



HAL
open science

Érosion hydrique des sols en Méditerranée

Damien Raclot

► **To cite this version:**

Damien Raclot. Érosion hydrique des sols en Méditerranée. Hydrologie. Université montpellier, 2021. tel-03203346

HAL Id: tel-03203346

<https://ird.hal.science/tel-03203346v1>

Submitted on 20 Apr 2021

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.



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



Biodiversité
Agriculture
Alimentation
Environnement
Terre
Eau

Mémoire

constitué en vue de l'obtention du diplôme d'
HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES
École Doctorale GAIA (ED 584)
Filière Sciences de la Terre et de l'Eau

Érosion hydrique des sols en Méditerranée

Damien RACLOT

Chargé de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement
UMR LISAH - 2 place Viala - F-34060 MONTPELLIER

Soutenue le 5 février 2021, devant le jury suivant :

- Anne-Véronique Auzet, Prof. Univ. Strasbourg, rapporteur
- John Wainwright, Prof. Univ. Durham, rapporteur
- Abdallah Laouina, Prof. Univ. Mohamed V, Rabat, rapporteur (membre invité)
- Gil Mahé, DR IRD, Montpellier, examinateur
- Wolfgang Ludwig, Prof. Univ. Perpignan, examinateur
- Roger Moussa, DR INRAE, Montpellier, examinateur
- Yves Le Bissonnais, DR INRAE, Montpellier, examinateur (membre invité)



Préambule

Ce mémoire d'HDR comprend deux parties, dans l'ordre attendu par l'école doctorale GAIA : une première partie factuelle de **12** pages qui présente un résumé de ma carrière incluant les indicateurs demandés par l'école doctorale puis une seconde partie de **56** pages hors références, qui fait le bilan de mes travaux scientifiques et présente mes perspectives de recherche.

Ce mémoire est également accompagné de trois annexes, comptabilisant en tout 129 pages. L'annexe 1 détaille un projet de thèse dont le financement est acquis et l'annexe 2 un projet de recherche ayant été soumis à l'appel d'offres EC2CO 2019. L'annexe 3, quant à elle, reprend une sélection de tirés à part correspondant à **8** articles parus dans des revues à comité de lecture.

Je tiens dans ce préambule à remercier et exprimer toute ma reconnaissance aux étudiants que j'ai eu la chance d'encadrer, à mes mentors, mes collègues, mes directeurs et présidents successifs.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté de lire ce mémoire et d'assister à la soutenance.

À tous, un énorme **MERCI**

Damien Raclot

Table des matières

PARTIE I RÉSUMÉ DE CARRIÈRE.....	4
Curriculum Vitae.....	5
Participations à des projets et infrastructures de recherche.....	6
Encadrement de la Recherche.....	7
Activités d'enseignement.....	10
Animation de la Recherche et autres responsabilités.....	11
Productions scientifiques.....	13
PARTIE II RÉSUMÉ DES TRAVAUX DE RECHERCHE ET PERSPECTIVES.....	17
<i>Introduction.....</i>	18
<i>Volet 1. Développement de dispositifs, méthodes et outils pour appuyer la compréhension du fonctionnement hydro-érosif des bassins versants.....</i>	24
Introduction.....	24
Dispositifs d'observation in-situ des flux hydro-érosifs.....	24
Spatialisation de l'hétérogénéité des bassins versants.....	28
Modélisation distribuée de l'érosion hydrique.....	35
Bilan du volet 1.....	39
<i>Volet 2. Intensité et variabilité des facteurs et processus de l'érosion hydrique en Méditerranée.....</i>	41
Introduction.....	41
À l'échelle de la parcelle.....	42
Dynamique temporelle à l'échelle du bassin versant.....	45
Variabilité spatiale à l'échelle du bassin versant.....	52
Bilan du volet 2.....	59
<i>Volet 3. Quelques exemples d'appui à la gestion des bassins versants.....</i>	61
Introduction.....	61
Impact du nombre et de la localisation de bandes enherbées.....	62
Impact de plans de gestion dans un contexte de changement climatique.....	63
Efficacité d'aménagements de lutte contre le ravinement.....	66
Bilan du volet 3.....	68
<i>Perspectives.....</i>	70
Volet qualitatif de l'érosion.....	71
Mieux lier érosion événementielle et évolution de la ressource en sol sur le moyen et long-terme.....	72
Liste bibliographique citée (extérieure au candidat).....	74
<i>Lexique des principaux acronymes et abréviations utilisés.....</i>	<i>78</i>
ANNEXES.....	79
ANNEXE 1 : Projet de thèse ayant obtenu un financement IRD-ARTS.....	80
ANNEXE 2 : projet CARAFE (version soumise à EC2CO en 2019).....	89
ANNEXE 3 : sélection de tirés à part.....	96

PARTIE I

RÉSUMÉ DE CARRIÈRE

Curriculum Vitae

État civil

Damien RACLOT

Né le 30/08/1973 à Dole (39) - Nationalité française - Marié - 2 enfants

Poste actuel

Chargé de Recherche, Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
rattaché à l'UMR LISAH (INRAE-IRD-Montpellier SupAgro), Montpellier

mots-clés : érosion des sols, hydrologie, télédétection, SIG, analyses spatiales

courrier électronique : damien.raclot@ird.fr

identifiants :

- Web of Science Researcher ID : [C-9473-2012](#)
- ORCID : [0000-0002-6445-6168](#)

Formation

- Juin 2003 **Doctorat** en Sciences de la Terre et de l'Eau, Université de Montpellier II, mention très honorable.
- Septembre 1997 **Ingénieur** de l'ENGEES (Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg), mention Bien.
- DEA**¹ « Systèmes Spatiaux et Environnement », Université Louis Pasteur de Strasbourg (67), mention Bien, prix fondation Xavier Bernard.

Expériences

- Depuis octobre 2004 **Chargé de Recherche** à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), affecté à Montpellier à l'unité mixte de recherche (UMR) LISAH dans l'équipe « *Erosion et transport solide* » : thème de recherche « Gestion conservatoire des eaux et des sols ». Affectation en Tunisie de 09/2007 à 08/2011 et au Maroc de 09/2015 à 08/2018. Passage en 1ère classe en 2009.
- 2003 à 2004 **Ingénieur de Recherche** (Vacataire CDD) à l'UMR « Systèmes et Structures Spatiaux » Cemagref/ENGREF de Montpellier (Maison de la télédétection, 34000) : recherches sur la caractérisation des chemins de l'eau sur les « têtes » de bassins versants, en lien avec le contexte géographique.
- 1999 à 2003 **Doctorant** (bourse BDI/Région) à l'UMR 3S Cemagref/ENGREF de Montpellier sous la direction de Michel Desbordes et Christian Puech : sujet intitulé « *Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine* ».
- 2002 à 2003 **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche** (ATER) à l'Université Montpellier II, ½ poste : services à l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (ISIM).
- 1999 à 2002 **Moniteur** du Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur (C.I.E.S) à l'Université Montpellier II : services à l'ISIM.
- 1998 à 1999 **Objecteur de conscience** à l'UMR 3S Cemagref/ENGREF de Montpellier : suivi de projets et encadrement de stagiaires, TP et TD en SIG et télédétection sur les problématiques de gestion du risque (inondation, érosion, feux de forêt, etc).
- 1997 **CDD** ENGREF à l'UMR 3S Cemagref/ENGREF : participation au Projet National de Recherche sur les Zones Humides (PNRZH) ; élaboration de TP, TD en SIG et télédétection.

¹ DEA signifie « Diplôme d'Études Approfondies » et est l'équivalent du Master 2. Une liste des principales abréviations utilisées dans ce mémoire est répertoriée à la fin du document (p. 78).

Participations à des projets et infrastructures de recherche

Les différents projets et infrastructures de recherche auxquels j'ai participé (Table i) illustrent le positionnement méditerranéen de mon activité.

Table i. Liste de projets et infrastructures de recherche.

Acronyme	Titre	Date	Financement	Porteur	Rôle
Projets de recherche					
MESOEROS 21	MEDiterranean SOils EROsion and vulnerability to global change during the 21st century	2007-2010	ANR Vulnérabilité (315 k€)	Y. Le Bissonnais	Resp. activités sur site tunisien
DIGISOL-HYMED	DIGItal SOIL Mapping by HYPerspectral imagery for environmental modelling in MEDiterranean regions	2009-2012	ANR blanc (475 k€)	C. Gomez & P. Lagacherie	Resp. activités sur site tunisien
LACCAVE	Long term impacts and Adaptations to Climate Change in Viticulture and Enology	2012-2015	INRA (450 k€)	N. Ollat & JM. Touzard	Participant
R_Osmed	Réseau de bassins versants pour l'étude de l'érosion des Sols en Méditerranée	2011-2014	MISTRAL/Sicmed	Y. Le Bissonnais	Co-animateur du réseau
LEBNA	Approche biophysique et socio-économique de la gestion de l'eau dans la région du Cap Bon : Site du Lebna	2011-2015	MISTRAL/Sicmed (70 k€)	F. Jacob & I Mekki	Resp. axe Érosion
ALMIRA	Adapting Landscape Mosaics of mediterranean Rainfed Agrosystems for a sustainable management of crop production, water and soil resources	2014-2018	ANR Transmed (600 k€)	F. Jacob	Resp. paramétrisation modèles
MASCC	Mediterranean Agricultural Soils Conservation under global Change	2016-2019	ERANET ARIMNet2 (490 k€)	D. Raclot	Coordinateur
ASSESS	impActs and feedbackS between climate and Soil affected by EroSion: cost in terms of carbon Storage in Mediterranean regions	2017-2021	ERANETMED (300 k€)	B. Guenet	Resp. Données expérimentales flux Carbone.
CHAAMS	Global Change: Assessment and Adaptation to Mediterranean Region Water Scarcity	2018-2020	ERANETMED (330 k€)	L. Jarlan	Participant
ALTOS	Managing water resources within Mediterranean agrosystems by accounting for spatial structures and connectivities.	2020-2023	PRIMA (1100 k€)	F. Jacob	Participant
Infrastructures de recherche					
JEAI VECTEUR	Vulnérabilité des sols et des ressources hydriques du Nord du Maroc face aux changements globaux	2013-2017	IRD	M. Chikhaoui	Correspondant IRD
LMI NAILA	gestioN des ressources en eAu dans les mLieux rurAux tunisiens	2016-2020	IRD	F. Jacob & I Mekki	Participant
OMERE	ORE « Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau »	2003-en cours	Min. Recherche INRA IRD	J. Molénat & D. Raclot & R. Zitouna (Albergel & Voltz avant 2011)	Coordinateur depuis 2011 (gestionnaire de site avant)
RBV1 et 2	SOERE « Réseau de Bassins Versants »	2010-2017	Allenvi	J. Gaillardet	Participant
CRITEX	Exploration innovante de la « zone critique » des bassins-versants	2012-2020	ANR Equipex	J. Gaillardet	Participant
OZCAR	Infrastructures de Recherche française « Observatoires de la Zone Critique Applications et Recherches »	2017-en cours	Allenvi	J. Gaillardet & I. Braud	Participant et membre suppléant du comité exécutif

Encadrement de la Recherche

Dans un article du journal « Le Monde » du 18 mars 2020, le physicien Jean-Marc Lévy-Leblond défend l'idée que rien ne garantit qu'une civilisation, si avancée soit-elle techniquement et culturellement, entretienne une activité scientifique. Il illustre ce propos avec le déclin vertigineux du nombre de savants scientifiques entre la civilisation grecque et celle de Rome. Il reprend aussi l'idée de Derek de Solla Price « *qu'une société développée a besoin de la recherche pour des raisons indépendantes de ses contenus, à savoir garantir une compétence technoscientifique collective. Nous aurions besoin de chercheurs car nous aurions besoin de formateurs* ». Les activités d'encadrement par la recherche jouent cette fonction centrale de diffusion de la culture scientifique, c'est pourquoi je m'y suis fortement impliqué depuis mon recrutement, avec une sensibilité particulière pour l'encadrement de personnes provenant de pays du Sud. C'est aussi pourquoi j'ai suivi, en 2012, la formation « Accompagner et encadrer un doctorat à l'IRD » réalisée par le cabinet de conseil ASCEO.

Depuis mon recrutement à l'IRD, j'ai eu l'occasion d'encadrer 4 doctorants en encadrement principal, 2 doctorants en appui/soutien plus ponctuel, 6 post-doctorants et 23 étudiants de niveau Master ou ingénieur. Je suis actuellement engagé dans le co-encadrement de deux doctorantes marocaines. Les tables ii à v détaillent ces éléments d'encadrement. Les publications mentionnées se réfèrent aux articles parus dans des revues référencées WOK.

Thèses de doctorat

Table ii. Encadrement de thèses soutenues.

Nom	Titre	Année soutenance	Établissement	Directeurs	Mon rôle	Situation actuelle du doctorant	Pub.
Rebaï Houda	Etude morpho-dynamique de l'érosion ravinatoire dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon	2017	FSHST Tunis	H. Ben Ouedzou	Encadrant principal	Enseignant contractuel à l'université de Tunis (Fac. Sciences Humaines et Sociale de Tunis)	2
Inoubli Nesrine	Ruissellement et érosion hydrique en milieu méditerranéen vertique : approche expérimentale et modélisation	2016	Montpellier SupAgro & INAT	Y. Le Bissonnais & H. Habaieb	Encadrant principal	Ingénieure à la SONEDE (exploitation et distribution des eaux) à Tunis	1
Ben Slimane Abir	Erosion ravinatoire et ensablement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon	2013	Montpellier SupAgro & INAT	Y. Le Bissonnais & M. Sanaa	Encadrant principal	Chercheuse titulaire à l'INRREF (Tunisie)	5
El Khalili Amira	Modélisation du ruissellement et de l'érosion de la parcelle cultivée au versant	2012	INAT	H. Habaieb	Appui/soutien	Ingénieure fonctionnaire à la Direction Générale des Ressources en Eaux à Tunis	1
Gumiere Silvio	Contribution à la modélisation déterministe spatialisée de l'érosion hydrique des sols à l'échelle des petits bassins versants cultivés	2009	Montpellier SupAgro	Y. Le Bissonnais	Encadrant principal	Professeur à l'université de Laval (Québec)	6
Corbane Christina	Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale	2006	UM2	P. Andrieux & J. Albergel	Appui/soutien	Responsable de projets au JRC-ISPRRA (Italie)	2

Table iii. Encadrement de thèses en cours.

Nom	Titre	Date	Établissement	Directeurs	Mon rôle	Pub.
Choukri Fatiha	Évaluation de l'impact combiné du changement climatique et de l'occupation du sol sur la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique du bassin versant Tleta (Rif Occidental, Maroc)	2014-en cours	IAV Hassan II	M. Naïmi	Encadrant (33%) (M. Chikhaoui & M. Sabir)	1
Arrebeï Nassima	Retour d'expérience sur quarante ans de lutte anti-érosive dans le bassin versant du Nekor	2015-en cours	IAV Hassan II	M. Naïmi & M. Sabir	Encadrant (25%) (M. Chikhaoui)	0

Post-Doctorats

Table iv. Encadrement de stages post-doctoraux.

Nom	Titre	Année (durée)	Établissement	Mon rôle	Situation actuelle du post-doctorant	Pub.
Ciampalini Rossano	Landscape evolution modelling and soil erosion processes in agricultural Mediterranean catchments	2016-2018 (18 mois)	UMR LISAH	Co-encadrant (40%) (S. Follain & F. Licciardello)	Recherche d'emploi	2
Pastor Amandine	Elaboration of local-scale climate and land-use scenarios to assess the impacts of global change on soil erosion	2017-2018 (18 mois)	UMR LISAH	Co-encadrant (40%) (Y. Le Bissonnais & J. Pedro Nunes)	Contractuelle à l'université de Lisbonne	1
Inoubli Nesrine	Modélisation intégrée des flux d'eau et de sédiments au sein du bassin versant de Kamech.	2017-2018 (12 mois)	INAT Tunis	Encadrant principal (80%)	Ingénieure à la SONEDE à Tunis	1
Smetanova Anna	Future Agriculture Innovative Adaptive & Resilient - Erosion Rates Mediterranean nEtwork stuDy	2014-2016 (12 mois)	UMR LISAH	Co-encadrant (50%) (Y. Le Bissonnais)	Contractuelle à l'université technique de Berlin	3
Ciampalini Rossano	Spatialised assessment of soil vulnerability to erosion	2011 (6 mois)	UMR LISAH	Co-encadrant (50%) (Y. Le Bissonnais)	Recherche d'emploi	0
Cheviron Bruno	Hydrology and erosion modeling: Model development and analysis.	2008-2009 (12 mois)	UMR LISAH	Co-encadrant (50%) (Y. Le Bissonnais)	Chercheur titulaire à l'INRAE (UMR G-Eau)	5

Stagiaires de niveau Master ou ingénieur

Table v. Encadrement de stages de niveau Master ou ingénieur.

