et méthodes développés permettent une supervision accrue des données hydrométéorologiques, notamment la détection de données douteuses. L'outil développé pour réaliser les FC-EPISODE permet des estimations plus fiables lors de la reconstitution de séries de données, notamment celles des sites miniers parfois difficiles

d'accès. Il améliore la détection des zones impactées et facilite la rédaction des rapports d'intempéries.

Toutefois, on peut regretter la faible utilisation des lames RADAR dans le cadre du projet. L'obstacle principal réside dans la difficulté à établir une relation pluies-débits simple sur l'ensemble des petits bassins versants étudiés. Il s'agit là, d'un point à traiter dans une étude complémentaire en partenariat avec la DAVAR.

En conclusion, les performances des lames d'eau RADAR sont désormais mieux connues, à des échelles plus fines que celles habituellement supervisées en météorologie. En effet, certains bassins versants étudiés étaient inférieurs au km². En tenant compte de toutes les précautions d'usage et bien que le système soit encore perfectible, cette étude peut être un tremplin vers un système d'alerte et de suivi du risque hydrométéorologique. Il convient désormais d'étudier avec chaque acteur de la faisabilité d'un tel système adapté à leurs besoins.

VIII.3. Mise à disposition des données et produits du programme

VIII.2.1. Le volet Informatique partie B : « Système d'information inter opérable ». (UNC) - Synthèse des pages 234 à 258

L'objectif de ce volet a été de mettre en œuvre un système interopérable d'informations et d'observations de manière à promouvoir et pérenniser la production scientifique et technique résultant des travaux de l'ensemble de l'équipe projet. L'interopérabilité de ce système découle du respect des normes reconnues de :

- l'OGC (Open Geospatial Consortium) pour l'information géographique et les séries de données.
- l'OAI (Open Archives Initiative) pour l'information documentaire

Ce système a été conçu comme une plate-forme d'échange pour promouvoir les partenariats, initiatives et projets communs de développement dans le domaine du suivi des petits bassins miniers. La volonté était durant la phase opérationnelle du programme de permettre aux partenaires du consortium que les résultats produits par le groupe projet soient intégrés et rendus accessibles, via le centre de ressources numérique inter opérable de l'UNC, associant quatre grandes familles d'outils :

- Un outil de communication et d'information (portail) donnant accès à un moteur de recherche.
- Un moteur d'indexation et de recherche sur les données scientifiques et techniques capable de rassembler par moissonnage les méta-données disponibles au niveau local, national et régional.
- Une base de méta-données sur les données produites par les partenaires du groupe projet.
- Un entrepôt de données (bases de données, bases de données géographiques, bases de données documentaires).

Dans une seconde phase, après la restitution du programme, l'objectif était que le système mis en place soit interopérable avec le portail du CNRT et rendu accessibles via ce dernier.

Les outils mis en place pour ce programme sont :

1. Un espace de travail collaboratif (<https://confluence.univ-nc.nc>);
2. Deux plateformes techniques pour la capitalisation et la visualisation des données et métadonnées issues scientifiques et techniques,
3. Une plateforme de diffusion de données documentaires.

L'espace de travail collaboratif mis en place par l'UNC est basé sur le bien connu wiki d'entreprise dénommé « Confluence ». Confluence sert, en particulier, à la communication autour du projet : tenir les intervenants informés et, en fournissant un emplacement central pour les informations du projet, gérer les annonces et faciliter les discussions. Toutes les présentations, feuilles de calcul et documents divers peuvent être stockés sur Confluence où ils sont partageables (selon les droits accordés) entre les participants au projet.

La plateforme de visualisation et de téléchargement des données et métadonnées géographiques est accessible à l'adresse : <http://grimm.univ-nc.nc/geoportail/>. Le système développé dans le cadre de ce programme constitue une des parties d'un projet plus ambitieux de conception d'une infrastructure globale pour le système d'information de l'UNC. Elle s'articule autour des standards de l'OGC pour permettre l'accès aux données réparties, hétérogènes, multi sources.

La plateforme de visualisation et de téléchargement des séries de mesures et d'observations est accessible à l'adresse : <http://servlet.univ-nc.nc/series/cnrt/index>. Sa conception s'appuie également sur les normes SWE de l'OGC qui permettent, d'une part, l'enregistrement, le stockage et le partage de données provenant de capteurs et d'autre part la description du processus utilisé pour obtenir les données.

Pour les bassins versants équipés intégrés dans le programme, les données recueillies et intégrées dans le système développé sont les suivantes :

- Précipitations (Basculement d'auget)
- Concentration de matières en suspension dans l'eau de ruissellement (g/l)
- Turbidité de l'eau de ruissellement (NTU)
- Débits d'eau (m³/s)

Sur chacune des stations de mesure, les données et métadonnées sont disponibles. Par exemple, sur la station dite « seuil aval » de Poro, on trouve une photo du site, la description des outils de mesure utilisés, la géolocalisation et ce qui est mesuré. Les données issues de ces outils de mesure sont représentées sous forme de graphique et sont téléchargeables sous forme de fichier.

Le serveur de données documentaires est hébergé et maintenu par l'UNC (<http://orioai.univ-nc.nc/search-cnrt/>). Grâce à un moteur de recherche, il est possible d'interroger la base de métadonnées du moissonneur pour accéder aux descriptions des ressources et, ainsi, aux ressources elles-mêmes, où qu'elles soient. La recherche peut se faire par combinaison booléenne de critères. Les opérateurs booléens disponibles sont le ET, OU et SAUF.

VIII.2.2. Le document préparatoire à la publication d'un guide méthodologique des bonnes pratiques de l'hydrologie minière (A2EP) – Synthèse des pages 450 à 491

La mission confiée à A2EP, réalisée en partenariat avec l'IRSTEA et l'UNC (dans le cadre du CDD d'Antoine Guyonneau cité au chapitre 1) vise à produire un document récapitulatif sur l'acquisition et la bancarisation des mesures de terrain (hydrologie, qualité des eaux, transport solide). Plus précisément, il s'agit de rassembler les informations utiles et nécessaires à l'organisation des données pour un réseau de mesure décrivant des méthodes et procédures de suivi adaptées au contexte de la Nouvelle-Calédonie. A terme, l'objectif vise à produire, après la restitution du programme, un guide méthodologique sur les bonnes pratiques de l'hydrologie minière, à finaliser et valider avec le concours et l'expertise des services compétents du territoire, la DAVAR et la DIMENC.

Les trois chapitres techniques du document présentent les éléments de base pour concevoir puis organiser efficacement les informations obtenues dans le cadre d'un réseau de suivi hydrosédimentaire.

Le chapitre 2 présente les objectifs des réseaux de suivi hydrosédimentaire, les méthodes pour l'acquisition des paramètres indispensables et le traitement des données. Le chapitre 3 propose une définition d'objets de référence (réseau, stations, capteurs, événements) qui permettent de structurer une base de données hydrométriques et d'organiser les données issues des mesures réalisées. Sachant qu'il existe sur le marché des systèmes de gestion de base de données hydrométriques adaptés aux spécificités des données hydrologiques (par exemple, Hydras 3 par OTT ou Aquarius par Aquatic informaticsTM), la présentation se veut générique et indépendante du logiciel qui pourra être utilisé. Le chapitre 4 propose une référence indicative pour les données descriptives de chacun de ces objets. L'idée de ce chapitre est de rappeler les informations constituant le socle minimal requis pour garantir la traçabilité et la vérification des données acquises. Chaque gestionnaire pourra ensuite ajouter d'autres informations propres à son organisation.

Des exemples d'application sont fournis pour différentes stations opérées en Nouvelle-Calédonie et des fiches de terrain type sont présentées pour les événements les plus courants. Enfin, des dictionnaires de données pour les informations les plus significatives sont présentés. La finalité de ce travail est de fournir un socle commun, visant à rendre le plus homogène possible les informations renseignées par différents gestionnaires.