Nom	Titre	Date	Type	Mon rôle	Pub.
Marien Laurene	Impact des changements globaux sur l'érosion des sols dans un bassin italien (Cannata, Sicile) à l'aide du modèle LANDSOIL.	2019	UM2 - Master Eau & Agriculture	Encadrant (50%) (Ciampalini R.)	0
Berrabhi Ihsane	Transfert du carbone organique du sol par érosion hydrique dans un micro-bassin agricole et un micro-bassin forestier du centre du Maroc (bassin versant de l'Oued Mellah). Mémoire d'ingénieur ENFI (Maroc).	2018	PFE ENFI (Maroc)	Encadrant (50%) (Yassin M.)	0
Diaw Guillaie.	Retour d'expérience sur l'impact des aménagements de l'Oued Mellah sur les flux d'eau et de sédiments. Mémoire d'ingénieur IAV Hassan 2. 85 p.	2017	PFE IAV (Maroc)	Encadrant (50%) (Yassin M.)	0
Cherif Mohamed Amine	Evaluation multi-sites et multi-thématiques (écoulements, ETR, érosion) du modèle SWAT appliqué au bassin de la Peyne (Hérault, France).	2013	UM2 - Master Eau & Agriculture	Encadrant (15%) (F. Colin & L. Prévot & A. Crabit)	0
Tounsi Mouna	Reconstitution des événements hydrologiques à travers l'analyse des sédiments. Application aux lacs Kamech et Gbail (Cap Bon - Tunisie)	2013	M2 Univ. El Manar, Tunis	Encadrant (50%) (M. Ben Mammou)	1
Madani Khaoula	Vers un outil de modélisation des apports à l'échelle des petits bassins versants de la Dorsale tunisienne.	2012	M2 INAT	Encadrant (33%) (M. Slimani & S. Mouelhi)	0
Sauvadet Marie	Déterminisme du ruissellement et de l'érosion hydrique de la parcelle au versant en milieu méditerranéen marneux. Cas de Kamech (ORE OMERE)	2011	Césure ingénieur Montpellier SupAgro	Encadrant (100%)	0
Askri Amina	Etude de la variabilité spatiale de la stabilité des sols agricoles du Cap Bon.	2010	PFE INAT	Encadrant (33%) (M. Annabi & H. Bahri)	0
Madani Khaoula	Évaluation des formules de prédiction de l'envasement des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon.	2009	PFE INAT	Encadrant (50%) (M. Slimani)	0
Boukari Emna	Variabilité spatiale de la stabilité structurale des sols du bassin versant de Lebna : Recherche des fonctions de pédotransfert	2009	PFE INAT	Encadrant (33%) (M. Annabi & H. Bahri)	0
Kembi Souheil	Étude de l'effet des pratiques culturales sur la sensibilité des sols à l'érosion hydrique	2008	PFE INAT	Encadrant (33%) (M. Annabi & H. Bahri)	0
Langevin Christine	Recueil et analyse critique de données hydrologiques issues d'un bassin versant pour la mise en place de systèmes de culture durable	2007	Césure ingénieur Montpellier SupAgro	Encadrant (100%)	0
Wahl Noé	Cartographie de l'érodibilité des sols en Tunisie.	2007	PFE ENSG Nancy.	Encadrant (50%) (Y. Le Bissonnais)	0

Davy Grégory	Développement d'une modélisation déterministe spatialisée de l'érosion hydrique des sols à l'échelle des petits bassins versants anthropisés.	2006	DAA ENSAR	Encadrant (50%) (Y. Le Bissonnais)	1
Collinet Marion	Analyse de l'occupation des sols à partir d'images satellitaires, dans un objectif de gestion et de conservation des eaux et des sols, dans le bassin versant aménagé du Lebna, au Cap Bon (Tunisie)	2006	M1 ULP Strasbourg	Encadrant (100%)	0
Kaabachi Amor	Modélisation des apports en eau et en sédiment dans le lac collinaire de Kamech avec KINEROS2 en vue d'optimiser l'usage de l'eau pour l'irrigation	2006	PFE ESA Mograne	Encadrant (50%) (L. Lajili-Ghezal)	0
Ben Hammadi Marouan	Modélisation de l'érosion hydrique sur deux parcelles de vigne à itinéraires culturaux différents en milieu méditerranéen	2005	DEA SEEC	Encadrant (50%) (J. Albergel)	0
Bekkal Amine	Élaboration d'un prototype d'exploitation de photographies aériennes obliques dans le cadre de la gestion du risque d'inondation	2003	PFE IAV Hassan 2	Encadrant (50%) (C. Puech)	0
Mouquet Pascal	Utilisation de photographies aériennes obliques pour l'estimation de la hauteur de crue. Application au bassin versant de la Moselle	2001	PFE ENSAR	Encadrant (50%) (C. Puech)	0
Blin Christophe	Méthodologie d'exploitation de photographies aériennes d'inondation par SIG. Application à la vallée de l'Aisne.	2000	DEA ETES (Paris I)	Encadrant (50%) (C. Puech)	0
Tarek Mohamed	Elaboration d'une maquette SIG pour la localisation et la prévention des risques d'érosions torrentielles : étude sur deux bassins versants expérimentaux du Haut-Vallespir (Pyrénées-Orientales) : Le Canideil et La Parcigoule.	1999	Mastère SILAT	Encadrant (25%) (C. Puech)	0
Toriel Christine	Approche par télédétection de la circulation de l'eau sur un bassin versant en vue de la construction d'un indicateur de pollution agricole. Application au bassin versant du Sousson (Gers).	1998	DEA SEEC (UM2)+ PFE ENGEES	Encadrant (20%) (C. Puech - F. Colin)	0
Andreeva Kristina	Mise à jour de l'occupation du sol parcellaire à partir d'imagerie satellitale. Application au bassin du Sousson (Gers).	1998	DESS GDTA	Encadrant (25%) (C. Puech)	0

Activités d'enseignement

Principalement adressées à un public niveau Bac+4 ou plus, mes activités d'enseignement atteignent 800 h et sont réparties globalement de la manière suivante : 55 % en TD, 40 % en TP et 5 % en cours.

Les principaux établissements dans lesquels a été réalisé cet enseignement sont l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (ISIM), l'École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF Montpellier), l'Institut Agronomique Vétérinaire Hassan II (Rabat), l'Université de Montpellier II et Montpellier SupAgro. Les thématiques enseignées tournent autour des méthodes d'acquisition et de gestion de données spatiales et des problématiques liées au risque d'inondation et d'érosion. L'apport de l'observatoire comme fournisseurs de données, ou comme laboratoire à ciel ouvert, est de plus en plus présent dans ces enseignements. La table vi résume les principaux thèmes de ces enseignements.

Table vi. *Détail de mes activités d'enseignement.*

Année	Contenu
2016-2018	Interventions dans le module "Hydrologie des bassins versants" en 2ème et 3ème année du cursus ingénieur à l' Institut Agronomique Vétérinaire Hassan II , spécialisation <i>Ressources naturelles et Environnement</i> , cours (3h) sur l'observation des flux hydro-sédimentaires et cours (3h) sur la modélisation des flux hydro-sédimentaires.
2007	Interventions dans le module <i>Hydrologie et risque d'inondation</i> du Master Pro Géorisques à l'Université de Montpellier II (6h) Interventions dans le module <i>Conservation des sols et érosion</i> en 3ème année de Montpellier SupAgro , spécialité <i>Gestion de l'Eau, des Milieux Cultivés et Environnement</i> : cours (3h) sur l'érosion en milieu semi-aride et TD (3h) sur l'analyse critique du modèle distribué d'érosion WEPP.
2006	Participation à la conception et à l'encadrement d'un module intitulé <i>Conservation des sols et érosion</i> pour les 3ème année de Montpellier SupAgro , spécialité <i>Gestion de l'Eau, des Milieux Cultivés et Environnement</i> : TD de 3h sur l'analyse critique de modèles distribués (WEPP, MHYDAS...).
2005 et 2006	Interventions dans un DAA à Montpellier SupAgro (3h) sur les potentialités de la télédétection très haute résolution spatiale et Intérêt de la télédétection spatiale dans la gestion du risque d'inondation.
2005	Interventions en Mastère SILAT (Système d'Informations Localisées pour l'Aménagement des Territoires) de 1,5 jours : exercice de synthèse destiné à mobiliser les notions importantes des SIG.
1998-2004	Interventions à l' ENGREF dans le cadre de la formation continue (MAP et MATE), de la formation initiale (élèves ingénieurs en 1 ^{ère} et 2 ^{ème} année) et du Mastère SILAT (environ 400h) : Cours sur l'utilité des Systèmes d'Information Géographique et de la Télédétection pour l'étude du risque d'inondation ; TD et TP en pratique des Systèmes d'Information Géographique (ArcGIS, ArcInfo, Arcview, Idrisi) et en traitements d'images (Erdas Imagine dont modules photogrammétriques Orthobase et Stéréo Analyst).
1999-2003	Monitorat et ATER à l' Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (ISIM) dépendant de l'Université Montpellier II (384 h) : Travaux pratiques en Chimie des Solutions, en langage de programmation (Visual Basic) et en hydraulique. Interventions dans le DESS Rigisc à l'Université de Montpellier II (12 h) : Cours et TP sur l'intérêt de la télédétection spatiale dans la gestion du risque d'inondation.

Animation de la Recherche et autres responsabilités

Activités d'animation (hors projet de recherche)

- Représentant intérimaire de l'IRD en Tunisie (2007-2011) et au Maroc (2016-2018).
- Responsable de la gestion du bassin versant expérimental de Kamech (Cap Bon, Tunisie) appartenant à l'ORE OMERE (<http://www.obs-omere.org>) de 2007 à 2009.
- Coordinateur général de l'observatoire OMERE depuis 2010.
- Correspondant IRD de la JEAI « Vecteur » au Maroc de 2014 à 2017.
- Animateur de l'équipe « Erosion et Transport solide » au LISAH depuis 09/2018.
- Co-animateur du programme transversal « Observation » de l'UMR LISAH (2010-2015).
- Co-animateur du réseau R_Osmed de bassins versants pour le suivi de l'érosion sur le pourtour méditerranéen (2011-2014).
- Acteur du SOERE RBV (Membre du comité de pilotage), du projet d'Investissement d'Avenir CRITEX, et des infrastructures de Recherche française OZCAR et européenne eLTER.
- Organisation de colloques
 - « Vulnérabilité des sols méditerranéens à l'érosion hydrique « État des connaissances et mesures d'adaptation face au changement global » Rabat, 20-21 novembre 2018 ;
 - « Gestion de l'Eau et des Sols en Méditerranée : apports des Systèmes d'Observations sur bassins versants » Hammamet, 20-22 octobre 2010.
- Organisation d'une session de colloque
 - EGU 2016 « Soil and water conservation practices in the Mediterranean regions. » (Co-Convener: Agata Novara , João Pedro Nunes , Massimo Prosdocimi , Mohamed Annabi).
- Organisation de nombreuses visites sur les terrains de l'ORE OMERE pour des étudiants et collègues dans le cadre de sessions de formation, de colloques ou de journées de réseaux.
- Membre suppléant du comité exécutif de l'infrastructure de recherche OZCAR (depuis 2018).
- Membre associé à l'Unité de Formation et de Recherche « Conservation Intelligente des Eaux et des Sols » de l'IAV Hassan II à Rabat (Maroc) depuis 2015.
- Membre nommé suppléant à la commission de spécialistes de la 60ème section CNU (Mécanique, génie mécanique, génie civil) à l'université de Montpellier de 2006 à 2008.
- Animateur des activités du LISAH en Tunisie de 2007 à 2011 et au Maroc de 2015 à 2018 (gestion du budget, du partenariat et du personnel local IRD, VCI compris).

Activités d'évaluation

- Relecture d'articles scientifiques : environ 5 par an (*Agriculture, Ecosystems & Environment ; Catena ; Environmental Conservation ; Géomorphologie: relief, processus, environnement ; Geomorphology ; Hydrological Science Journal ; International Journal of Remote Sensing ; Land Degradation and Development ; Physics and Chemistry of the Earth ; Revue des Sciences de l'Eau ; Sécheresse ; Soil Use and Management ; Transactions on Geoscience and Remote Sensing...*).
- Évaluation bourse de thèse (AIRD en 2009, AUF en 2012).
- Membre de comités scientifiques de colloques
 - International Scientific Workshop « [Relation man/environment and sediment Transport: a spatial approach](#) », 2011, Tipasa (Algérie);
 - ICSE-6 2012 ([6 th international Conference on Scour and Erosion](#)), 2012, Paris (France);
 - [IGARSS 2014](#), Quebec (Quebec) & [IGARSS 2015](#), Milan (Italie);
 - [AGRICONF 2015](#), Marakkech (Maroc);
 - International Scientific Conference « [Vulnérabilité des sols méditerranéens à l'érosion hydrique - Etat des connaissances et mesures d'adaptation face au changement global](#) », 2018, Rabat (Maroc);
 - International Scientific Conference « [Sustainable Natural Resources Management under Global Change](#) », 2019, Hammamet (Tunisie).
- Membre de jury de concours :
 - passage IE => IR à IRD (Marseille, 2009).
 - recrutement ingénieurs de recherche (Marseille, 2010)
 - recrutement d'un ingénieur IRD en personnel local permanent (Tunis, 2008)
 - recrutement de 2 Volontaires Coopération Internationale (VCI, Tunis, 2007 & 2008)

- Membre de jurys de parcours diplômants
 - d'étudiants ingénieurs provenant principalement de Montpellier SupAgro, de l'Institut National Agronomique de Tunisie (Tunis) et de l'Institut Agronomique Vétérinaire Hassan II (Rabat) et de l'École Nationale Forestière d'Ingénieurs (Salé)
 - de quatre doctorants que j'ai encadrés

Transfert/valorisation/tâches d'intérêt collectif

- Membre nommé du conseil d'unité du LISAH (2005-2010) puis (2015-2020).
- Membre des commissions bibliométrie et informatique au LISAH de 2004 à 2007.
- Animation table ronde COY11 Rabat (26-28 novembre 2015) sur « L'eau, une ressource stratégique dans la géopolitique africaine. »
- Participation à la caravane des Sciences, à l'initiative Climat sous surveillance (membre du comité d'orientation scientifique) et à l'initiative Club Jeunes (sensibilisation de collégiens) organisée par l'IRD (2015-2016 et 2016-2017) avec une intervention à l'occasion de la COP22 au Maroc.

Productions scientifiques

Ma production scientifique globale est synthétisée dans la table vii, alors que la table viii présente quelques indicateurs concernant ma production d'articles référencés dans le WOK. Par la suite, seuls les articles à comité de lecture et les chapitres d'ouvrages sont listés, par ordre chronologique. Les noms apparaissant en *italique* dans ces listes sont les étudiants, doctorants ou post-doctorants que j'ai encadrés ou co-encadrés.

Table vii. Production scientifique (mise à jour le 26 mars 2020).

Type	Nombre
ACL référencés dans le WOK (<i>dont co-publiés avec une personne sous ma supervision</i>)	40 (22)
ACL non référencés dans le WOK	19
Chapitres d'ouvrages	5
Conférences avec actes	22
Conférences sans actes	124
Rapports d'expertises et rapports techniques	12

Table viii. Quelques éléments de synthèse de mes publications référencées WOK (mis à jour le 26 mars 2020).

Métrique	Valeur
H-index	17
Nombre de citations	1040
Nombre moyen de citations par article	26
Article le plus cité	341
FI* moyen	3,6
FI maximum	5,2
FI minimum	0,7

* FI = Facteur d'impact sur 5 ans d'après ©JCR (Clarivate Analytics) 2018

Articles dans revues scientifiques référencées WOK [A] (n = 40)

- A1 Puech C., Raclot D. (2002). *Using Geographical information system and aerial photographs to determine water levels during floods*. Hydrological Processes, 16(8): 1593-1602. doi: [10.1002/hyp.1023](https://doi.org/10.1002/hyp.1023) (FI= 3,5).
- A2 Raclot D., Puech C. (2003). *What does AI bring to hydrology ? aerial photographs and flood levels*. Applied Artificial Intelligence, 17(1): 71-86. doi: [10.1080/713827055](https://doi.org/10.1080/713827055) (FI= 0,9).
- A3 Raclot D., Colin F., Puech C. (2005). *Updating land cover classification using a rule-based decision system*. International Journal of Remote Sensing, 26(7): 1309-1321. doi: [10.1080/01431160512331326774](https://doi.org/10.1080/01431160512331326774) (FI= 2,5).
- A4 Raclot D., Puech C., Mathys N., Roux B., Jacome A., Asseline J., Bailly J.-S. (2005). *Photographies aériennes prises par drone et Modèle Numérique de Terrain : apport pour l'observatoire sur l'érosion de Draix*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 1 : 7-20. doi: [10.4000/geomorphologie.209](https://doi.org/10.4000/geomorphologie.209) (FI = 0,7).
- A5 Raclot D. (2006). *Remote sensing of water levels on flooded plains - A spatial approach guided by hydraulic functioning*. International Journal of Remote Sensing, 27(12): 2553-2574. doi: [10.1080/01431160600554397](https://doi.org/10.1080/01431160600554397) (FI= 2,5).
- A6 Raclot D., Albergel J. (2006). *Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment*. Physics and chemistry of the earth, 31 (17): 1038-1047. doi: [10.1016/j.pce.2006.07.002](https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.07.002) (FI= 2,2).
- A7 Corbane C., Raclot D., Jacob F., Albergel J., Andrieux P. (2008). *Remote sensing of soil surface characteristics from a multiscale classification approach*. Catena, 75: 308-318. doi: [10.1016/j.catena.2008.07.009](https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.009) (FI= 4,1).
- A8 Gumiere S.J., Le Bissonnais Y., Raclot D. (2009). *Soil resistance to interrill erosion: parametrisation and model sensibility*. Catena, 77: 274-284. doi: [10.1016/j.catena.2009.02.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.02.007) (FI= 4,1).
- A9 Evrard O., Cerdan O., Van Wesemael B., Chauvet M., Le Bissonnais Y., Raclot D., Vandaele K., Andrieux P., Bielders C. (2009). *Reliability of an expert-based runoff and erosion model: application of STREAM to different environments*. Catena, 78: 129-141. doi: [10.1016/j.catena.2009.03.009](https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.03.009) (FI= 4,1).