VIII.3. Analyse synthétique et critique des résultats produits

VIII.3.1. Une dynamique de site différente et un caractère oscillatoire dans l'action.

En regard des objectifs majeurs que s'était donné le programme en termes de connaissance et de comparaisons géographiques, géomorphologiques et climatiques des petits bassins versants miniers néo-calédoniens, le consortium a produit de nombreux résultats en termes de qualification et de quantification des flux liquides et solides issus des petits bassins versants miniers.

Toutes les contributions sont étroitement complémentaires et permettent de mieux comprendre au plan fondamental le fonctionnement de ces bassins, et en aval de ces résultats fondamentaux, elles débouchent sur des propositions à finalité appliquée directe pour la profession minière et les services techniques du territoire en charge des problématiques associées à l'hydrologie minière.

Avant la réalisation de ce programme, la connaissance sur le sujet était des plus fragmentaires, ainsi que le soulignait l'appel à projet lancé en 2009 : « En l'absence de données *in situ* sur les phénomènes de ruissellement et d'érosion, le CNRT « Nickel et son environnement » appelle à soumettre des projets pour une méthodologie, une mise en œuvre et une mutualisation d'acquisition de données et de suivi des principaux paramètres hydrologiques (pluie - débit - transport en solution et solide) sur des sites pilotes représentatifs de la variabilité de fonctionnement des bassins versants miniers. ».

L'absence de données *in situ* sur les bassins versants d'un territoire majeur de l'activité minière mondiale peut paraître paradoxale à celui qui ne connaît pas la Nouvelle-Calédonie. Elle s'explique pourtant facilement du fait du relief fortement pentu de nombre de sites, mais aussi par les conditions climatiques exceptionnelles (dépressions tropicales et cyclones) qui peuvent survenir et qui sont susceptibles de générer de très fortes précipitations. Les deux paramètres conjugués entraînent des ruissellements superficiels rapides et très importants au plan volumétrique. C'est à ce moment-là qu'il faut être en mesure de réaliser des mesures qui soient significatives du fonctionnement hydrologique (quantification et qualifications de flux liquides et solides) des petits bassins versants miniers, pour estimer leur impact environnemental et trouver les solutions les plus efficaces pour le minimiser. Ces mesures sont des plus malaisées qui soient à réaliser, sur des sites industriels sur lesquels l'accès est très contraint dans les situations climatiques qui sont pourtant les plus intéressantes à étudier. La sécurité des personnels est engagée et les installations automatisées qui peuvent être implantées pour pallier la présence physique de l'homme sont très souvent mises à mal par la violence des événements et ce, quelles que soient les précautions constructives prises. Ce sont ces difficultés qui expliquent les manques signalés par l'appel à projet.

Lorsque cet appel à projet du CNRT a été lancé, une initiative avait été lancée par le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, associant la DAVAR, l'UNC et le CFTMC, pour mettre en œuvre un bassin expérimental (en fait, deux petits bassins versants emboîtés) sur le site de la mine-école de Poro dans le cadre du projet « Hydromine » restitué en 2013. L'appel à projet lancé par le CNRT en 2009 faisait référence à ce programme, en appelant une réponse intégrant le « suivi de l'installation des sites pilotes (instrumentation et monitoring) ou des sites existants (dont celui d'« Hydromine » à Poro), en partenariat avec les entreprises minières intéressées par « leur contexte ».

Contraint par les moyens financiers disponibles alloués par le CNRT qui ne permettaient d'installer des équipements sur d'autres sites, le consortium a conçu sa réponse à l'appel à projet en faisant des bassins emboîtés de Poro le noyau dur géographique et le site pilote de référence de son programme. Et il a indiqué dans celui-ci qu'il avait vocation à intégrer les sites pilotes industriels que mettraient à la disposition du programme les industriels miniers.