- A10 Raclot D., Le Bissonnais Y., Louchart X., Andrieux P., Moussa R., Voltz M. (2009). *Soil management and scale effects on erosion from fields to catchment in a Mediterranean vineyard area*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 134: 201-210. doi: [10.1016/j.agee.2009.06.019](https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.06.019) (FI= 4,7).
- A11 Cheviron, B., Gumiere, S. J., Le Bissonnais Y., Moussa R., Raclot D. (2010). *Sensitivity analysis of distributed erosion models: Framework*, Water Resour. Res., 46, W08508, doi: [10.1029/2009WR007950](https://doi.org/10.1029/2009WR007950) (FI= 5,0).
- A12 Cerdan, O., Govers G., Le Bissonnais Y., Van Oost K., Poesen J., Saby N., Gobin A., Vacca A., Quinton J., Auerswald K., Klik A., Kwaad F.J.P.M., Raclot D., Ionita I., Rejman J., Rousseva S., Muxart T., Roxo M.J., Dostal T. (2010). *The rate and spatial variation of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data*. Geomorphology, 122: 167-177. doi: [10.1016/j.geomorph.2010.06.011](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.011) (FI= 3,9).
- A13 Gumiere S.J., Le Bissonnais Y., Raclot D., Cheviron B. (2011). *Vegetated Filter Effects on Sedimentological Connectivity of Agricultural Catchments in Erosion modelling: A Review*. Earth Surface Processes and Landforms, 36(1): 3-19. doi: [10.1002/esp.2038](https://doi.org/10.1002/esp.2038) (FI = 4,3).
- A14 Gumiere S.J., Raclot D., Cheviron B., Davy G., Louchart X., Fabre J.C., Moussa R., Le Bissonnais Y. (2011). *MHYDAS-Erosion a distributed single-storm water erosion model for agricultural catchment*. Hydrological Processes, 25(11): 1717-1728. doi: [10.1002/hyp.7931](https://doi.org/10.1002/hyp.7931) (FI= 3,5).
- A15 Cheviron B., Le Bissonnais Y., Desprats J.F., Couturier A., Gumiere S.J., Cerdan O., Darboux F., Raclot D. (2011). *Comparative sensitivity analysis of four distributed erosion models*, Water Resour. Res., 47, W01510, doi: [10.1029/2010WR009158](https://doi.org/10.1029/2010WR009158) (FI= 5,0).
- A16 Touma J., Raclot D., Al-Ali Y., Zante P., Hamrouni H., Dridi B., Agrebaoui S. (2011). *In-situ determination of the soil surface crust hydraulic resistance*. Journal of hydrology, 403(3-4): 253-260. doi: [10.1016/j.jhydrol.2011.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.004) (FI= 4,9).
- A17 Corbane C., Jacob F., Raclot D., Albergel J., Andrieux P. (2012). *Multitemporal analysis of hydrological soil surface characteristics using aerial photos: a case study on a Mediterranean vineyard*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 18: 356-367. doi: [10.1016/j.jag.2012.03.009](https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.009) (FI = 5,2).
- A18 Ben Slimane A., Raclot D., Evrard O., Sanaa M., Lefèvre I., Ahmadi M., Tounsi M., Rumpel C., Ben Mammou A., Le Bissonnais Y. (2013). *Fingerprinting sediment sources in hillside reservoir within a cultivated catchment of Tunisia*. Journal of Soils and Sediments, 13: 801-815. doi: [10.1007/s11368-012-0642-6](https://doi.org/10.1007/s11368-012-0642-6) (FI = 3,0).
- A19 Desprats J.F., Raclot D., Rousseau M., Cerdan O., Garcin M., Le Bissonnais Y., Ben Slimane A., Fouche J., Monfort-Clement D. (2013). *Mapping linear erosion features using high and very high resolution satellite imagery*. Land Degradation & Development, 24: 22-32. doi: [10.1002/ldr.1094](https://doi.org/10.1002/ldr.1094) (FI = 4,9).
- A20 El Khalili A., Raclot D., Habaieb H., Lamachère J.M. (2013). *Factors and processes of permanent gully evolution in a Mediterranean marly context (Cape Bon, Tunisia)*. Hydrological Sciences Journal, 58(7), 1519-1531. doi: [10.1080/02626667.2013.824086](https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824086) (FI = 2,5).
- A21 Gomez C., Le Bissonnais Y., Annabi M., Bahri H., Raclot D. (2013). *Laboratory Vis-NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils*. Geoderma, 209-210: 86-97. doi: [10.1016/j.geoderma.2013.06.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.002) (FI = 4,6).
- A22 Rebai H., Raclot D., Ben Ouedzou H. (2013). *Efficacité des aménagements de lutte contre le ravinement (Cas du bassin versant d'El Hnach, Tunisie)*. Hydrological Sciences Journal, 58(7), 1532-1541. doi: [10.1080/02626667.2013.824087](https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824087) (FI= 2,5).
- A23 Gumiere S.J., Bailly J.-S., Cheviron B., Raclot D., Le Bissonnais Y., Rousseau A. (2015). *Evaluating the Impact of the Spatial Distribution of Land Management Practices on Water Erosion: case study of a Mediterranean catchment*. Journal of Hydrologic Engineering. doi: [10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001076](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001076) (FI = 2,0).
- A24 Paroissien J.-B., Darboux F., Couturier A., Devillers B., Mouillot F., Raclot D., Le Bissonnais Y. (2015) *A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France)*. Journal of Environmental Management, 150:57-68. doi: [10.1016/j.jenvman.2014.10.034](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.034) (FI = 5,0).
- A25 Ben Slimane A., Raclot D., Evrard O., Sanaa M., Lefèvre I., Le Bissonnais Y. (2016). *Relative contribution of surface and subsurface erosion to reservoir siltation in Tunisia*. Land degradation and Development. doi: [10.1002/ldr.2387](https://doi.org/10.1002/ldr.2387) (FI = 4,9).
- A26 Inoubli N., Raclot D., Moussa R., Habaieb H., Le Bissonnais Y. (2016). *Soil cracking effects on hydrological and erosive processes: a study case in Mediterranean cultivated vertisols*. Hydrological Processes. doi: [10.1002/hyp.10928](https://doi.org/10.1002/hyp.10928) (FI= 3,5).
- A27 Rodrigo Comino J., Quiquerez A., Follain S., Raclot D., Le Bissonnais Y., Casali J., Giménez R., Cerdà A., Brevik E.C., Pereira P., Senciales J.M.; Seeger M. ; Ruiz Sinoga J.D.; Ries J.B. (2016). *Soil erosion in sloping vineyards using botanical indicators and collectors in the Ruwer-Mosel valley*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 233: 158-170. doi: [10.1016/j.agee.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.009) (FI= 4,7).
- A28 Annabi M., Raclot D., Bahri H., Bailly J.S., Gomez C., Le Bissonnais Y. (2017). *Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia*. Catena 153: 157-167. doi: [10.1016/j.catena.2017.02.010](https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.010) (FI= 4,1).
- A29 Inoubli N., Raclot D., Mekki I., Moussa R., Le Bissonnais Y. (2017). *A spatio-temporal multiscale analysis of runoff and erosion in a Mediterranean marly catchment*. Vadose Zone Journal 16. doi: [10.2136/vzj2017.06.0124](https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0124) (FI= 2,8).
- A30 Raclot D., Le Bissonnais Y., Annabi M., Sabir M., Smetanova A. (2018). *Main issues for preserving Mediterranean soil resources from water erosion under global change*. Land Degradation & Development. doi: [10.1002/ldr.2774](https://doi.org/10.1002/ldr.2774) (FI= 4,9).

- A31 Lagacherie P., Álvaro-Fuentes J., Annabi M., Bernoux M., Bouarfa S., Douaoui A., Grünberger O., Hammani A., Montanarella L., Mrabet R., Sabir M., [Raclot D.](#) (2018). Managing Mediterranean Soil resources under global changes. *Regional Environmental Change*. doi: [10.1007/s10113-017-1239-9](#) (FI = 3,8).
- A32 Feurer D., Planchon O., El Maaoui M.A., *Ben Slimane A.*, Boussema M.R., Pierrot-Deseilligny M., [Raclot D.](#) (2018) Using kites for 3-D mapping of gullies at decimetric resolution over several square kilometers: a case study on the Kamech catchment, Tunisia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18: 1567-1582. doi: [10.5194/nhess-18-1567-2018](#) (FI = 3,3).
- A33 *Ben Slimane A.*, [Raclot D.](#), *Rebai H.*, Le Bissonnais Y., Planchon O., Bouksila F. (2018). Combining field monitoring and aerial photographs to evaluate the role of gully erosion in a Mediterranean catchment (Tunisia). *Catena*, 170: 73-83. doi: [10.1016/j.catena.2018.05.044](#) (FI = 4,1).
- A34 *Smetanova A.*; Le Bissonnais Y., [Raclot D.](#), Pedro Nunes J., Licciardello F., Le Bouteiller C., Latron J., Rodríguez Caballero E., Mathys N., Klotz S., Mekki I., Gallart F., Solé Benet A., Pérez Gallego N., Andrieux P., Moussa R., Planchon O., Marisa Santos J., Alshihabi O., Chikhaoui M., Follain S. (2018). Temporal variability and time compression of sediment yield in small Mediterranean catchments. *Soil Use and Management*, 34(3): 388-403. doi: [10.1111/sum.12437](#) (FI= 2,2).
- A35 Gaillardet J., Braud I., Hankard F., et al. (2018). OZCAR: the French network of Critical Zone Observatories. *Vadose Zone Journal*. *Vadose Zone Journal*, 17(1). doi: [10.2136/vzj2018.04.0067](#) (FI= 2,8).
- A36 Molénat J., [Raclot D.](#), Zitouna R., et al. (2018). OMERE, a long-term observatory of soil and water resources in interaction with agricultural and land management in Mediterranean hilly areas. *Vadose Zone Journal*, 17(1). doi: [10.2136/vzj2018.04.0086](#) (FI= 2,8).
- A37 *Smetanova, A.*, Follain, S., David, M., *Ciampalini, R.*, [Raclot, D.](#), Crabit, A., Le Bissonnais, Y. (2019). Landscaping compromises for land degradation neutrality: the case of soil erosion in Mediterranean agricultural landscape. *Journal of Environmental Management* 235: 282-292. doi: [10.1016/j.jenvman.2019.01.063](#) (FI = 5,0).
- A38 Peña-Angulo, D., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J.C., et al. (2019). *Spatial variability of the relationships of runoff and sediment yield with weather types throughout the Mediterranean basin*. *Journal of Hydrology* 571: 390-405. doi: [10.1016/j.jhydrol.2019.01.059](#) (FI = 4,9).
- A39 *Pastor A.*, Nunes J.P., *Ciampalini R.*, Koopmans M., Baartman J., Huard F., Calheiros T., Le Bissonnais Y., Keizer J.J., [Raclot D.](#) (2019). Projecting future impacts of global change including fires on soil erosion to anticipate better land management in the forests of NW Portugal. *Water*, 11, 2617. doi: [10.3390/w1122617](#) (FI = 2,7).
- A40 *Choukri F.*, [Raclot D.](#), Naimi M., Chikhaoui M., Nunes J.P., Huard F., Hérivaux C., Sabir M., Pépin Y. Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern Morocco. *Int. Soil and Water Conservation Research*. doi: [10.1016/j.iswcr.2020.03.003](#) (FI = 2,9).

Articles dans revues scientifiques non référencées WOK [B] (n = 19)

- B1 [Raclot D.](#), Puech C. (1998). *Photographies aériennes et inondation : globalisation d'informations floues par un système de contraintes pour définir les niveaux d'eau en zone inondée*. Journées Cassini : Les nouveaux usages de l'information géographique, Marne-la-Vallée, 25-27 novembre 1998. *Rev. Int. de Géomatique*, 8(1-2): 191-206.
- B2 [Raclot D.](#), Puech C. (1999). *Champs d'inondation et photographies aériennes - Détermination des hauteurs de submersion*. *Ingénieries EAT*, 03, 17: 3-17.
- B3 Masse J., Rigaud C., Castaing P., Dutartre A., Moreau A., Marchais J-F., Bourdais J-L., Merle V., Le Floch S., Nasr T., Chossat J-C., Lechapt G., Puech C., Martin F., [Raclot D.](#) (2000). *Élaboration d'un système d'information à références spatiales pour l'aide à la gestion des zones humides littorales atlantiques*. *Ingénieries EAT*, n° spécial « Agriculture et Environnement » : 35-58.
- B4 Puech C., [Raclot D.](#), Maurel P. (2003). *Intérêt des images à très haute résolution spatiale pour évaluer le risque d'inondation*. *Ingénieries EAT*, n° spécial Risques : 83-96.
- B5 [Raclot D.](#) (2003). *Télé-détection des niveaux d'eau en plaine inondée - Démarche d'analyse spatiale guidée par le fonctionnement hydraulique*. *Bulletin SFPT*, 172(4) "hydrosystèmes et télé-détection à haute résolution": 97-98.
- B6 Roux H., [Raclot D.](#), Dartus D. (2003). *Méthodes d'assimilation de données d'observation de la terre appliquées à la reconstitution de paramètres hydrauliques*. *Bulletin SFPT* n°172 "hydrosystèmes et télé-détection à haute résolution", 4 : 40-49.
- B7 Hostache R., Puech C. et [Raclot D.](#) (2007). *Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR*. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, document 381, mis en ligne le 06 juillet 2007, consulté le 27 février 2020. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/7722> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeo.7722>
- B8 *Rebai H.*, [Raclot D.](#) et Ben Oueddou H. (2012). Facteurs du ravinement dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1(1) : 18-22.
- B9 *Sauvadet M.*, [Raclot D.](#), *Ben Slimane A.*, Le Bissonnais Y. (2012). *Déterminisme de l'érosion hydrique de la parcelle au versant en milieu méditerranéen marneux*. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1(1) : 41-46.

- B10** Gumiere S.J., Delattre M., Le Bissonnais Y., Cheviron B., Ben Slimane A., Raclot D. (2014). Multi-scale calibration and validation of mhyd-as-erosion for a small mediterranean vineyards catchment: a study-case. *Revue des sciences de l'Eau*, 27(1): 21-36.
- B11** Zitouna R., Feurer D., Raclot D., Molenat J., Mekki I., Ben Mechlia N., Jacob F. (2014). OMERE, Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau, Bassin versant de Kamech : Impact des actions anthropiques sur les transferts de masse dans les hydrosystèmes méditerranéens ruraux. *Annales de l'INRGRF*, 19, Numéro spécial, 216-230.
- B12** Choukri F., Chikhaoui M., Naimi M., Raclot D., Pepin Y., Lafia K. (2016). Impact du changement climatique sur l'évolution de l'érosivité des pluies dans le Rif Occidental (Nord Du Maroc). *European Scientific Journal*, 12(32):79-93. (<http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/8385/8023>)
- B13** Yassin M., Benmansour M., Chikhaoui M., Ismaili Alaoui F.Z., El Bahi Y., Ezzahouani B., Pépin Y., Zouagui A., Nouira A., Hanane S., Magri M., Doukkali O., Hajib S., Raclot D. (2017). Contribution à l'évaluation de l'impact de l'aménagement des bassins versants de l'Oued Mellah et Allal El Fassi au Maroc. *Annale de la Recherche Forestière au Maroc*, 44: 79-95.
- B14** Boukhari Taleb R., Naimi M., Chikhaoui M., Raclot D., Sabir M. (2019). Evaluation Des Performances Du Modele Agro-Hydrologique SWAT à Reproduire Le Fonctionnement Hydrologique Du Bassin Versant Nakhla (Rif occidental, Maroc). *European Scientific Journal*, 15(5):311-333. [Doi:10.19044/esj.2019.v15n5p311](https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n5p311)
- B15** El Boukhari A., Naimi M., Chikhaoui M., Raclot D. (2018). Caractérisation de la dégradation spécifique pour la région septentrionale du Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, numéro spécial "Vulnérabilité des sols méditerranéens à l'érosion hydrique", 7(2) : 288-293.
- B16** Huard F., Choukri F., Raclot D., Pépin Y., Chikhaoui M., Naimi M., Korkot H., Yassin M. (2018). Spatialisation fine des projections climatiques dans le bassin versant du Tleta (Nord Maroc). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, numéro spécial "Vulnérabilité des sols méditerranéens à l'érosion hydrique", 7(2) : 294-303.
- B17** Choukri F., Chikhaoui M., Naimi M., Pepin Y., Raclot D. (2018). Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire d'un bassin versant du Rif Occidental du Maroc à l'aide du modèle SWAT : cas du bassin versant Tleta. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, numéro spécial "Vulnérabilité des sols méditerranéens à l'érosion hydrique", 7(2) : 304-312.
- B18** Arrebei N., Sabir M., Naimi M., Chikhaoui M., Raclot D. (2018). Reconstitution des données historiques et diagnostic de l'état actuel des aménagements antiérosifs dans le bassin versant Nekor. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, numéro spécial "Vulnérabilité des sols méditerranéens à l'érosion hydrique", 7(2) : 267-272.
- B19** El Yadari H., Chikhaoui M., Naimi M., Sabir M., Raclot D. (2018). Techniques de Conservation des Eaux et des Sols au Maroc: Aperçu et perspectives. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, numéro spécial "Vulnérabilité des sols méditerranéens à l'érosion hydrique", 7(2) : 343-353.

Chapitres d'ouvrage [O] (n =5)

- O1** Raclot D., Maurel, P., Puech C. (2003). *Apports de la télédétection à très haute résolution spatiale à l'étude du risque d'inondation*. In : "Systèmes d'information et risques naturel", F. Guarnieri et E. Garbolino (Eds.), Les presses de l'école des Mines, Paris, pp. 203-221.
- O2** Jacome A., Puech C., Raclot D., Bailly J.S., Roux B. (2008). *Extraction d'un modèle numérique de terrain à partir de photographies par drone*. In "Extraction et gestion des connaissances spatio-temporelles". Collectif RNTI (Eds.). Cepaduès - RNTI-E-13, 2008, pp. 79-99.
- O3** Cerdan O., Desprats J.F., Fouché J., Le Bissonnais Y., Cheviron B., Simonneaux V., Raclot D., Mouillot F. (2011). Impact of Global changes on soil vulnerability in the Mediterranean basin. In: ISELE 2011: International Symposium on Erosion and Landscape Evolution. St. Joseph, Michigan, 18-21 September 2011. [ASABE. CD-Rom Proceedings, Paper Number 11079](#).
- O4** Raclot D., Le Bissonnais Y., Annabi M., Sabir M. (2016). Challenges for mitigating Mediterranean soil erosion under global change. In : Thiébault S. (ed.), Moatti Jean-Paul (ed.). *The Mediterranean region under climate change: a scientific update*. IRD Marseille - AllEnvi, 2016, p. 311-318. (Synthèses). ISBN 978-2-7099-2219-7
- O5** Voltz M., Mekki I., Molénat J., Prévot L., Raclot D., Zitouna-Chebbi R. (2016). Long-term agro-ecosystem observatories in the Mediterranean. In : Thiébault S. (ed.), Moatti Jean-Paul (ed.). *The Mediterranean region under climate change: a scientific update*. IRD Marseille - AllEnvi, 2016, p. 467-475. (Synthèses). ISBN 978-2-7099-2219-7

PARTIE II

RÉSUMÉ DES TRAVAUX DE RECHERCHE ET PERSPECTIVES

Introduction

Parcours personnel

Mon apprentissage des sciences de l'environnement a commencé lors de ma formation d'ingénieur à l'École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement à Strasbourg (ENGEES) entre 1994 et 1997. Au cours de ma dernière année d'ENGEES, j'ai suivi le DEA « Systèmes Spatiaux et Environnement », piloté par l'Université Louis Pasteur à Strasbourg, avec la volonté de développer des compétences en matière d'approches spatialisées du territoire au service de la compréhension du cycle de l'eau et des matières associées.

Les 7 années passées par la suite au sein de l'UMR « Structures et Systèmes Spatiaux » Cemagref/ENGREF de Montpellier (Maison de la Télédétection) sous la direction de Christian Puech (stage de DEA, objection de conscience, doctorat, CDD) ont été l'occasion pour moi d'initier un parcours de recherche sur la problématique du risque d'inondation dans les basses plaines viticoles de l'Hérault. J'ai alors développé une démarche originale alliant hydrologie/hydraulique, analyse spatiale et analyse numérique permettant de produire des cartes des niveaux d'eau à partir d'images de télédétection prises pendant les inondations. Ces instantanés spatialisés des niveaux d'eau ont ensuite été utilisés pour alimenter (assimilation) ou tester (validation) des modélisations hydrauliques numériques distribuées. J'y ai consolidé ma maîtrise des techniques et méthodes de traitement de données spatiales (télédétection, SIG, GPS...), et diversifié les applications en hydrologie.

Sous l'impulsion de Jean Albergel, j'ai alors construit un projet de recherche centré sur l'érosion hydrique des sols en contexte méditerranéen qui m'a permis d'être recruté à l'IRD en octobre 2004. Depuis cette date, j'effectue mes recherches au sein du Laboratoire d'étude des Interactions entre Sol, Agrosystèmes et Hydrosystèmes (UMR LISAH). Composé de personnels INRA, IRD et Montpellier SupAgro, le LISAH travaille sur « l'hydrologie, le transfert de contaminants et l'érosion dans les paysages cultivés fortement aménagés, et sur les propriétés spatiales et l'évolution de ces paysages, en vue d'aborder de manière intégrée et avec une vision large les nombreux enjeux concernant l'eau et les sols dans les paysages cultivés ». L'UMR regroupe des chercheurs de différentes disciplines des sciences agronomiques et environnementales (pédologues, hydrologues, agronomes et géochimistes) qui mutualisent leurs compétences et des dispositifs expérimentaux localisés pour l'essentiel sur le pourtour méditerranéen. Les objectifs de recherche du LISAH sont : i) développer les connaissances sur les transferts de masse et l'écodynamique des substances polluantes dans les sols et les bassins versants ruraux en relation avec leur organisation spatiale et temporelle d'origine naturelle et anthropique ; ii) élaborer des outils permettant de diagnostiquer et prévenir les risques qu'induisent les activités humaines dans les milieux cultivés sur les régimes hydrologiques et l'évolution des ressources en eau et en sol ; iii) contribuer à la définition de nouveaux modes de gestion durable de l'espace. Au 1^{er} janvier 2020, le LISAH est structuré en trois équipes : « Eau et polluants », « Érosion et transport solide » et « Structures spatiales et dynamiques des sols et paysages cultivés », auxquelles s'ajoutent trois pôles techniques.