Les quatre années de fonctionnement ont montré une excellente dynamique d'ensemble autour du site de Poro, dont les résultats sont à la hauteur de ce que l'on pouvait espérer grâce à la collaboration des scientifiques du consortium et des techniciens et ingénieurs de la DAVAR qui ont étroitement travaillé, tout d'abord dans le cadre du programme Hydromine, puis dans sa prolongation financée par le CNRT pour élargir la base de données événementielles de ce site de référence. Il faut certainement y voir l'influence des hommes et des femmes (les stagiaires et leurs encadrants) qui ont été physiquement présents sur le site de Poro lors des périodes clés courant de janvier à mai et qui ont pu, de ce fait, procéder aux mesures *in situ* que l'on recherchait.

L'élargissement du programme à d'autres sites pilotes industriels instrumentés par les grandes sociétés minières de la place n'a pas connu la même dynamique. Le choix des bassins et l'accès aux résultats hydro-sédimentaires produits par les services hydrologiques internes ou les bureaux d'études intervenant en sous-traitance des sociétés minières ont démarré lentement et ce n'est que petit à petit, grâce aux échanges positifs lors des séances du comité de pilotage ou au sein des réunions du groupe instrumentation, que les données ont été fournies au groupe projet.

Incontestablement, la compilation de cette fourniture révèle un déficit d'informations par rapport au site pilote de Poro. Elle s'est faite avec un caractère oscillatoire, avec des périodes d'avancée et des périodes de calme. Cette alternance est indiscutablement liée au rythme des missions en Nouvelle-Calédonie de l'hydrologue du projet, Nicolle Mathys de l'IRSTEA Grenoble. Interlocutrice spécialiste du sujet, chacune de ses interventions a été l'occasion d'une redynamisation de la démarche en termes d'hydrologie minière pure. Fort de ce constat très vite réalisé, le groupe projet a fait évoluer le planning des missions de l'IRSTEA. Initialement prévues pour être réalisées à deux, voire trois intervenants présents de façon synchrone en Nouvelle-Calédonie une fois par an, les 15 missions prévues ont été réalisées pour l'essentiel par la même intervenante et programmées de façon plus rapprochées et dans le temps, avec des temps de séjour plus longs, répondant ainsi à la demande exprimée par la profession.

Il faut voir dans cette demande d'une présence pérenne d'un hydrologue spécialisé, l'une des raisons de la contractualisation d'un ingénieur, ancien stagiaire du programme (Antoine Guyonneau), pendant cinq mois, sur financement complémentaire du CNRT, la dernière année du programme.

C'est à l'initiative du comité de pilotage que s'est fait ce recrutement. A la fin 2013, les commentaires exprimés dans ce paragraphe ont, en effet, fait l'objet d'un constat partagé par l'ensemble des parties prenantes ayant suivi la progression du programme. Ce constat portait, d'une part, sur la reconnaissance de la qualité des informations rassemblées sur Poro, mais d'autre part aussi, sur le déficit de données et de validation de ces données, lorsqu'elles existent, sur les autres sites instrumentés.

Le même comité de pilotage a également acté le souhait affirmé de la nécessité de donner un prolongement au programme du CNRT « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » sur sa composante majeure : l'hydrologie minière. Le but à court terme assigné à cette suite était de compléter et de qualifier les bases de données insuffisantes sur les sites pilotes industriels et de poursuivre l'acquisition de la série en cours sur Poro.

La démarche validée a été de recruter, pour quelque mois, un ingénieur qualifié pouvant servir d'interface avec les chercheurs et les prestataires de service ou les services techniques des sociétés minières en charge des mesures hydro-sédimentaires. Ce recrutement temporaire permettait d'espérer que soit trouvée, durant la durée du contrat, une solution plus durable.

La finalité à terme de l'action était clairement de pouvoir recruter de façon pérenne, sur un poste dont l'implantation reste à définir et sur un financement à rechercher auprès du SIM, un ingénieur dédié à ces tâches, avec un engagement contractualisé des sociétés minières pour dégager les moyens souhaitables, matériels et humains, nécessaires à la mise en œuvre opérationnelle des bonnes pratiques à respecter sur leurs domaines miniers.