Depuis mon recrutement au LISAH, mon activité de recherche s'inscrit majoritairement dans le développement de connaissances, d'outils et de méthodes visant à mieux **comprendre le fonctionnement hydro-érosif² des bassins versants** dans une optique de recherche de **mode de gestion conservatoire des ressources en sol dans les territoires ruraux méditerranéens**. Cette activité est conduite au sein de l'équipe « Érosion et transport solide » (environ 5 chercheurs ou enseignants chercheurs permanents), dirigée par Yves Le Bissonnais (DR INRA) de 2007 à 2015, par Stéphane Follain (Mcf Montpellier SupAgro) de 2015 à août

² Le fonctionnement hydro-érosif se réfère dans ce document à l'ensemble des processus et facteurs pilotant la réponse hydrologique et érosive, et tout particulièrement les flux d'eau et de sédiments à la surface du sol.

2018, puis par moi-même depuis août 2018. À travers ma forte contribution à l'ORE OMERE (« Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau », <http://www.obs-omere.org/>) et, à un degré un peu moindre, à la modélisation numérique sous la plate forme OpenFLUID (<http://www.openfluid-project.org/>), mon activité alimente également les deux programmes transversaux du LISAH : « Observations agro-hydrologiques des bassins versants », et « Ingénierie agri-environnementale des paysages cultivés ».

Ce document synthétise mes travaux de recherche depuis mon arrivée au LISAH. Pour des considérations de concision, mes travaux antérieurs portant majoritairement sur la problématique du risque d'inondation n'y sont pas développés.

Contexte de ma recherche

La ressource en sol constitue un capital naturel indispensable à la fourniture d'une grande diversité de services écosystémiques primordiaux pour nos sociétés (Dominati et al., 2010 ; ITPS, 2015) : services de support, de régulation, d'approvisionnement, et services culturels. Cette **ressource pluri-fonctionnelle** est à la base même de la chaîne alimentaire. Sa sécurité est primordiale puisque la formation des sols est un processus lent alors que sa destruction peut être très rapide. La principale forme de dégradation du sol qui menace cette ressource est l'érosion (hydrique ou éolienne), les autres grandes formes de dégradation étant les glissements de terrain, la salinisation, l'imperméabilisation, le déclin des teneurs en matière organique, la compaction, ou encore la contamination des sols (ITPS, 2015). La mise en évidence de l'accroissement de la vitesse de dégradation des sols a conduit à sensibiliser l'opinion publique mondiale et les organisations gouvernementales à la nécessité de préserver cette ressource (e.g. UE, 2005). Même si la traduction de cette sensibilisation dans un contexte réglementaire se fait attendre (e.g. échec de la directive cadre sur les sols), l'avènement d'événements comme « [2015 année internationale des sols](#) », le lancement de programmes comme le « [4 pour 1000](#) », ou la rédaction d'un rapport spécial du Giec traitant spécifiquement des problèmes de dégradation des terres et de désertification (IPCC, 2019), illustrent bien la prise de conscience de l'importance du sol pour répondre aux enjeux majeurs de notre société.

L'érosion des sols est un processus géomorphologique naturel qui menace la durabilité de la ressource en sol dès lors que le décapage du sol se fait à une vitesse supérieure à celle de la formation des sols (*i.e.* altération des roches). Si l'on garde en tête que l'ordre de grandeur de la vitesse de formation des sols est de $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour l'Europe (Verheijen et al., 2009), e.g. environ 1 dixième de millimètre par an, on conçoit la difficulté à percevoir cette menace.

De nombreuses études (Walker, 1994 ; Montgomery, 2007 ; Amundson et al., 2015) ont montré que les activités humaines, et notamment la mise en culture, conduisaient très souvent à accélérer l'érosion des sols et produisaient ainsi de nombreux impacts négatifs. On différencie traditionnellement les **impacts « on-site »**³ et les impacts « **off-site** ». Les **impacts « on-site »** concernent la perte du « capital sol » au sein même des versants et des parcelles cultivées, ils peuvent aller jusqu'à la perte nette de surface cultivable ([figure 1a](#)). Cette perte locale de sol impacte directement la production agricole puisqu'elle est associée à une altération de nombreuses propriétés de sol : perte de nutriments, baisse de la réserve utile, altération du pouvoir auto-épurateur, etc (Lal, 1998, 2004). Les **impacts « off-site »** résultent du transfert, vers l'aval, des sédiments et des matières associées. Ils se manifestent par la pollution de ressources en eau potable (e.g. contamination des captages par des pesticides), des inondations et coulées de boues, la perturbation de l'écosystème des cours d'eau (e.g. asphyxie par eutrophisation). Ils comprennent également l'envasement des retenues de barrages ([figure 1b](#)), aménagements de première importance pour de nombreux pays du

³Faute de traduction simple des termes on-site et off-site, j'utiliserai dans ce mémoire cette terminologie anglophone.

pourtour méditerranéen dont la disponibilité en eau dépend très majoritairement la capacité de mobilisation des eaux de surface (Lahlou, 2000 ; Sadaoui et al., 2018).

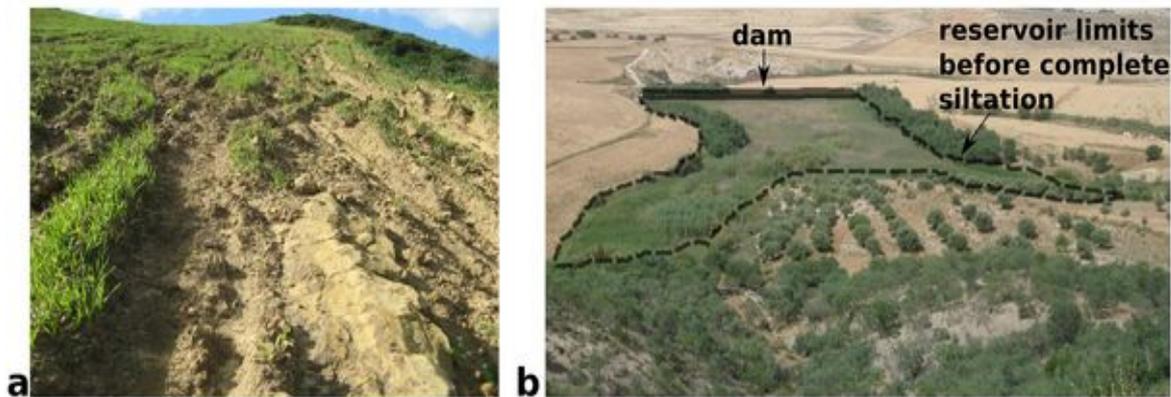


Figure 1. Conséquences de l'érosion hydrique des sols : (a) exemple d'effet « on-site » avec la mise à nue de la roche mère dans une parcelle cultivée en céréales dans le Cap Bon en Tunisie; (b) exemple d'effet « off-site » avec l'envasement complet d'une retenue collinaire tunisienne et sa colonisation par de la végétation arbustive (figure tirée de [A30]).

La région méditerranéenne⁴ est fortement touchée par l'érosion hydrique des sols. En de nombreux endroits, les taux actuels d'érosion des sols dépassent très largement les vitesses de formation des sols (Kosmas et al., 1997). Les mesures de flux d'érosion à l'exutoire de bassins versants de tailles diverses y sont classées parmi les plus élevées au monde (Woodward, 1995 ; Vanmaercke et al., 2011). Cette sensibilité est expliquée par la combinaison de différents facteurs naturels qui, dans le contexte méditerranéen, favorisent l'érosion hydrique (García-Ruiz et al., 2013) : i) un relief marqué avec 45 % de sa superficie présentant des pentes supérieures à 8 % (De Franchis et Ibanez, 2003) ; ii) la récurrence d'événements pluvieux très intenses, notamment en automne quand les sols cultivés sont souvent nus ; iii) la forte présence de sols peu profonds avec des teneurs en matière organique dans l'horizon de surface faibles à très faibles (< à 1 ou 2 % ; EIP-AGRI Focus Group, 2015) ; iv) une faible couverture végétale naturelle du fait de fortes sécheresses estivales et de fortes occurrences de feux (Shakesby, 2011). À ces facteurs naturels, vient s'ajouter l'impact considérable d'une très longue présence humaine qui a conduit à la dégradation de la végétation naturelle par la pratique du brûlis, du surpâturage et de la déforestation (Woodward, 1995 ; García Ruiz et al., 2013). Le développement de l'activité agricole y a toujours été très intense, avec un recours fréquent au labour profond, la mise en culture de terres très pentues et le recours massif à des cultures qui ne couvrent que partiellement le sol (typiquement vigne et olivier). Les différentes civilisations qui se sont succédé sur la zone méditerranéenne ont bien cherché à mettre en place des stratégies pour prévenir et atténuer l'impact de l'érosion des sols (e.g. Jebari et al., 2012) mais force est de constater que ces efforts sont de loin insuffisants et que la pression induite par les activités humaines conduit le plus souvent à une dégradation accrue des sols (De Franchis et Ibanez, 2003) et/ou une augmentation des perturbations sur le milieu aval.

Le contexte méditerranéen est de nos jours caractérisé par un accroissement des pressions sur la ressource en eau et en sol du fait d'une forte croissance démographique et des projections climatiques et socio-économiques annoncées (IPCC, 2014 ; Voltz et al., 2018). Dès lors, la recherche de solutions pour gérer durablement la ressource en sol, tout en limitant les impacts de l'érosion sur le milieu aval, reste donc un enjeu prioritaire pour le devenir de la région méditerranéenne (Roose et al., 2009).

⁴ Dans ce document, l'extension de la zone méditerranéenne se base sur des limites bioclimatiques, dont on exclut les zones hyper-arides et arides sur lesquelles la pratique de la culture pluviale est quasiment impossible.

Positionnement scientifique

Mon activité de recherche **vise à mieux comprendre le fonctionnement hydro-érosif des bassins versants méditerranéens ruraux** avec comme finalité opérationnelle de contribuer à la **définition de mode de gestion durable/conservatoire de la ressource en sol** (et en eau, dans une moindre mesure) dans un contexte de changement global.

Pour appuyer cette finalité opérationnelle, les principaux **leviers d'actions** qui entrent en jeu dans les territoires ruraux sont liés aux aménagements structurels, aux occupations des sols et aux itinéraires techniques (*i.e.* pratiques agronomiques et d'entretien du sol). Ces leviers peuvent être déployés au sein des parcelles cultivées ou dans le milieu inter-parcellaire. Selon Morgan (2005), ces leviers agissent au premier ordre comme facteur de contrôle de l'impact des gouttes de pluie et/ou du ruissellement, ce qui illustre le caractère indissociable de la gestion de la ressource en sol et de la gestion de la ressource en eau. Les approches plus mécaniques ou « structurelles » (*e.g.* terrasse, banquette, aménagement des chemins de l'eau) jouent d'avantage sur la réduction de la vitesse du ruissellement, alors que les approches plus agro-écologiques (ou « nature-based ») sont plutôt basées sur l'augmentation de la protection, de l'infiltration du sol et du piégeage des sédiments via la couverture végétale (*e.g.* mulch, association de cultures, restauration des zones de parcours) et/ou une amélioration de la qualité du sol (*e.g.* amendement, travail réduit). Dans ce document, on regroupera l'ensemble de ces leviers sous le terme de **mesure CES** (pour Conservation des Eaux et du Sol). Dès lors, la **question finalisée** qui motive mes recherches peut être formulée sous la forme suivante :

- quelle stratégie, *i.e.* quelle combinaison de mesures CES, faut-il déployer dans un territoire donné pour gérer durablement les ressources en eau et en sol en prenant en considération à la fois les impacts « *on-site* » et les impacts « *off-site* » de l'érosion ?

Les besoins de connaissances sont multiples puisqu'il s'agit d'identifier des mesures CES dont **les effets peuvent évoluer dans le temps** sous l'effet de forçages naturels et anthropiques, ne serait-ce que par l'effet directement induit par la mesure CES sur la redistribution du sol... Il s'agit également d'identifier le type et l'emplacement de mesures dont les effets se font ressentir bien au-delà de la zone traitée du fait des **fortes interactions amont-aval qui existent au sein des bassins versants** (Walling, 1983 ; Hooke, 2006). Au final, le principal défi consiste à être en capacité d'anticiper comment la mise en place de mesures CES peut modifier les complexes inter-actions spatio-temporelles qui existent au sein des bassins versants pour minimiser les impacts locaux et aval de l'érosion. La délicate question des **non-linéarités** entre la réponse hydrologique des hydrosystèmes, les forçages climatiques et les caractéristiques du paysage (Cammeraat, 2004 ; Grayson et Blöschl, 2000 ; Zehe et Sivapalan, 2009) devient donc centrale pour relever ce défi. L'exemple de l'aménagement en banquette anti-érosive (*i.e.* bourrelet de terre élevé perpendiculairement à la pente pour retenir les flux hydro-sédimentaires), très répandu dans le Maghreb, est assez illustratif de comment une mesure CES peut créer une **discontinuité** qui va amplifier la **non-linéarité, à la fois dans le temps et l'espace, de la réponse hydrologique** des hydrosystèmes (Warner, 2006). En effet la présence d'une banquette conduit à bloquer totalement les flux hydro-sédimentaires jusqu'au moment où un dépassement de sa capacité de rétention réactivera ce flux venant de l'amont. Vu de l'aval, la présence d'une banquette induit donc un **fonctionnement à seuil**. La prise en considération de la localisation de la banquette est de première importance puisque le seuil de dépassement est directement dépendant de la zone contributive amont, alors que l'effet de seuil se fera sentir uniquement à l'aval de la banquette. La réponse hydro-érosive d'un versant sera d'autant plus complexe que l'on considère une cascade de banquettes, puisque l'aval d'une banquette devient l'amont de la suivante, ou que l'on considère l'évolution des seuils de déversement des banquettes du fait de l'accumulation progressive des sédiments en amont des banquettes, voire d'une dégradation des banquettes.

Cette non-linéarité entre la réponse hydro-érosive, les forçages climatiques et les caractéristiques des bassins versants rend extrêmement difficile l'extrapolation de mesures locales d'érosion pour estimer les flux de sédiments à l'exutoire de bassins versants (Cammeraat, 2002 ; Parsons et al., 2006). En effet, « l'efficacité » des transferts d'eau et de sédiments de l'échelle locale à l'échelle du bassin versant dépend de nombreux facteurs biophysiques et anthropiques (Walling, 1983 ; de Vente et al., 2007) : relief, type de sol, occupation de sol, forme et végétalisation des chemins de transfert de l'eau, localisation des sources de sédiments, nature des processus dominants à chaque échelle, aménagements, échelle spatiale et temporelle considérées, etc. Tous ces éléments caractérisent la **connectivité hydro-sédimentaire** des bassins versants (Bracken et al., 2013). Si l'on veut savoir quand, où et comment intervenir avec succès dans les bassins versants en ayant une vision globale des impacts de l'érosion, alors comprendre comment l'**hétérogénéité interne** des bassins versants pilote la connectivité hydro-sédimentaire est aussi important que documenter les **taux d'érosion à l'échelle parcellaire** (Boardman et al., 2019). En d'autres termes, une lutte anti-érosive efficace et adaptée passe par la compréhension des flux d'eau et de sédiments sur le **continuum source-transport-dépôt** (Valentin et al., 2005). De ce fait, elle doit expliciter le lien entre l'**hétérogénéité interne** des bassins versants et sa **réponse hydro-sédimentaire**, à travers une démarche d'**hydrologie spatialisée** (Kirchner, 2006).

La **stratégie d'observation et de modélisation** du fonctionnement des bassins versants constitue une composante essentielle d'une **démarche d'hydrologie spatialisée** (Blöschl et Sivapalan, 1995) qui ambitionne de comprendre l'impact des hétérogénéités/discontinuités du milieu sur la réponse hydro-érosive et envisage de les mobiliser dans une logique d'action (e.g. via l'application de mesures CES). Le volet « observation » porte aussi bien sur la caractérisation des hétérogénéités/discontinuités du milieu que sur la caractérisation de la variabilité spatio-temporelle de la réponse hydro-érosive elle-même. Le volet « modélisation » comprend quant à lui le développement de modèles finement distribués du ruissellement et de l'érosion, et le développement de méthodes pour la mise en œuvre de ce type de modèles.

L'observation *in-situ*, en conditions naturelles sur des bassins réels, constitue un des rares moyens de documenter le fonctionnement d'un bassin dans toute sa complexité, *i.e.* sans masquer les complexes interactions spatio-temporelles qui se manifestent dans la mosaïque paysagère méditerranéenne (Thornes, 2002). Malheureusement, la disponibilité des mesures *in-situ* de l'érosion est très contrainte par leur coût (Stroosnijder, 2005). La difficulté métrologique d'évaluer des pertes en sol par une mesure directe de l'évolution de la surface du sol quand l'ordre de grandeur est de quelques millimètres par an n'arrange rien. Par ailleurs, le diagnostic de l'impact des hétérogénéités/discontinuités du milieu sur la réponse hydro-érosive d'un bassin versant se heurte à la très grande difficulté de mener des expérimentations *in-situ* sur des bassins réels de plusieurs centaines d'hectares dans la mesure où il n'est guère possible, sur de telles superficies, de contrôler l'activité anthropique et le forçage climatique (e.g. la pluie) pour reproduire les phénomènes auxquels on s'intéresse (Dagnelie, 2012).

Face à cette difficulté, deux stratégies sont envisageables (Colin, 2013) :

« La première consiste à ne considérer qu'un seul bassin afin de disposer d'un maximum de conditions invariantes et à analyser l'influence d'une composante variable sur les états et les flux hydrologiques. Cette stratégie, la plus courante en hydrologie, peut être qualifiée de réductionniste dans le sens où le bassin est fragmenté en éléments plus simples (la composante du paysage étudiée) afin d'en analyser l'influence suivant un raisonnement déductif. La seconde stratégie consiste à considérer plusieurs bassins afin de disposer d'un jeu d'observables plus grand et plus varié et d'analyser globalement les variabilités conjointes hydrologique et paysagère. Cette stratégie peut être qualifiée d'holistique dans le sens où l'on tente de comprendre

l'influence des différentes parties (les composantes du paysage) par l'analyse du tout (les réponses des bassins versants) suivant un raisonnement inductif ».

Ces deux stratégies sont en réalité très complémentaires et il est judicieux de les mobiliser de façon itérative (Klemeš, 1983 ; Sivapalan et al., 2003). En isolant l'influence d'un facteur, l'approche réductionniste (ou « upward ») fournit en effet des éléments de preuves partielles à éprouver dans des contextes plus holistiques, alors que l'approche holistique (ou « downward ») fournit des hypothèses à approfondir et préciser dans les conditions expérimentales plus confinées offertes par l'approche réductionniste (Colin, 2013).

Concernant la modélisation, il existe au moins deux raisons d'y recourir (Blöschl & Sivapalan, 1995) : i) elle offre un cadre qui permet de tester notre représentation des processus, d'identifier les différents points de blocage, de tester des hypothèses et d'orienter les recherches à développer (on parle alors de modèle de connaissances) ; ii) elle constitue, une fois validée, un outil prédictif qui peut être utilisé pour explorer numériquement des situations où l'expérimentation est difficile, voire impossible (on parle alors de modèle prédictif). Moyennant une série d'hypothèses, un tel outil prédictif peut être utilisé pour diagnostiquer les zones à risques d'érosion ou pour prédire les taux d'érosion sous l'effet d'évolution du climat ou de l'utilisation du sol (y compris l'implantation de mesures CES) dans un contexte de changement global (Boardman, 2006).

Ma démarche personnelle s'inscrit pleinement dans le courant de l'hydrologie spatialisée. Elle fait le pari que la mobilisation d'une stratégie combinant observation et modélisation, selon une **approche équilibrée entre dimension temporelle et dimension spatiale**, peut permettre de progresser vers une **connaissance du fonctionnement hydro-érosif** des bassins versants méditerranéens ruraux, utile pour orienter les actions de gestion.

Plan du document

Dans ce document, j'ai choisi de présenter le bilan de mes activités sous la forme de 3 volets. Le premier regroupe les éléments de ma stratégie d'observation et de modélisation du fonctionnement des bassins versants, le deuxième expose les avancées cognitives dérivées de cette stratégie, et le troisième illustre comment ces développements et ces connaissances contribuent à la gestion des bassins versants. Ils répondent respectivement aux 3 questions suivantes :

- Volet 1.** Quels développements en matière de i) dispositifs de suivis ; ii) méthodes de caractérisation de l'hétérogénéité interne des bassins versants ; et iii) modélisation distribuée de l'érosion hydrique sont susceptibles de nous aider à mieux comprendre et représenter le fonctionnement hydro-érosif des bassins versants méditerranéens ?
- Volet 2.** Quelles avancées cognitives concernant l'intensité et la variabilité spatio-temporelle des facteurs et processus qui régissent le fonctionnement hydro-érosif d'un bassin versant méditerranéen peut-on en tirer ?
- Volet 3.** En quoi ces développements méthodologiques (établis dans le volet 1) et avancées cognitives (établies dans le volet 2) peuvent-ils appuyer une gestion conservatoire des bassins versants ?

Dans une dernière partie, je présente succinctement mes principales perspectives de recherche.

Volet 1. Développement de dispositifs, méthodes et outils pour appuyer la compréhension du fonctionnement hydro-érosif des bassins versants

Introduction

Ce premier volet expose les principaux développements de ma stratégie d'observation et de modélisation. Il détaille successivement mes contributions en matière de :

- mise au point et/ou animation de dispositifs d'observation in-situ, en conditions naturelles, des flux hydro-érosifs ;
- développement de méthodes de caractérisations spatialisées, rapides et facilement reproductibles, de l'hétérogénéité des bassins versants, aussi bien en matière de variables et forçages naturels et anthropiques auxquels ils sont exposés qu'en matière de manifestations des processus hydro-érosifs dont ils sont le siège ;
- développement d'outils et de méthodes de mise en œuvre de modélisations distribuées de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant.

Dispositifs d'observation in-situ des flux hydro-érosifs

Observer des pertes en terre de l'ordre du millimètre par an pose de sérieuses difficultés métrologiques. C'est pourquoi la majorité des dispositifs d'observation reposent sur un suivi des flux d'eau et de sédiments intégrant une surface contributive de plusieurs m². Ma démarche d'hydrologie spatialisée m'a conduit assez naturellement à articuler deux grands types de dispositifs expérimentaux d'observation.

Le premier repose sur un suivi pérenne des flux hydro-érosifs en plusieurs positions clés d'un bassin versant. Basé sur des mesures acquises à haute fréquence temporelle (e.g. la minute) et maintenu sur une longue période de temps, un tel dispositif permet de documenter des processus ayant des temps de réponse allant de l'infra-événement (e.g. ruissellement à la parcelle sous pluie intense) à la décennie (e.g. processus de sédimentation et/ou reprise de sédiments par des événements extrêmes). Ce genre de dispositif, très exigeant en ressources matérielles et humaines, se maintient au sein de quelques rares sites, qualifiés d'« observatoires de la zone critique », choisis pour documenter un environnement biophysique et humain spécifique. En France, sur le thème de l'érosion, on peut citer l'exemple du [dispositif Draix-Bléone](#) qui s'attache à étudier les crues et l'érosion depuis 1983 dans le contexte d'affleurements de marnes noires sous forme de badlands dans les Alpes du Sud. À l'international, on peut citer le dispositif des bassins emboîtés du Walnut Gulch dans un environnement aride en Arizona (Renard et al., 2008) ou encore le dispositif MSEC dans un environnement de régime de mousson en Asie du Sud-Est (Valentin et al., 2014). Les dispositifs doivent impérativement être adaptés pour capturer les événements intenses et rares, et une fenêtre de temps d'observation suffisamment large (> à la décennie) est nécessaire pour qualifier correctement le régime hydro-érosif et établir des valeurs d'érosion moyenne interannuelle fiables (e.g. Kirkby, 1987) même si la question de la durée exacte du maintien d'une telle observation reste non résolue à ce jour (González-Hidalgo, 2012). L'unité de lieu imposée par le choix du site fortement instrumenté présente l'avantage de maintenir un maximum de conditions invariables : le contexte local (i.e. les caractéristiques du milieu comme le sol, la pente,...) est en effet figé sur toute la durée de l'observation. Ainsi, les chroniques de flux au niveau d'une station hydrologique sont uniquement soumises à l'évolution du climat et de l'activité anthropique propre au contexte local.

Le second repose sur l'acquisition d'observations permettant de couvrir une gamme de conditions environnementales et humaines beaucoup plus vastes. L'objectif visé est double : i) analyser le potentiel de transposition et de généralisation des connaissances acquises dans les conditions d'un observatoire en questionnant leur généricité et leur périmètre de validité et ii) dériver, de la confrontation de situations contrastées, de nouvelles connaissances et hypothèses de fonctionnement susceptibles d'être éprouvées dans le cadre d'observatoires.

Ce paragraphe décrit les 2 types de dispositifs expérimentaux dans lesquels je me suis fortement impliqué au niveau de la conception et/ou de l'animation : l'observatoire OMERE et divers réseaux de bassins versants du pourtour méditerranéen. Ces dispositifs constituent le support d'une grande partie de mes travaux de recherche.

L'Observatoire OMERE

Principales collaborations : INAT & INRGREF (Tunis), HSM Montpellier

[L'Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau](#) (OMERE) est le résultat du regroupement en 2003 du site expérimental de Roujan (Hérault-France) et du site expérimental de Kamech (Cap Bon, Tunisie), deux bassins faisant l'objet d'observations agro-hydrologiques depuis respectivement 1992 et 1994. Cet observatoire, créé sous l'impulsion de Jean Albergel et de Marc Voltz, est co-géré par deux instituts tunisiens (INAT et INRGREF) et deux UMR françaises (UMR LISAH et UMR HSM). Il s'inscrit dans l'enjeu de la gestion durable des ressources en eau et en sol dans les territoires agricoles méditerranéens dans un contexte de double pression sur ces ressources : i) tension sur leurs usages et ii) évolution climatique. Il repose sur l'acquisition combinée d'informations sur les activités anthropiques et de chroniques climatiques, hydrologiques, de flux de sédiments et de solutés pour permettre une approche aussi systémique que possible du fonctionnement de ces territoires. Les deux hydrosystèmes méditerranéens concernés se situent dans un contexte assez similaire du point de vue du forçage climatique mais présentent des caractéristiques contrastées en matière de milieu et d'activité anthropique :

1. le bassin versant expérimental de Roujan (91 ha, Languedoc-Roussillon, France) est dominé par la culture de la vigne dans un environnement limono-argileux fortement remodelé par l'activité agricole (talus, terrassettes, fossés) ;
2. le bassin versant expérimental de Kamech (263 ha, Cap Bon, Tunisie) est dominé par des activités de polyculture et d'élevage sur un environnement marneux avec une forte présence d'argiles gonflantes et de ravines permanentes. Son exutoire est localisé au niveau d'une retenue collinaire construite en 1994.

Les dispositifs d'observation sur OMERE se sont renforcés au fil des années, à la fois pour élargir le spectre des variables et thématiques suivies, mais aussi pour densifier le nombre de points de contrôle des flux de surface au sein des bassins versants. À mon arrivée au LISAH, la recherche sur la problématique de l'érosion des sols se mettait juste en place avec le rattachement au laboratoire d'Yves Le Bissonnais (DR INRA). Ceci explique que les mesures d'érosion étaient jusqu'alors très limitées. À Roujan, un suivi des concentrations en Matières En Suspension (MES), motivé par la quantification du transfert de pesticides sur la phase particulaire, était en place depuis plusieurs années à l'exutoire d'une parcelle viticole et du bassin versant. Les MES exportées d'une seconde parcelle, présentant une pratique agricole contrastée, avait également été mesurées entre 1995 et 1999. Sur Kamech, les stations hydrologiques étaient encore en construction et aucune mesure du transport des sédiments n'avait été réalisée.

En lien avec les autres membres de l'équipe « Érosion et Transport Solide », je me suis fortement mobilisé pour compléter le dispositif existant afin qu'il réponde à nos besoins de

recherche, e.g. questionner les facteurs et processus dominants sur un emboîtement rapproché d'échelles spatiales. J'ai alors pris la responsabilité des données de pluie, de ruissellement et d'érosion sur Kamech, et équipé chaque station de préleveurs automatiques (SIGMA 900P) disposant de 24 flacons. Asservis aux débits, les prélèvements permettent un des concentrations en MES des eaux de ruissellement. Une stratégie identique était déployée parallèlement sur un emboîtement d'échelles à Roujan. Plus récemment j'ai également installé des turbidimètres (Campbell OBS500) sur la station la plus en aval des deux bassins versants afin d'obtenir des chroniques haute-fréquence du transport en suspension.

La [figure 2](#) illustre le dispositif de mesures des flux hydro-érosifs tel qu'il est actuellement sur les deux bassins versants élémentaires d'OMERE. La densité des suivis en fait un dispositif assez unique dans le contexte agricole méditerranéen.

OMERE est aujourd'hui inséré dans divers réseaux aux échelles nationale, européenne ou méditerranéenne à travers des projets de structuration comme l'Infrastructure de Recherche OZCAR [A35]. Il constitue le terrain privilégié de nombreux projets de recherche et de formation. Au delà de la responsabilité de plusieurs jeux de données, j'ai été gestionnaire du site de Kamech entre 2007 et 2010 et j'assure depuis 2011 la coordination d'OMERE avec Jérôme Molénat (INRA, UMR LISAH) et Rim Zitouna (INRGREF).

Des informations complémentaires sur le contexte physique, les dispositifs d'observation et activités de recherche qui sont menées sur ces deux bassins sont disponibles sous forme de publications [e.g. A36], de rapports et d'un site web (<http://obs-omere.org/>). Enfin, des observations à l'échelle des bassins versants (100^{aine} de km²) englobant les bassins élémentaires d'OMERE complètent le dispositif de suivi.

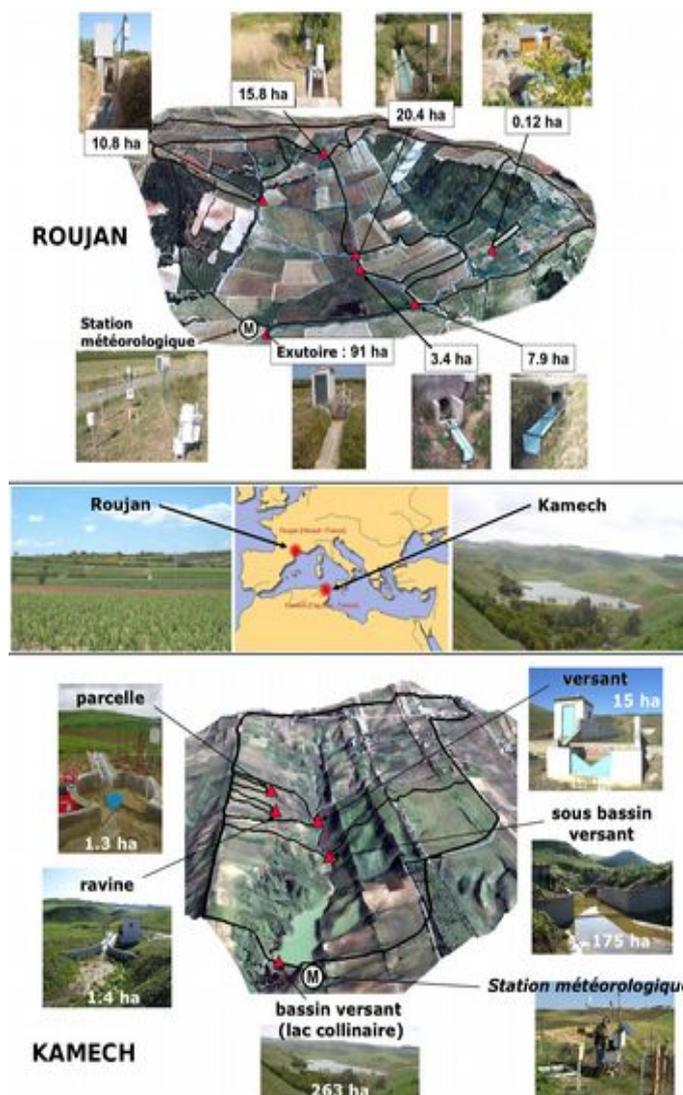


Figure 2. Dispositif de mesure des flux hydro-érosifs sur les bassins versants de Roujan et de Kamech.

Le réseau de bassins versants méditerranéens R_OSMed

Principales collaborations : Univ. Aveiro, CSIC Barcelone, Univ. Catane, IAV Rabat, INRGREF Tunis, Univ. Damas, CNRS Beyrouth, IRSTEA Grenoble, Cesbio Toulouse

Le réseau [R-OSMed](#) (Réseau de bassins versants pour l'étude de l'érosion des Sols en Méditerranée - 2011-2015) est un réseau thématique de bassins versants de recherche sur l'érosion en région méditerranéenne créé sous l'impulsion d'Yves Le Bissonais, directeur de recherche à l'UMR LISAH, et soutenu par l'initiative SICMED du programme inter-institutionnel MISTRALS. L'objectif central du réseau était de mener une analyse comparative du risque

d'érosion en relation avec les changements globaux. Dès sa création, je me suis impliqué, au côté d'Yves Le Bissonnais, dans son animation que j'ai poursuivie à travers le projet ARIMNet2 MASCC. R_OSMed est la réunion de sites méditerranéens (dont les 2 bassins d'OMERE) sur lesquels une observation des flux hydro-érosifs pré-existait.



Figure 3. Bassins versants constituant le noyau du réseau R_Osmed (BRU = Brusquet ; CAN = CANNATA ; CAU = El Cautivo ; KAM = Kamech ; ISA = Cal'Isard ; LAV = Laval ; MAC = Macieira de Alcôba ; MOU = Moulin ; ROU = Roujan ; VIL = Can Vila).

À sa création, le réseau R-OSMed réunissait une vingtaine de scientifiques venant de huit pays : Espagne, France, Italie, Liban, Maroc, Portugal, Syrie et Tunisie. Pour des raisons de cohérence des données (*i.e.* antériorité et disponibilité des données à l'échelle de l'événement de crue et restriction à des bassins ne dépassant par quelques km²), il s'est rapidement concentré sur l'exploitation des données d'un noyau restreint de sites (figure 3).

Le réseau pilote de lacs collinaires en Tunisie

Principales collaborations : DG ACTA Tunis

Ce réseau pilote (figure 4) a été mis en place et géré conjointement par la Direction Générale de l'Aménagement et de Conservation des Terres Agricoles (DG ACTA) du ministère tunisien de l'Agriculture et l'IRD. Son but était d'accompagnement de la politique de mobilisation des eaux de surface menée en Tunisie dans les années 90. Il repose sur une trentaine de lacs et petits barrages collinaires, dont Kamech, répartis au sein de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon.

Pour Tallineau et al. (1994), ce réseau a été constitué afin d'évaluer la performance de ces ouvrages pour : i) piéger les sédiments et protéger ainsi les grands barrages en aval ; ii) laminer les crues ; iii) recharger les nappes alluviales des oueds ; iv) mobiliser de l'eau du surface pour des usages locaux comme l'irrigation ou l'abreuvement du bétail. Chaque retenue est équipée d'un système de mesure en continu de la pluie, de l'évaporation et de la hauteur d'eau au niveau de la retenue. Des bathymétries régulières permettent d'établir des bilans de flux d'eau entrant dans la retenue ainsi que des bilans de sédimentation entre deux bathymétries (cf. [A6]). Durant mon affectation en Tunisie, j'ai contribué à l'animation de ce réseau. Malheureusement, le contexte politique et le manque de soutien financier pour sa maintenance, ont conduit à l'arrêt progressif à partir des années 2000 des suivis sur la plupart des bassins.

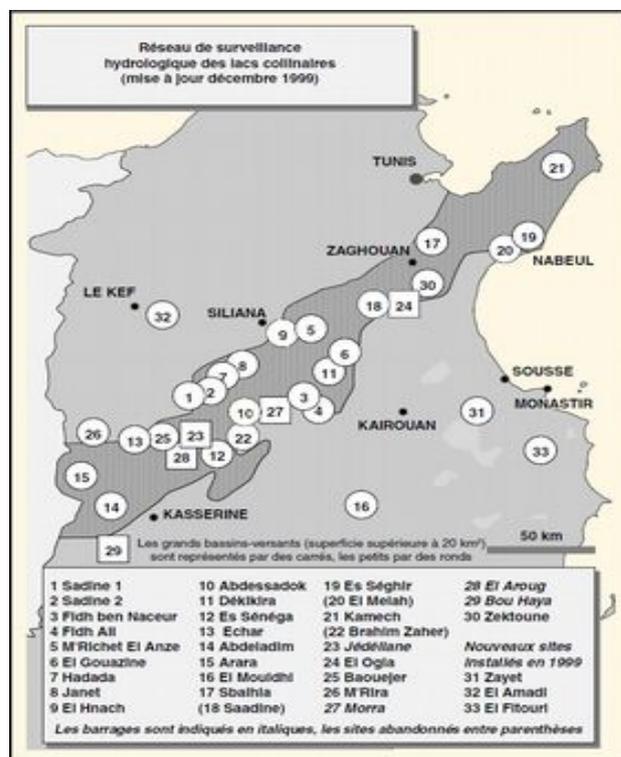


Figure 4. Bassins versants constituant le réseau pilote de lacs et barrages collinaires en Tunisie.