Des démarches ont été entreprises dans ce sens au cours de l'année 2014. Elles se sont révélées infructueuses pour l'instant, au jour de la restitution de ce programme, faute de prise de décision sur le financement du poste.

VIII.3.2. Les perspectives au terme du programme.

Au-delà des nombreuses pistes d'amélioration et des perspectives suggérées dans les diverses contributions produites par chacune des approches scientifiques étudiées par le consortium, quatre perspectives d'ordre plus général sont proposées.

Une première perspective à court terme concerne la publication d'un guide des bonnes pratiques de l'hydrologie minière. La contribution présentée dans le rapport restitué est un document contributif de base déjà bien élaboré, mais il gagnera à être enrichi et complété par l'expérience des services territoriaux compétents en la matière, à savoir la DAVAR et la DIMENC, et c'est après une nécessaire phase d'échanges avec ces services qu'un guide sera validé et publié dans les mois à venir.

La seconde perspective concerne la question du dimensionnement, de la conception et de la gestion des décanteurs, qui est apparue comme une question cruciale pour la gestion des eaux et des sédiments sur mine. L'étude exploratoire qui a été menée en ce domaine a conclu à la nécessité de suivis et de mesures en entrée et sortie des décanteurs pour permettre de modéliser leur fonctionnement. Un programme de recherche appliquée, réalisable dans le cadre d'une thèse dédiée à cette question a été élaboré.

La troisième perspective concerne le recrutement pérenne souhaité d'un ingénieur d'hydrologie minière agissant en interface avec les sociétés minières qui vont devoir élever leur niveau de compétence dans le cadre de l'évolution de la réglementation minière. Seule la création de ce poste et la volonté des sociétés minières d'affecter en interne du personnel au suivi des sites instrumentés permettront de capitaliser l'expérience du programme et de poursuivre l'action. La structure d'accueil où pourrait être affecté cet ingénieur reste à définir avec les parties prenantes.

Une dernière et quatrième perspective est l'élargissement à venir de la connaissance des flux solides que vont générer les nouveaux programmes du CNRT « *De la mine au lagon* ». Les deux programmes sélectionnés qui vont travailler au cours des trois prochaines années vont s'intéresser aux problématiques des flux particuliers grossiers et des MES depuis les bassins versants miniers jusqu'au lagon, sous les angles « gestion du passif » et « impacts, qualification et quantification des flux ». Une partie des partenaires du programme « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* » est impliquée dans ces programmes à venir. Elle sera amenée à poursuivre, sous des angles d'attaque proches, les études d'hydrologie minière du présent programme dont les acquis se trouveront confortés et enrichis.

Nouméa, le 30 Novembre 2014

Pour le consortium scientifique IRSTEA, METEO- FRANCE (DIRNC), IRD, UNIVERSITE DE LA REUNION, A2EP, UNIVERSITE DE LA NOUVELLE-CALEDONIE et BLUECHAM

Michel ALLENBACH

Les contributeurs au rapport ;

Allenbach Michel, Andreoli Rémi, Cavarero Virgil, Caze Nicolas, Cluzel Dominique, Couturier Arnaud, De Boissieu Florian, Despinoy Marc, Dumas Pascal, Flouvat Frédéric, Gunkel-Grillon Peggy, Hoibian Thierry, Jeanpert Julie, Join Jean-Lambert, Kranitz Thierry, Mangeas Morgan, Mathys Nicolle, Laporte-Magoni Christine, Metayer Cyril, Meyer Michael, Recking Alain, Richard Didier, Rouet Isabelle, Selmaoui-Folcher Nazha, Temau Tehei, Touraivane, Wattelez Guillaume, Yu Olivia,

Les stagiaires du programme accueillis au sein des équipes contributrices, dont les noms suivent : Aksoy Muhammed, Allouin Pierre-Erick, Bazire Nicolas, Carpentier Laureen, Chillou Audrey, Deroy Pierre-Henri, Freydier Perinne, Guyonneau Antoine, Leverman Julia, Moesch Joan, Motto Alexandre, Mu Chengcheng, Navarrot Lucie et dont les travaux constituent une importante documentation dont les références détaillées sont fournies à la page 18.