Spatialisation de l'hétérogénéité des bassins versants

Nous avons vu, en introduction générale, que l'hétérogénéité spatiale et/ou la dynamique des propriétés des mosaïques paysagères des territoires ruraux méditerranéens pouvait générer des réponses non linéaires du ruissellement et de l'érosion des bassins versants. La compréhension de la réponse hydro-érosive des bassins versants dépend donc en partie de notre capacité à caractériser la dynamique temporelle et la distribution spatiale des propriétés de nos sites d'études, et tout particulièrement des propriétés de la surface du sol dont le rôle est déterminant pour la genèse des flux hydro-érosifs (e.g. Auzet and Boiffin, 1995 ; Lacombe et al., 2018 ; Léonard et Andrieux, 1998). Malheureusement ces propriétés sont gouvernées par des facteurs naturels (e.g. météorologiques) et anthropiques (e.g. pratiques agricoles) qui sont le plus souvent difficiles à prédire. Par ailleurs, les inventaires de terrain, même à l'échelle de petits bassins versants, sont très rares du fait d'une acquisition difficile et coûteuse dès lors que l'on veut satisfaire les besoins d'exhaustivité spatiale et d'actualisation de ces propriétés. En conséquence, le recours à des données d'observation de la terre, e.g. des images de télédétection, est d'une grande aide pour compléter les investigations conduites sur le terrain.

Ce paragraphe présente le développement de méthodes de caractérisations spatialisées et facilement reproductibles, des propriétés de la surface du sol (*i.e.* occupation du sol, états de surfaces, érodibilité des sols, topographie et ravinement). Deux voies de développement méthodologique ont été privilégiées : i) la valorisation des données d'observation de la terre produites par des agences spécialisées (e.g. images de télédétection), dont la disponibilité est en constante augmentation ; ii) l'acquisition de telles données à partir de nouveaux protocoles de terrain (e.g. acquisition d'images à partir de cerfs-volants).

Mise à jour anticipée de l'occupation du sol

L'occupation du sol est un facteur premier d'influence du comportement hydro-érosif des bassins. Elle induit en effet de fortes hétérogénéités spatiales et temporelles, notamment en contexte agricole (Allan, 2004).

La télédétection est couramment utilisée, depuis les années 70, pour la détermination de l'occupation du sol (Congalton, 1991). Des difficultés perdurent cependant dans les paysages de polycultures annuelles et d'élevage car les assolements sont nombreux et les calendriers culturaux ne sont pas synchrones. Ces difficultés impliquent de recourir à de nombreuses images prises à des dates différentes. Ce dernier aspect est particulièrement aigu en zones de petits parcellaires car la précision spatiale des résultats se dégrade en fonction du nombre d'images utilisées pour établir la carte d'occupation du sol. Si la disponibilité croissante d'images à haute résolution spatiale (*i.e.* métrique) vient progressivement réduire ce problème de géométrie, elle pose d'autres difficultés en matière de volumes de données à traiter, d'autant plus que les méthodes de traitement pixel à pixel peuvent vite se révéler peu efficaces pour des occupations du sol discontinues de type verger ou vigne. Par ailleurs, attendre la disponibilité de multiples images peut s'avérer incompatible avec des besoins d'anticipation de risques (e.g. inondations et coulées de boue) en lien avec l'occupation du sol de l'année.

Face à ces difficultés, nous avons proposé une méthode (figure 5) qui permet de déterminer l'occupation du sol dès le début du cycle cultural à travers la fusion d'informations radiométriques d'une seule image satellite à résolution décamétrique (SPOT) et d'informations contextuelles propres au site étudié. Ces informations contextuelles comprennent les limites parcellaires, l'occupation du sol de l'année précédente, la géomorphologie, les types de sol et les rotations culturales. La fusion est basée sur un système de règles expertes représentant les trajectoires d'évolution probables des occupations du sol dans un contexte donné.

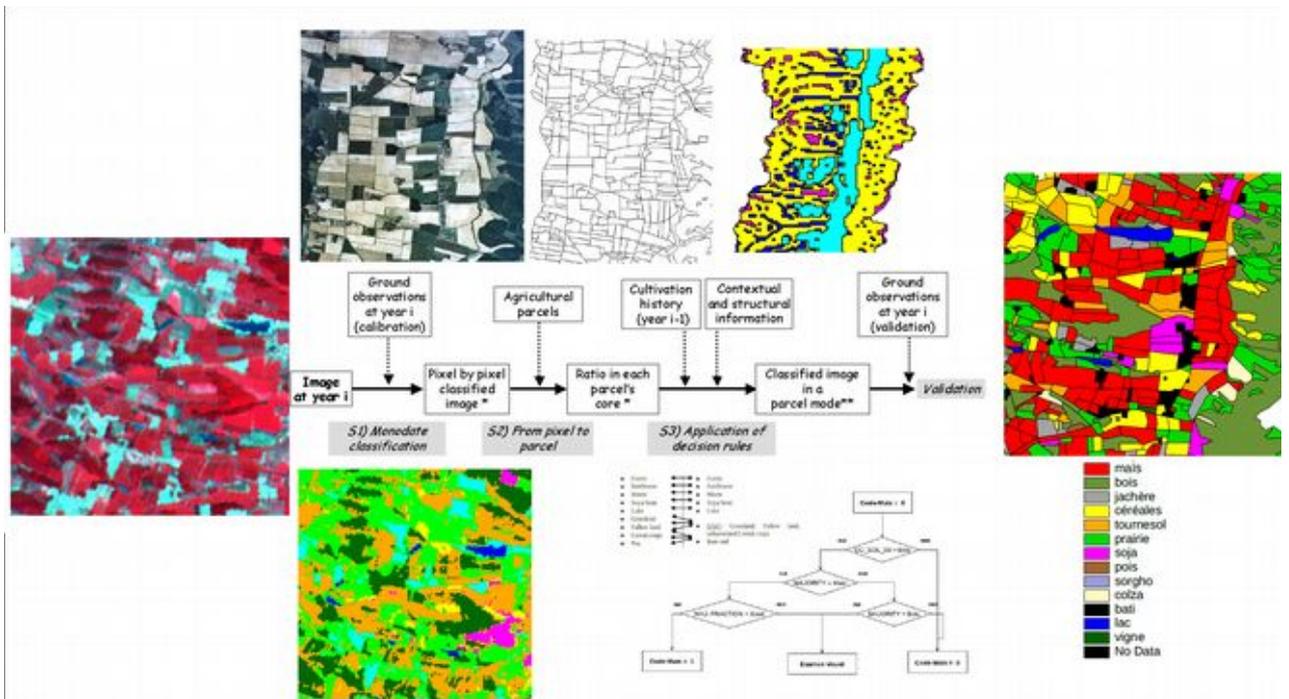


Figure 5. Principe de la méthode de mise à jour anticipée de l'occupation du sol (modifiée de [A3]).

Appliquée au bassin versant du Sousson (Gers, Sud-Ouest de la France), la méthode a donné de bons résultats en comparaison avec des classifications classiques pixel à pixel puisque 87 % des 3710 parcelles sont classées avec 75 % de réussite dans une nomenclature exhaustive. Le système de règles améliore grandement les résultats de classification de l'image de télédétection, leur confère une meilleure robustesse agronomique et permet d'accéder à une nomenclature très détaillée dès le début de la saison culturale.

En associant traitement pixel à pixel et traitement par objet s'appuyant sur un treillis parcellaire vectoriel, l'approche proposée reste pertinente avec l'essor de la disponibilité des images de télédétection à résolution métrique. Par ailleurs, elle offre un cadre compatible avec la prise en compte des images de revisite qui sont de plus en plus nombreuses : chaque nouvelle image disponible peut alors contribuer à affiner la prédiction de l'occupation du sol de l'année à venir, tant pour satisfaire une complétude spatiale de la caractérisation de l'occupation du sol que pour rectifier d'éventuelles erreurs de caractérisation.

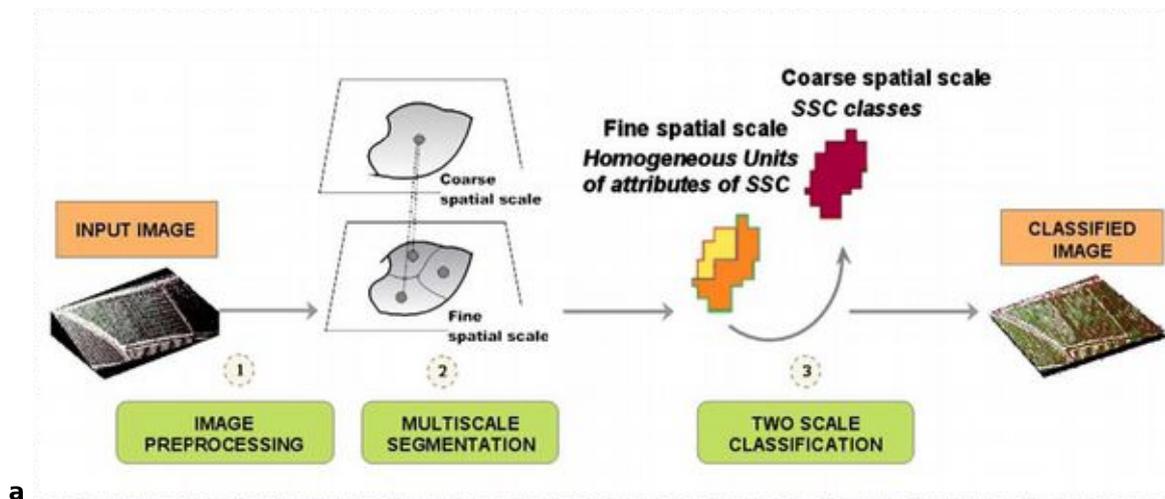
Suivi des états de surface

Principaux encadrements : **Thèse** christine Corbane

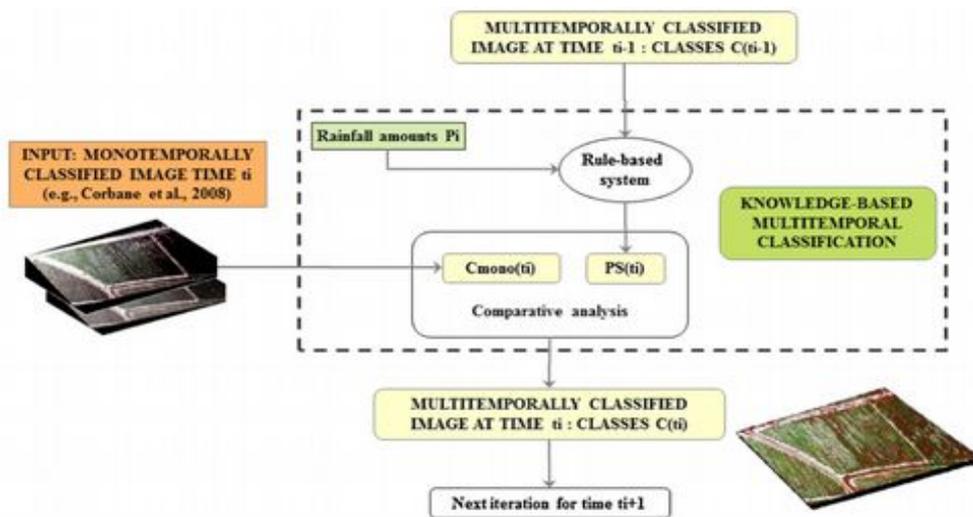
Du fait de leur très fort impact sur les processus hydrologiques et érosifs à la surface du sol, les états de surface constituent une information essentielle pour comprendre et modéliser les flux hydro-érosifs (Auzet et al., 2004 ; Jetten et al., 1996 ; Léonard et Andrieux, 1998 ; Le Bissonais et al., 1998 ; Cerdan et al., 2001 ; Moussa et al., 2002). Une typologie des états de surface à visée hydrologique a été proposée par Andrieux et al. (2001) pour le milieu cultivé méditerranéen. Cette typologie repose sur la combinaison de 3 propriétés (rugosité, faciès, couverture du sol). En contexte de vignoble méditerranéen, des relevés fastidieux de terrain ont montré que ces trois propriétés, et l'état de surface qui en découle, présentent une très forte variabilité inter- mais également intra-parcellaire (Corbane et al., 2008). En outre, ces propriétés sont susceptibles de varier rapidement dans le temps en lien avec des forçages anthropiques (*i.e.* travail du sol) ou naturels (création de croûte par des pluies intenses et répétées).

Pour pallier la lourdeur des relevés terrain, l'imagerie aérienne à très haute résolution spatiale constitue une piste privilégiée car elle peut permettre de capturer les états de surface sur de vastes zones avec une résolution compatible avec une caractérisation intra-parcellaire. Notre choix s'est tourné vers l'acquisition de photographies aériennes couleur prises avec des appareils photographiques grand public à une altitude de 150m à l'aide du paramoteur Pixy© (<http://www.drone-pixy.com>) développé à l'IRD par Jean Asseline (Asseline et al., 1999), précurseur dans la gamme des vecteurs de type drone.

Dès lors nous avons développé une approche analysant conjointement la dimension spectrale et la dimension spatiale à travers une classification multi-échelle sur deux niveaux de segmentation [A7] : le premier niveau pour identifier les propriétés individuelles, et le second niveau pour identifier les classes d'état de surface à partir des propriétés individuelles identifiées au niveau plus fin de segmentation (figure 6a). Ce choix repose sur l'hypothèse que l'homogénéité spectrale est plus forte au niveau des propriétés individuelles que des classes d'états de surface, et que l'approche objet permet de mieux valoriser l'information spectrale contenue dans chaque pixel via la prise en compte d'informations contextuelles en lien avec la texture, la forme, ou encore les relation entre objets (e.g. contiguïté). Testée sur un site composé de 4 parcelles de vigne ayant des conduites différenciées, cette approche a produit une cartographie des états de surface avec une performance de reconnaissance variant entre 63 et 84 % selon les dates.



a



b

Figure 6. Principe de la méthode de cartographie des états de surface en contexte viticole à partir d'images aériennes très haute résolution spatiale prise par drone : a) approche monodate (figure tirée de [A7]); b) approche multodate (figure tirée de [A17]).

Pour améliorer les résultats de détection, nous avons ensuite intégré la méthode précédente dans une démarche multitemporelle [A17]. Cette dernière consiste à prendre en compte, en plus de l'information contenue dans chaque image, l'état de surface déterminé à la date antérieure. À l'image de ce qui avait été fait pour la mise à jour de l'occupation du sol (cf. p 28), le principe de cette démarche multitemporelle consiste à s'appuyer sur une connaissance experte des trajectoires probables d'évolution des états de surface traduites sous forme de règles de transitions possibles en fonction des forçages climatiques et anthropiques. Au final, cette approche multidate, illustrée en figure 6b, nous a permis de détecter les principales actions de désherbage ayant eu lieu sur le site d'étude, et d'améliorer significativement les performances de classification pour atteindre entre 70 et 98 % de taux de bonne reconnaissance selon les dates. L'amélioration est particulièrement sensible pour la reconnaissance des types de croûtes.

Cartographie de l'érodibilité des sols via la stabilité structurale

Principales collaborations : INRAT Tunis, INRGREF Tunis

La stabilité structurale constitue un indicateur très efficace pour quantifier l'érodibilité d'un sol, *i.e.* la sensibilité du sol au ruissellement et à l'érosion hydrique. Elle est très utilisée dans le contexte méditerranéen (*e.g.* Cammeraat and Imeson, 1998). Bien que normalisée (ISO/FDIS 10930, 2012) et bien plus rapide qu'une évaluation à travers des mesures directes d'érosion, la cartographie de la stabilité structurale à l'échelle de bassins versants de plusieurs km² reste une opération longue et fastidieuse. Pour parer à cette difficulté, nous avons tout d'abord exploré la possibilité de développer des approches alternatives à la mesure normalisée de la stabilité structurale. Ces méthodes alternatives [A21] basées sur des modèles de régression multivariés s'appuient soit sur des analyses traditionnelles de sol (approche par pédo-transfert), soit sur l'analyse de spectres acquis au laboratoire dans le visible et le proche infra-rouge (méthode par spectro-transfert). Les tests ont été conduits sur 113 échantillons de sol recueillis pour couvrir la diversité des sols du bassin versant du Lebna (210 km²) situé dans le Cap Bon en Tunisie (figure 7a). L'approche par spectro-transfert (RS) s'est avérée aussi performante que l'approche par pédo-transfert (PTFs) (figure 7b et c), ce qui en fait une approche alternative très intéressante étant donné sa rapidité et le caractère instantané et non destructif de la mesure de spectre. La performance obtenue (R^2 autour de 0.56 sur le jeu de validation) sur notre site d'étude reste cependant trop faible pour espérer pouvoir recourir à l'imagerie spatiale hyperspectrale à des fins de cartographie de l'érodibilité des sols sur des bassins versants de grande taille.

Face à la difficulté à trouver une approche alternative permettant d'approcher avec précision la stabilité structurale, nous avons analysé la structure spatiale de la stabilité structurale à partir des 113 échantillons étudiés et le lien de la stabilité structurale avec différentes variables environnementales. Cette analyse [A28] nous a conduit à proposer une cartographie de la stabilité structurale sur le site étudié à travers une approche de co-krigeage s'appuyant sur l'information géologique existante pour le site d'étude (figure 7d). Les performances ainsi obtenues sont aussi bonnes que les performances obtenues à l'aide de fonctions de pédo-transfert ou de spectro-transfert [A28]. Cette cartographie de la stabilité structurale et de son incertitude associée, à l'échelle de grands bassins versants, constitue une connaissance originale susceptible de favoriser la prise en compte du risque d'érosion dans les stratégies de gestion des territoires ruraux.