RESUME

Les éléments de cadrage principaux de l'appel à projet.

L'appel à projet lancé en 2009 par le Centre National de Recherche Technologique (CNRT) « Nickel et son environnement » a posé la problématique des bassins versants miniers en tant que thème d'étude prioritaire dans le cadre de son axe Nickel et Environnement naturel. L'appel à projet visait, d'une part, « à améliorer la compréhension des mécanismes de fonctionnement » et d'autre part, « à quantifier les flux en amont pour une minimisation de l'impact du transport solide en aval, dans les différents contextes géo-morpho-climatiques des petits bassins versants impactés par l'activité minière en Nouvelle-Calédonie ».

Le consortium lauréat.

En réponse à cet appel à projet, un consortium scientifique s'est constitué pour proposer un programme de recherche d'une durée de 4 ans (2010 – 2014) qui a été retenu et contractualisé en août 2010. Ce consortium est composé de six partenaires :

- l'Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC) à travers son EA 3325, le PPME (Pôle Pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement) ;
- le Cemagref (aujourd'hui devenu IRSTEA, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) par le biais de l'unité ETNA (Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches) basée à Grenoble ;
- le bureau d'études néo-calédonien A2EP (Agence pour l'eau et l'environnement du Pacifique) ;
- la Direction Interrégionale de Météo-France en Nouvelle-Calédonie et à Wallis et Futuna ;
- l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD), à travers l'US Espace Nouméa (aujourd'hui devenue UMR 228 Espace-Dev) ;
- L'Université de la Réunion par le biais du LGSR (laboratoire de géosciences), associé à l'UMR-CNRS IPGP 7154 (Unité Mixte de Recherche – Centre National de la Recherche Scientifique Institut de Physique du Globe).

S'ajoute à ce consortium contractualisé, l'intervention de la société Bluecham dans le cadre d'un partenariat avec l'équipe de géosciences du PPME dans le cadre d'actions de recherche-développement sur la thématique érosion.

Le comité de pilotage du programme.

Il a joué un rôle majeur tout au long de la réalisation du programme, ainsi que le prévoyait le projet, en accompagnant les acteurs au fil des quatre années de sa réalisation. Au niveau de sa composition, la volonté a été d'associer l'ensemble des parties prenantes sur le sujet. Le comité, largement ouvert au départ à tous ceux qui souhaitaient y jouer un rôle, a fonctionné en routine sur la base d'une douzaine de personnes présentes aux réunions représentant les membres du consortium, ceux des sociétés minières associées au programme par le biais des petits bassins instrumentés intégrés (SLN, Vale INCO, KNS) ou non (SMSP) dans le périmètre de l'étude, les services du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, partenaires de la convention Hydromine (DAVAR et DIMENC) ayant permis la création du site expérimental de Poro et enfin, le CFTMC sur lequel est implanté ce site.

Vue d'ensemble rapide des petits bassins versants miniers intégrés au programme par les sociétés minières.

Quatre massifs miniers ont été intégrés dans l'étude. Il s'agit, tout d'abord, du massif de Poro qui est implanté sur la côte est de la Grande Terre. Sur ce massif, deux petits bassins ont été étudiés sur le domaine minier exploité par le CFTMC pour le compte de la SLN. Il s'agit de deux bassins emboîtés qui ont été équipés dans le cadre du programme « Hydromine ». Il s'agit ensuite du massif de Poum qui est situé à la pointe nord de la Grande Terre. Sur ce massif SLN, deux bassins ont été équipés et sont intégrés dans le programme. Il s'agit, d'une part, du bassin de Pôvio et d'autre part, du bassin de Titch. Sur la côte ouest, c'est le massif du Koniambo appartenant au domaine minier de KNS qui a été choisi. KNS a proposé que deux bassins, SW34 et SW 35, soient analysés. Enfin, dans le massif du sud, Vale a également proposé d'intégrer 2 bassins : KN15 et K06. Au total, ce sont donc 8 petits bassins versants qui ont été analysés dans le cadre du programme. Nous retiendrons de cette localisation générale qu'elle permet d'aborder de façon minimale, certes, mais sans impasse, la question de la variabilité géographique et climatique puisque ces stations sont situées :

- d'une part, sur le transect latitudinal nord-sud à Poum et Goro.
- d'autre part, sur le transect longitudinal est-ouest à Voh et Poro.