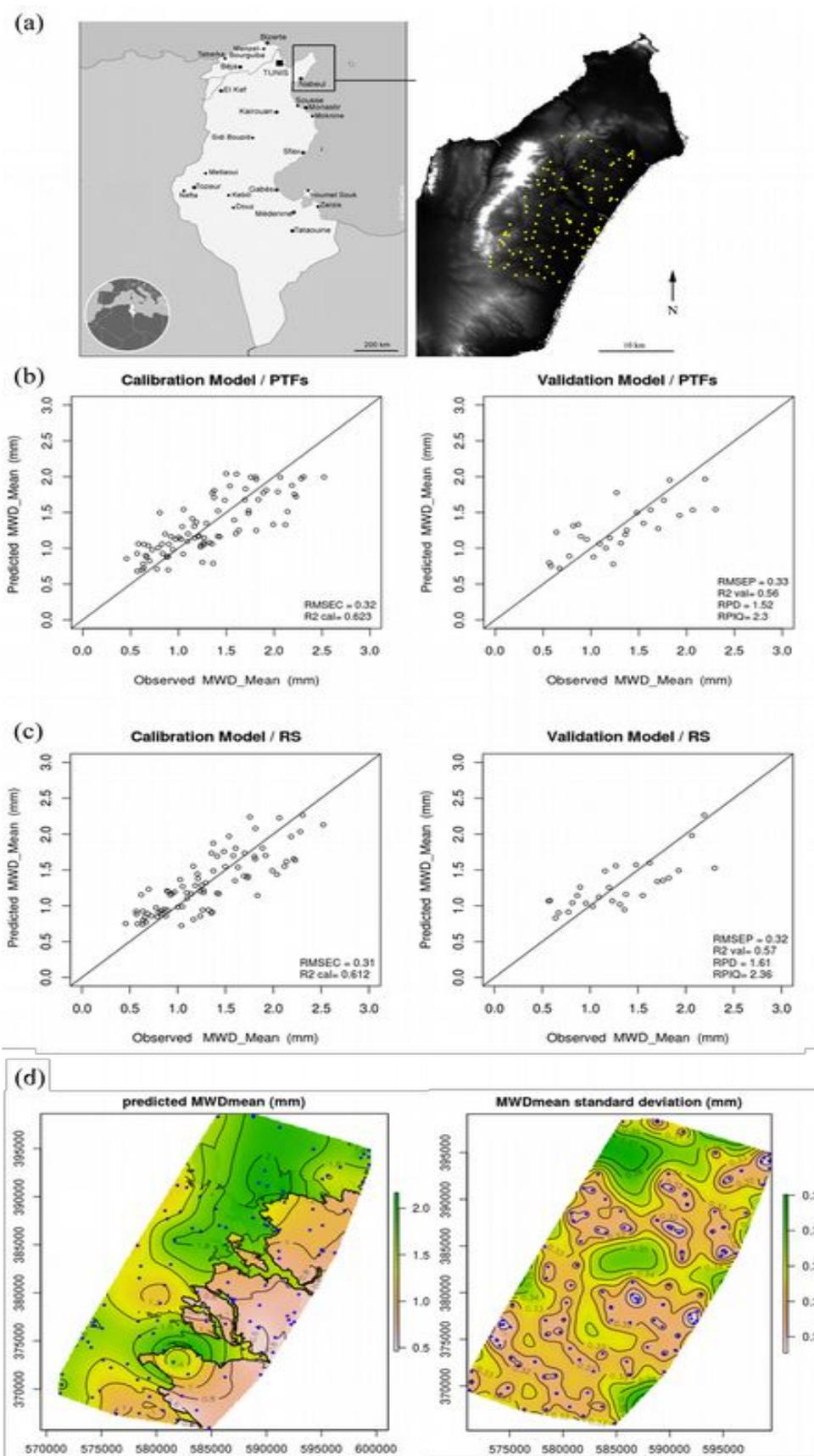


Figure 7. a) Localisation des 113 échantillons de sol collectés dans la région du Cap Bon en Tunisie ; b) performance de prédiction de la stabilité structurale par l'approche de type pédo-transfert (PTFs) ; c) performance de prédiction de la stabilité structurale par l'approche de type spectro-transfert (RS) ; d) spatialisation de la stabilité structurale par co-krigeage en s'appuyant sur une connaissance de la géologique du milieu. Illustration sur la moyenne des trois indices de stabilité notée MWDmean (figure modifiée de [A21] et de [A28]).

Cartographie de la topographie et du ravinement

Principales collaborations : Univ. El Manar (Tunis), Fac. Humaines et Sociales de Tunis, IGN, BRGM
Principaux encadrements : **Thèses** Abir Ben Slimane, Houda Rebai

La caractérisation des chemins de l'eau à la surface du sol est un élément essentiel pour comprendre et caractériser la connectivité hydro-sédimentaire au sein des paysages. Cette préoccupation m'a conduit à travailler, de façon continue depuis mon recrutement, sur le développement de méthodes de caractérisation fine de la topographie à partir d'images spatiales. Je me suis également intéressé aux ravins, en tant qu'éléments de production de sédiments mais également éléments facilitant le transfert des sédiments (Poesen et al., 2003 ; Valentin et al., 2005), et à ce titre composante majeure de la connectivité hydro-sédimentaire (Warner, 2006). Pour cette raison, j'ai travaillé à la détection des ravins via deux approches : i) l'exploitation des MNT dérivés d'images ; ii) l'identification directe des ravins sur les images.

Une première série de travaux a porté sur le potentiel de la photographie aérienne acquise à partir d'appareils grand public pour caractériser très finement la morphologie des ravines sur des secteurs de quelques hectares. La largeur d'un ravin variant typiquement de quelques décimètres à quelques mètres, nous nous sommes orientés vers l'utilisation du drone Pixy© qui permet, par sa capacité de vol lent à basse altitude, de prendre des photographies sans filé à très haute résolution spatiale (< décimètre). Les premiers tests effectués dans un contexte de relief très tourmenté (badlands de l'ORE Draix, <http://oredraixbleone.inrae.fr/>) ont mis en évidence l'intérêt des produits dérivés des images (e.g. orthophotographies avec une précision de position horizontale de 30 cm) pour la compréhension des processus de ravinement. Néanmoins la précision de restitution altimétrique par stéréo-photogrammétrie reste insuffisante pour envisager des approches volumétriques par analyse diachronique (erreur quadratique moyenne de l'ordre de 80 cm) [A4]. Dans la foulée, un nouveau travail utilisant des photographies aériennes numériques [O8] a alors été conduit pour identifier plus finement les sources d'erreur sur la chaîne de traitement stéréo-photogrammétrique et tenter de les réduire. Le recours à des images numériques, associé à des algorithmes d'auto-calibration de paramètres d'orientation interne et externe, a permis d'atteindre une restitution altimétrique avec une erreur quadratique moyenne de 28 cm, plus cohérente avec des perspectives d'analyse diachronique. Pendant ce temps, une révolution de la chaîne de traitement photogrammétrique se préparait, notamment avec le développement d'algorithmes très performants pour identifier des caractéristiques homologues dans différentes images, même dans des conditions de prises de vue très différentes (e.g. SIFT : scale-invariant feature transform). Ainsi, on a vu arriver la photogrammétrie en « Structure from Motion » avec stéréoscopie multi-vues qui, par sa capacité à produire des représentations 3D à très haute qualité et à bas coût, a ouvert de nouvelles perspectives en géosciences (Westoby et al., 2012). La démocratisation des plate-formes télécommandées de type drone a démultiplié ces perspectives (Nex & Remondino, 2014). Dès lors nous avons cherché à quantifier l'apport de ces nouveaux développements en matière de restitution fine du relief et de détection du ravinement. Une nouvelle campagne d'acquisition de photographies aériennes numériques à basse altitude a donc été entreprise sur une zone de plusieurs km² couvrant le bassin versant de Kamech. Nous avons opté pour l'utilisation de cerfs-volants comme plate-forme d'acquisition pour deux raisons principales : la première est liée à l'interdiction réglementaire de vol de drone en Tunisie ; la seconde est de participer à la réhabilitation d'un vecteur utilisé depuis un siècle pour la prise d'images aériennes, mais délaissé depuis alors qu'il est très complémentaire des drones par ses capacités à fonctionner en période de vents importants. Au-delà de préconisations en matière de matériel et de plans d'acquisition de prises de vue par cerf-volant, notre étude a montré qu'il est possible de produire une restitution 3D d'une surface de plus de 3 km² (figure 8) avec une précision décimétrique via une chaîne de traitement très bas coût [A32]. Le potentiel de cette restitution décimétrique 3D pour caractériser la

morphologie interne des ravines est illustré en figure 9. L'adaptation d'un algorithme de détection automatique d'incisions, basé sur une convolution d'un noyau gaussien, a permis d'identifier les nombreuses ravines de Kamech avec une précision globale de 74 %.

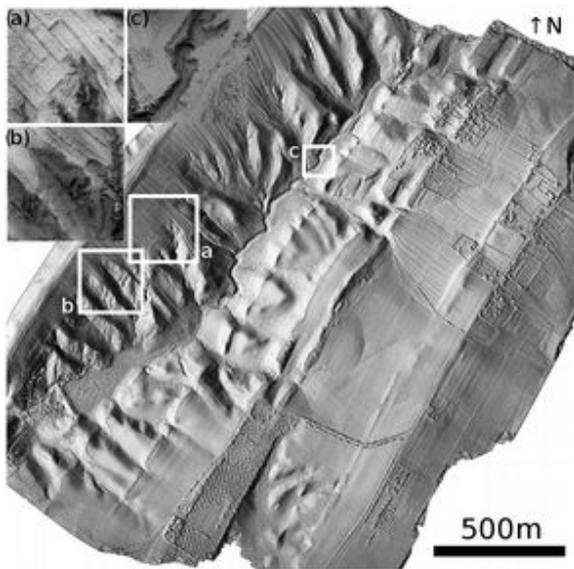


Figure 8. Vue ombragée du MNT décimétrique calculé sur Kamech à partir de photographies prises par cerf-volant avec trois zooms représentant des parcelles cultivées (a), une portion de ravines (b) et un front de progression, par érosion régressive, d'une incision dans l'oued principal (c), (figure tirée de [A32]).

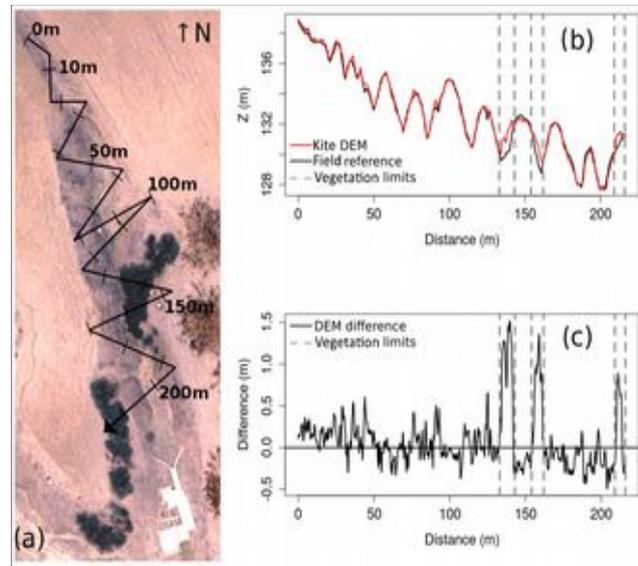


Figure 9. Illustration de la capacité à restituer la morphologie interne d'une ravine en comparant le MNT 'cerf-volant' avec une référence terrain sur un tracé complexe représenté en (a). La comparaison du profil est illustrée en (b), alors que la différence entre les 2 sources de données est illustrée en (c), (figure tirée de [A32]).

Des travaux complémentaires ont été menés afin d'identifier le potentiel qu'offraient les images satellitaires pour identifier la présence de ravins sur des bassins versants de plusieurs dizaines ou centaines de km². Cette exploration a été guidée par l'arrivée, à partir des années 2000, d'images satellitaires ayant des résolutions spatiales métriques plus compatibles avec la taille des ravins que l'on cherche à détecter. Dès lors, nous avons mis au point une méthode de détection des ravins en 2 étapes : i) extraction par filtrage automatique des éléments linéaires depuis les images ; ii) élimination des éléments linéaires ne correspondant pas à des figures d'érosion ravinatoire à l'aide d'un système expert basé sur des critères géométriques (e.g. orientation par rapport à la pente, sinuosité, position dans le paysage). Testée sur le bassin versant du Lebna en Tunisie, cette méthode a permis d'extraire d'images SPOT XS (10 m de résolution), SPOT P (2,5m) et Quickbird (0,61 m), respectivement 22 %, 37 % et 73 % des ravins identifiés sur le terrain [A19]. Avec des taux de détection proches de 80 % (73 % en nombre, 78 % en longueur), l'arrivée des images multispectrales infra-métriques constitue une petite révolution dans le domaine de l'imagerie satellitaire pour une finalité de détection rapide du ravinement sur de grandes surfaces.

Les ravins constituent un très bon marqueur des manifestations de l'érosion concentrée ayant eu lieu au sein des bassins versants. Une cartographie de l'évolution du ravinement à plusieurs dates offre donc une source précieuse pour tenter de comprendre les facteurs explicatifs de la dynamique spatio-temporelle des processus d'érosion concentrée. Pour cette raison, j'ai aussi contribué au développement d'une démarche d'analyse rétrospective de l'évolution des ravins en conditions naturelles à partir d'archives photographiques. Cette démarche se compose d'une étape de photo-interprétation des ravins puis d'une étape d'identification des facteurs explicatifs de premier ordre de cette évolution à travers une confrontation des évolutions de ravins avec des facteurs explicatifs potentiels.

Cette démarche a été mise en œuvre sur une sélection de six petits bassins versants (de 0,6 à 3,7 km²) représentant une diversité de contextes biophysiques et anthropiques au sein de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon. Sur les bassins observés, entre 3 et 5 campagnes photographiques étaient généralement disponibles, les clichés les plus anciens remontant aux années 1950 ou 1960. Un exemple d'évolution des ravins, sur plus de 50 années, est illustré en figure 31 (cf. page 67) pour le bassin versant d'El Hnach.

L'analyse rétrospective de la progression des ravins sur les 50 dernières années a fait apparaître des progressions très différenciées selon les caractéristiques biophysiques (occupation du sol, géologie, nature du sol) et anthropiques (mesures CES) propres à chaque bassin versant [B8] : < 0,15 m/ha/an sur les secteurs dominés par la forêt et/ou avec des techniques de conservation du sol ; autour de 0,3 m/ha/an sur des secteurs s'appuyant sur des matériaux géologiques de nature tendre ou présentant des alternances de roches dures et de roches tendres ; > 1 m/ha/an sur des secteurs dominés par la présence de gypse en contexte de sols marneux à caractère fortement vertique. L'analyse de la dynamique de progression entre chaque date d'acquisition d'images est en cours d'exploration pour permettre de dégager le rôle du climat et d'affiner le rôle de l'activité anthropique dans cette dynamique.

Modélisation distribuée de l'érosion hydrique

D'un point de vue opérationnel, les modèles d'érosion les plus utilisés sont, sans aucun doute, des modèles empiriques du type USLE (Wischmeier & Smith, 1978). Cependant, malgré de multiples développements et améliorations, de tels modèles restent sujets aux limites inhérentes de la modélisation empirique globale. Par conséquent ils ne permettent pas de répondre de manière satisfaisante aux enjeux d'une gestion spatialisée des bassins versants. Depuis les années 90, les développements en modélisation de l'érosion se sont tournés vers des approches plus distribuées et plus mécanistes, en s'appuyant sur un schéma d'agrégation des processus préalablement distribués sur un maillage prédéfini (e.g. EUROSEM, KINEROS, WEPP). Malgré les progrès réalisés, les différentes évaluations de ces modèles (e.g. Jetten et al., 2003) conduisent à considérer leurs prédictions à l'échelle des bassins versants avec un certain degré d'humilité et nous invitent à revisiter ces modélisations pour les faire progresser. Un défi majeur d'une telle modélisation concerne le choix d'une structure de modèle et d'un schéma d'agrégation des processus qui permette de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu et les interactions complexes qui existent, dans le temps et l'espace, entre les différents mécanismes au sein du bassin versant (Blöschl & Sivapalan, 1995).

Par ailleurs, si l'avènement des modèles fortement distribués constitue une avancée majeure pour représenter des phénomènes ayant de fortes interdépendances spatiales (e.g. entre le local et le global), de nombreuses questions méthodologiques se posent quant à leur utilisation. En effet, le très grand nombre de paramètres requis dans ce type de modélisation pose tout particulièrement les questions de leur mise en œuvre (Beven & Freer, 2001 ; Boardman, 2006) en lien avec : i) l'identification des jeux de paramètres permettant de répliquer des comportements observés ; ii) l'analyse du comportement et de l'incertitude des réponses des modèles à des variations possibles des entrées et/ou paramètres ; iii) des modalités d'évaluation de ces modèles.

Ce paragraphe présente d'abord les développements conduits au sein du modèle distribué de l'érosion hydrique « MHYDAS_Erosion ». Il expose ensuite mes contributions pour aborder les questions de mise en œuvre des modèles distribués.

Développement de MHYDAS_Erosion

Principaux encadrements : **Post-doc** Bruno Cheviron ; **Thèse** Silvio Gumiere ; **DAA** Grégory Davy

Avant de proposer un nouveau modèle, nous avons mis à l'épreuve plusieurs d'entre eux (*i.e.* WEPP et STREAM) sur les bassins de l'observatoire OMERE [A6, A9] afin de dégager les éléments pertinents et les voies d'amélioration à travailler dans notre contexte d'étude.

Au delà de la mise en évidence d'un écart important entre les prédictions des modèles et les observations (figure 10), ce retour d'expérience sur des modèles existants a permis d'identifier trois voies de progressions prioritaires : i) la paramétrisation des conditions de production des flux hydro-sédimentaires en lien avec la dynamique saisonnière des états de surface, avec une importance particulière des fentes de retrait à Kamech ; ii) la prise en compte explicite des éléments de connectivité hydro-sédimentaire intervenant dans la genèse et le transfert des flux hydro-sédimentaires ; iii) la représentation des processus pilotant le ruissellement, sans quoi la pertinence de la représentation des processus érosifs implémentés dans ces modèles ne peut pas être questionnée de manière satisfaisante.

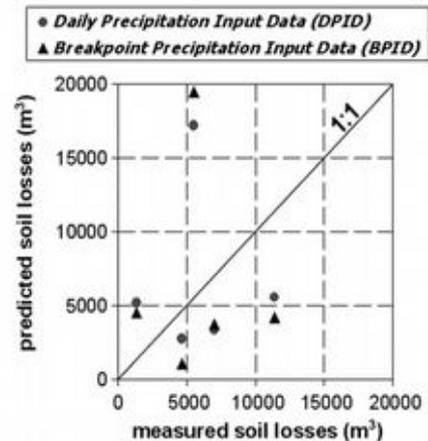


Figure 10. Confrontation entre pertes en terre prédites par WEPP et pertes en terre mesurées à l'exutoire du bassin versant de Kamech (figure tirée de [A6]).

Une fois les principaux points de blocage identifiés dans les modèles existants, nous avons développé une modélisation « maison » permettant de tester des implémentations alternatives. Ces développements ont abouti au modèle MHYDAS_Erosion [A14], conçu comme une extension du modèle hydrologique distribué des agrosystèmes nommé MHYDAS [Moussa et al., 2002]. Ce choix s'explique par le fait que i) MHYDAS a été développé au LISAH et intégré au sein de la plate-forme de modélisation OpenFLUID (<http://www.umr-lisah.fr/openfluid/>) facilitant le couplage entre processus sous une structure modulaire ; ii) MHYDAS est basé sur une représentation de l'espace sous la forme d'un maillage non régulier bien adapté à l'intégration d'éléments de discontinuités et à la dissociation des processus diffus et concentrés ; iii) MHYDAS est bien adapté au contexte méditerranéen avec un contrôle de la partition entre infiltration et ruissellement fortement induit par les états de surface du sol (*i.e.* processus hortonien dominants). Le mode de représentation des processus érosifs a été choisi en complète cohérence avec la représentation des processus hydrologiques de MHYDAS, et en prenant garde à bien dissocier processus d'érosion diffuse et processus d'érosion concentrée (rigole, ravine, ou cours d'eau). Ce dernier point nous a amenés à introduire une représentation conceptuelle des rigoles au sein des unités surfaciques de MHYDAS. Le formalisme mathématique pour représenter les différents processus érosifs s'appuie principalement sur une remobilisation de représentations éprouvées dans des modèles existants.

À ce jour, MHYDAS_Erosion intègre deux avancées importantes par rapport aux modèles existants. La première est sa capacité à prendre en compte explicitement des éléments singuliers du paysage, de type bande enherbée, fortement impliqués dans la modulation de la connectivité hydro-sédimentaire d'un bassin versant. Une analyse bibliographique approfondie sur ce sujet [A13] a permis d'identifier, dans les travaux de Deletic (2001, 2005) notamment, un formalisme adapté pour représenter, à l'aide d'un nombre adimensionnel (adimensional particle fall number), l'efficacité de piégeage des bandes enherbées sur les flux érosifs. La seconde, qui s'appuie elle aussi sur un travail de synthèse bibliographique [A8], réside dans la paramétrisation de l'érodibilité diffuse à l'aide de l'indice de stabilité structurale. Cet indice

présente le double intérêt d'être normalisé [ISO/FDIS 10930] et parfaitement cohérent avec la dissociation recherchée entre processus d'érosion diffuse et processus d'érosion concentrée.