***Localisation des petits bassins versants intégrés au programme
Modifié de la carte « Sites d'activité du Nickel » [DIMENC, 2011]***

Une dynamique de site différente selon les massifs.

En regard des objectifs majeurs que s'était donné le programme en termes de connaissance et de comparaisons géographiques, géomorphologiques et hydro-climatiques du fonctionnement des petits bassins versants miniers néo-calédoniens, le consortium a produit de nombreux résultats en termes de qualification et de quantification des flux liquides et solides issus de ces petits bassins versants miniers. Toutes les contributions sont étroitement complémentaires et

permettent de mieux comprendre au plan fondamental le fonctionnement de ces bassins et, en aval des résultats fondamentaux produits, elles débouchent sur des propositions à finalité appliquée pour la profession minière et les services techniques du territoire en charge des problématiques associées à l'hydrologie minière.

Lorsque l'appel à projet du CNRT a été publié, une initiative avait été lancée par le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, associant la DAVAR, l'UNC et le CFTMC, pour mettre en œuvre un bassin expérimental (en fait, deux petits bassins versants emboîtés) sur le site de la mine-école de Poro, dans le cadre du projet « Hydromine » restitué en 2013. L'appel à projet lancé par le CNRT en 2009 faisait référence à ce programme en appelant une réponse intégrant le « suivi de l'installation des sites pilotes (instrumentation et monitoring) ou des sites existants (dont celui d'« Hydromine » à Poro), en partenariat avec les entreprises minières intéressées par « leur contexte ».

Contraint par les moyens financiers disponibles alloués par le CNRT, qui ne permettaient pas d'installer des équipements sur d'autres sites, le consortium a conçu sa réponse à l'appel à projet en faisant des bassins emboîtés de Poro le noyau dur et le site pilote de référence de son programme. Et il a indiqué dans celui-ci qu'il avait vocation à intégrer les sites pilotes industriels que les industriels miniers mettraient à sa disposition.

Au terme des quatre années du programme, les avancées sont notables. Les résultats obtenus sur Poro ont montré l'intérêt de mesures en continu et de suivis hydrosédimentaires sur les sites miniers. Ce n'est qu'au prix d'un suivi sérieux pendant la saison cyclonique et d'une analyse fine des données que des résultats exploitables peuvent être obtenus. Ceci implique une critique et une validation dans des délais courts après le recueil des données.

Les données produites sur le bassin versant de Poro ont permis de quantifier les réponses hydrologiques et sédimentaires de ces petits bassins à différentes échelles de temps. Les débits de pointe observés sont très élevés et atteignent $41 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ à Poro amont (0.09 km^2). Ceci confirme la nécessité de disposer de mesures pour les tous petits bassins afin d'obtenir des règles de dimensionnement adaptées. A l'échelle de l'épisode pluvieux, les coefficients de ruissellement sont extrêmement variables et peuvent s'observer dans une fourchette comprise entre 0.1 et 0.9. Les temps de concentration sont également très variables, mais très courts (9 à 21 mn). Des méthodes de calcul de ces temps de concentration adaptées au contexte des petits bassins versants miniers ont été identifiées. Les sédiments en suspension sont extrêmement fins et dans des fourchettes de concentration allant de quelques milligrammes à quelques dizaines de grammes par litre. A l'échelle événementielle, le flux total de MES peut être correctement estimé à partir du débit maximum de la crue. Les épisodes forts (plus de 85 mm de pluie) représentent 90 % des flux à Poro aval. A lui seul, l'épisode FINA de décembre 2011 représente 50 % du flux total des cinq années de suivi. Ceci confirme la nécessité de réaliser des suivis dans la durée et de se donner les moyens d'obtenir des mesures sur les épisodes extrêmes.

On a globalement obtenu des coefficients d'écoulement plus faibles sur les sites miniers de Koniambo et de Poum. Ils s'expliquent à la fois par les différences morphologiques et par des différences météorologiques. Cependant, sur ces sites, on observe également une forte augmentation des coefficients d'écoulement pour les crues fortes. Quelques épisodes seulement ont pu être analysés pour les flux de MES sur ces sites et il n'a pas été possible de faire des estimations à l'échelle annuelle. Les difficultés d'estimation des débits et des flux

solides confirment la nécessité d'adapter les dispositifs de mesure et les stratégies de suivi pour pouvoir observer les évènements extrêmes.

Au niveau des difficultés rencontrées, le projet a souffert de certains retards dans la mise en place et la gestion des stations, ainsi que dans la production de chroniques exploitables sur les sites pilotes « industriels » intégrés au programme. Néanmoins, la situation s'est fortement améliorée en fin de projet et les données qui sont maintenant produites vont fournir des chroniques exploitables pour l'analyse hydro-sédimentaire des bassins versants miniers. Toutefois, une coordination est nécessaire pour harmoniser les pratiques entre les différents sites et produire des données qui permettront des analyses comparables entre elles.

Les perspectives au terme du programme.

Au-delà des nombreuses pistes d'amélioration et des perspectives suggérées dans les diverses contributions produites par chacune des approches scientifiques étudiées par le consortium, quatre perspectives d'ordre plus général sont proposées.

Une première perspective à court terme concerne la publication d'un guide des bonnes pratiques de l'hydrologie minière. La contribution présentée dans le rapport restitué est un document contributif de base déjà bien élaboré, mais il gagnera à être enrichi et complété par l'expérience des services territoriaux compétents en la matière, à savoir la DAVAR et la DIMENC, et c'est après une nécessaire phase d'échanges avec ces services qu'un guide sera validé et publié dans les mois à venir.

La seconde perspective concerne la question du dimensionnement, de la conception et de la gestion des décanteurs qui est apparue comme une question cruciale pour la gestion des eaux et des sédiments sur mine. L'étude exploratoire qui a été menée en ce domaine a conclu à la nécessité de suivis et de mesures en entrée et sortie des décanteurs pour permettre de modéliser leur fonctionnement. Un programme de recherche appliquée, réalisable dans le cadre d'une thèse dédiée à cette question a été élaboré.

La troisième perspective concerne le recrutement pérenne souhaité d'un ingénieur d'hydrologie minière agissant en interface avec les sociétés minières qui vont devoir élever leur niveau de compétence dans le cadre de l'évolution de la réglementation minière. Seule la création de ce poste et la volonté des sociétés minières d'affecter en interne du personnel au suivi des sites instrumentés permettront de capitaliser l'expérience du programme et de poursuivre l'action. La structure d'accueil où pourrait être affecté cet ingénieur reste à définir avec les parties prenantes.

Une dernière et quatrième perspective est l'élargissement à venir de la connaissance des flux solides que vont générer les nouveaux programmes du CNRT « *De la mine au lagon* ». Les deux programmes sélectionnés qui vont travailler au cours des trois prochaines années vont s'intéresser aux problématiques des flux particuliers grossiers et des MES depuis les bassins versants miniers jusqu'au lagon, sous les angles « gestion du passif » et « impacts, qualification et quantification des flux ». Une partie des partenaires du programme « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* » est impliquée dans ces programmes à venir. Elle sera amenée à poursuivre, sous des angles d'attaque proches, les études d'hydrologie minière du présent programme dont les acquis se trouveront confortés et enrichis.

CNRT "Nickel et son environnement"

Rapport scientifique

Edition 2016