La mise à l'épreuve de MHYDAS_EROSION sur le bassin observatoire de Roujan a permis de montrer que ces développements permettaient de bien rendre compte des flux d'érosion au niveau de trois stations hydrologiques emboîtées (figure 11), et cela malgré la forte non-linéarité spatiale qui existe sur ce bassin (cf. p 55).

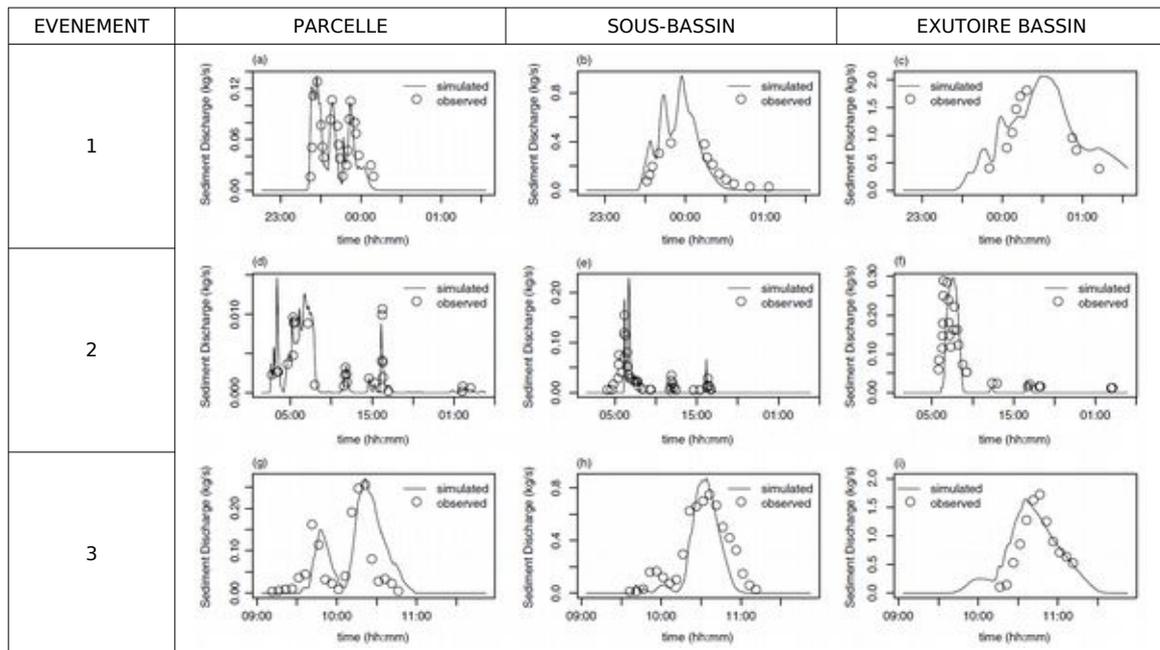


Figure 11. Confrontation entre débits solides prédits par MHYDAS_EROSION et débits solides mesurés pour trois échelles emboîtées de Roujan et pour trois événements contrastés (figure tirée de [A14]).

Méthodes de mise en œuvre de modélisations spatialisées

Principales collaborations : BRGM Orléans & Montpellier, INRA Orléans

Principaux encadrements : **Post-doc** Bruno Cheviron & **Thèse** Silvio Gumiere

Une première contribution en matière de mise en œuvre des modèles distribués d'érosion s'est concrétisée par la proposition d'un cadre théorique pour leur analyse de sensibilité [A11]. Ce cadre théorique repose sur trois principales spécificités. La première est de considérer des conditions hydriques (pluie et ruissellement) variées mais limitées, ce qui permet de limiter l'analyse de sensibilité aux seuls paramètres liés à l'érosion tout en prenant en compte l'influence majeure de l'hydrologie sur les sorties des modèles d'érosion (Wainwright & Parsons, 1998). La seconde est de s'appuyer sur un bassin versant virtuel théorique à 9 compartiments (figure 12a) pour traiter la sensibilité des modèles à la répartition spatiale des paramètres à travers l'exploration de 11 configurations contrastées de distribution de paramètres (figure 12b). La dernière est de proposer un nombre limité de paramètres adimensionnels synthétiques en lien avec la pente et l'érodibilité afin de permettre une comparaison explicite du comportement de modèles d'érosion, même si ceux-ci sont construits sur des concepts très différents. La figure 12c illustre le schéma global du couplage entre l'outil d'analyse de sensibilité SENSAN de Pest (Doherty, 2004) et le modèle d'érosion considéré.

La pertinence et l'intérêt de ce cadre méthodologique théorique a été éprouvé à travers son application sur 4 modèles d'érosion présentant des objectifs et des modes de représentation très variés (MHYDAS_Erosion, STREAM, PESERA et MESALES) allant du modèle événementiel à base physique jusqu'au modèle de cartographie du risque érosif pluri-annuel [A15]. Les résultats ont montré une forte variabilité de la sensibilité des modèles d'érosion en fonction

des conditions de pluie et de ruissellement. Ceci confirme la pertinence de conduire l'analyse de sensibilité des modèles d'érosion dans des conditions hydrologiques variées. Le recours à un cadre d'analyse unifié a permis de mettre en évidence une cohérence globale des comportements des différents modèles en réponse aux changements de conditions et de configurations spatiales, mais aussi des spécificités de comportements propres à chaque modèle. Enfin, ce test de sensibilité a également permis de mettre en avant une plus grande sensibilité des modèles d'érosion testés au paramètre synthétique d'érodibilité par rapport au paramètre synthétique de pente (à l'exception du modèle MESALES).

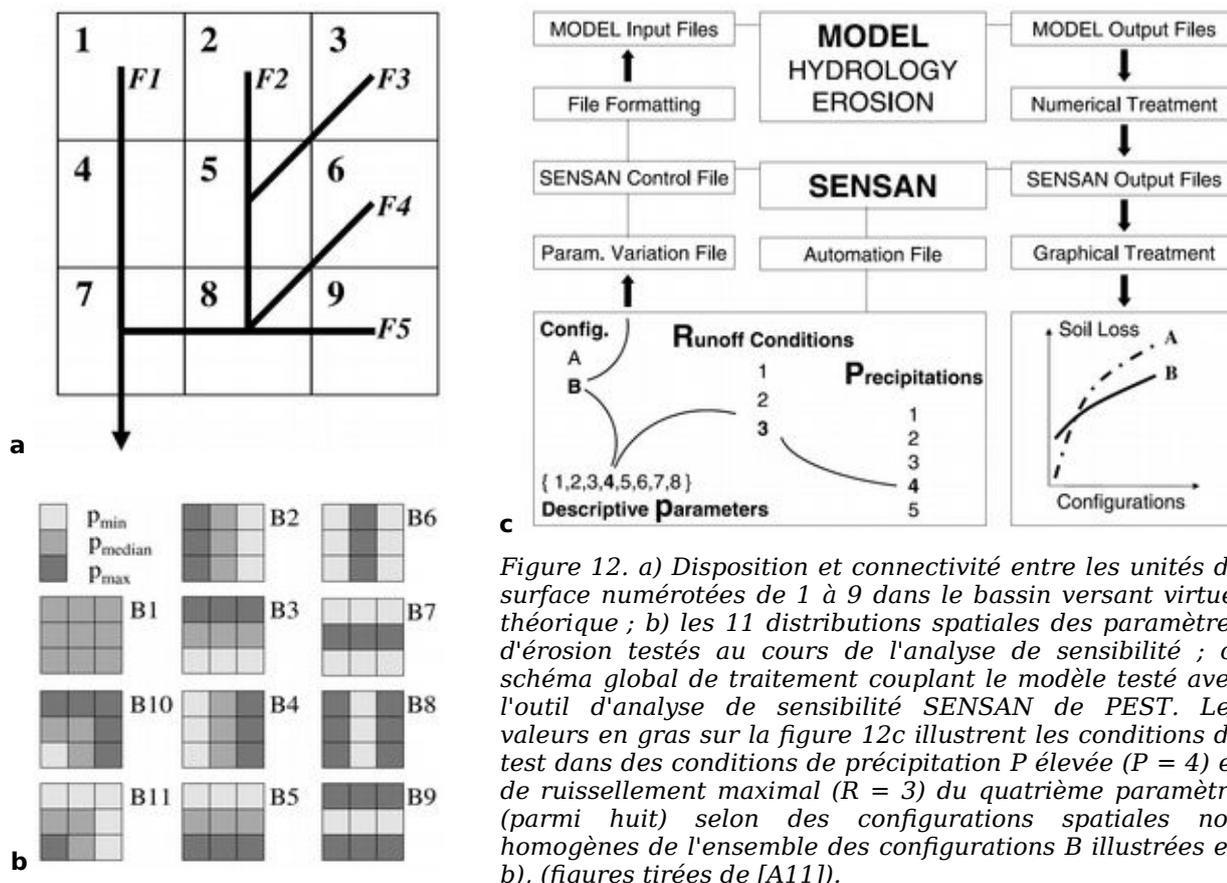


Figure 12. a) Disposition et connectivité entre les unités de surface numérotées de 1 à 9 dans le bassin versant virtuel théorique ; b) les 11 distributions spatiales des paramètres d'érosion testés au cours de l'analyse de sensibilité ; c) schéma global de traitement couplant le modèle testé avec l'outil d'analyse de sensibilité SENSAN de PEST. Les valeurs en gras sur la figure 12c illustrent les conditions de test dans des conditions de précipitation P élevée (P = 4) et de ruissellement maximal (R = 3) du quatrième paramètre (parmi huit) selon des configurations spatiales non homogènes de l'ensemble des configurations B illustrées en b), (figures tirées de [A11]).

Une seconde contribution réside dans la proposition d'une procédure d'identification multi-échelle des paramètres de modèles distribués [B10]. Cette procédure, basée à nouveau sur l'outil PEST, a été testée pour reproduire au mieux les flux hydro-érosifs au niveau des 7 points de mesure répartis sur le bassin versant de Roujan (cf. figure 2 p 26) à l'aide du modèle MHYDAS_Erosion. En facilitant une évaluation multi-échelle d'un modèle distribué, une telle procédure peut permettre de ré-interroger soit les hypothèses du modèle, soit son application sur un bassin réel donné. Le résultat de cette procédure appliquée à MHYDAS_Erosion sur Roujan a, par exemple, conduit à identifier le besoin de mieux prendre en compte : i) les processus d'exfiltration ; ii) la distribution spatiale de certains éléments clés du bassin (e.g. les caractéristiques physiques des fossés à Roujan) ; iii) la variabilité spatiale des pluies, même sur des petits bassins versants comme Roujan... On notera que ces points relèvent en grande partie de la modélisation des flux d'eau, ce qui souligne à nouveau notre difficulté à tirer des enseignements propres à la modélisation des processus érosifs tant ces enseignements sont conditionnés à une bonne représentation des flux d'eau...

Bilan du volet 1

Pour des questions de présentation, le bilan de mes contributions dans le volet 1 a été établi en différenciant trois composantes : l'observation in-situ de chroniques de flux, la caractérisation spatialisée des propriétés du milieu, et la modélisation distribuée de l'érosion. Cependant ces trois composantes sont intimement liées puisque les données d'observation des flux et les données de caractérisation du milieu permettent d'alimenter les modèles distribués pour leur validation ou l'estimation de leurs paramètres alors que les modèles distribués définissent de nouveaux besoins d'observation et permettent, dans certains cas, de préfigurer des dispositifs d'observation... Ces trois composantes sont aussi fortement complémentaires dans le sens où les observations de chroniques de flux privilégient la dimension temporelle sur la dimension spatiale, les caractérisations spatialisées des caractéristiques du paysage privilégient la dimension spatiale sur la dimension temporelle alors que la modélisation distribuée tente de concilier au mieux ces deux dimensions. En fédérant sur un même site l'observation d'une variété de flux biophysiques en lien avec l'activité anthropique et le forçage climatique, les bassins de l'observatoire OMERE constituent les supports privilégiés de ma recherche. Ils forment en effet un excellent dispositif pour : i) comprendre la réponse hydro-érosive à différentes échelles spatiales et temporelles ; ii) tester des hypothèses de fonctionnement ; iii) développer et mettre à l'épreuve des modélisations distribuées ; iv) développer et mettre à l'épreuve des méthodes de caractérisation du milieu et des manifestations de l'érosion.

En dépit de tous les efforts produits par la communauté travaillant autour de la zone critique, l'observation de la réponse hydro-érosive et des caractéristiques du paysage, à des hautes résolutions spatiales et temporelles, reste délicate dans l'état actuel des techniques d'observation. Les données produites demeurent bien souvent imprécises, incertaines et incomplètes. Les raisons sont multiples : imprécision intrinsèque des capteurs utilisés, maîtrise des observations sur une portion non exhaustive de la zone d'intérêt, décalage sémantique (*i.e.* la variable mesurée n'est souvent pas la variable d'intérêt), décalage de résolution spatiale (*e.g.* pixel *Versus* parcelle), décalage de résolution temporelle (*e.g.* date d'acquisition des images décalée par rapport aux besoins, lacunes dans une série d'observations)... La compréhension du lien entre réponse hydrologique, forçage climatique et caractéristiques du milieu doit donc composer avec cette nature floue des observations et caractérisations paysagères, que ce soit pour les analyses comparatives (*e.g.* similitude/différence de comportements ou de paysages entre plusieurs bassins) ou pour des analyses reposant sur des modélisations distribuées qui doivent pouvoir assimiler ces données floues dans leurs opérations de calage, d'estimation des paramètres ou de validation.

Enfin, si l'observation des flux hydro-érosifs en quelques points limités de l'espace peut conduire à mettre en évidence certaines non-linéarités de la réponse hydrologique, elle ne permet pas toujours de localiser les échelles importantes de transition dans la prédominance de certains processus (Blöschl & Sivapalan, 1995). Le développement de méthodes visant à démultiplier le suivi des flux hydro-érosifs dans l'espace me semble être une voie à privilégier dans le futur. Sur ces aspects, il faut être inventif et essayer de mettre au point des capteurs à bas-coût (*e.g.* canne limnimétrique), des capteurs intégrateurs (*e.g.* pièges à sédiments), des mesures indirectes (*e.g.* des proxys) ou de nouvelles approches de télédétection. Une première piste de caractérisation plus spatialisée des processus hydro-érosifs, en lien avec des approches de télédétection, consiste à cartographier les manifestations de ravinement à quelques moments clés de l'histoire du développement des ravins en remobilisant les archives photographiques disponibles.

Au final, une préoccupation majeure de mon activité dans ce premier volet a eu pour objectif de fournir des données d'observation, en lien avec le comportement hydro-érosif des bassins, qui soient les moins floues et les plus cohérentes possibles avec leur usage dans le cadre de l'hydrologie spatialisée. Jusqu'à maintenant, mes principales contributions ont résidé dans la mise en place de dispositifs innovants d'observation des flux hydro-érosifs sur le long-terme et dans le développement de méthodes rapides et facilement reproductibles de caractérisation du milieu. J'ai également contribué au développement d'un modèle d'érosion ayant un module de connectivité, ainsi qu'à des procédures permettant de mieux valoriser les données d'observation dans les modèles distribués à base physique.

Synthèse du volet 1

Le premier volet de ce mémoire résume mes développements en matière de stratégies d'observation et de modélisation. Ces développements sont conçus pour appuyer les avancées cognitives (volet 2) et l'appui à la gestion des bassins versants (volet 3). Ils s'inscrivent dans le cadre conceptuel de l'hydrologie spatialisée, avec la recherche d'un équilibre entre dimension temporelle et dimension spatiale.

Mes principales contributions, classées par ordre décroissant d'importance, relèvent des trois composantes suivantes :

- la mise en place, l'animation et la mise en réseau de dispositifs d'observation pérennes (observatoire de recherche en environnement) pour le suivi in-situ haute-fréquence des flux hydro-érosifs en Méditerranée ;*
- le développement de méthodes de caractérisation de l'hétérogénéité interne des bassins versants pour mieux prendre en compte certains forçages naturels et anthropiques, pour interpréter les réponses hydro-érosives ou alimenter la modélisation ;*
- des avancées en matière d'outils et de méthodes de mise en œuvre de modélisations distribuées de l'érosion hydrique, en articulation étroite avec les observations de chroniques de flux et les propriétés distribuées du milieu que j'ai contribuées à acquérir.*

Ces développements ont été principalement réalisés au cours de 2 thèses et un stage de post-doctorat. Ils ont donné lieu à la publication de 14 articles référencés WOK.

Au-delà de maintenir une activité sur ces trois composantes, il me semble opportun de chercher à développer des méthodes permettant de démultiplier, dans le temps et dans l'espace, les caractérisations spatialisées des processus hydro-érosifs. À mon sens, les pistes les plus intéressantes sont le développement de nouveaux capteurs à bas coûts, la recherche de proxys du fonctionnement hydro-érosif, et une meilleure valorisation des archives sédimentaires et photographiques.

Volet 2. Intensité et variabilité des facteurs et processus de l'érosion hydrique en Méditerranée

Introduction

Au cours des dernières décennies, un important corpus de connaissances s'est progressivement constitué sur les facteurs et processus d'érosion. L'analyse de cette littérature sur **le fonctionnement hydro-érosif des bassins versants méditerranéens** fait ressortir les principaux éléments suivants :

1. la génération du ruissellement se fait principalement par dépassement de la capacité d'infiltration (ruissellement hortonien) avec comme conséquence le rôle prédominant des états de surface comme facteur de contrôle du ruissellement et de l'érosion (Cerdan et al., 2001 ; Le Bissonnais et al., 1998 ; Moussa et al., 2002) ;
2. les flux de sédiments ramenés à la surface contributive (*i.e.* taux spécifiques) sont souvent, contrairement aux autres régions du globe, plus élevés à l'exutoire des petits bassins versants qu'à l'exutoire des parcelles agricoles (de Vente et al., 2006 ; Vanmaercke et al., 2012). La principale explication avancée par ces auteurs est l'émergence des processus d'érosion concentrée (*i.e.* érosion ravinatoire, érosion de berge et érosion en masse) qui domineraient à l'échelle du bassin versant de l'ordre du km² alors qu'ils ne sont pas actifs à l'échelle de la parcelle ;
3. les ravines et les zones de « badlands » sont identifiées comme les principales « sources » contributives aux flux de sédiments à l'échelle des bassins versants, et donc à l'envasement des retenues de barrages (de Vente et al., 2006, 2008 ; Nadal-Romero et al., 2011 ; Poesen et al., 2003 ; Simmoneaux et al., 2015) ;
4. la majorité des flux de sédiments se produit durant une très courte période de temps, *i.e.* un très faible nombre d'événements intenses. Ce haut degré de non-linéarité temporelle des flux de sédiments est relayé dans la littérature anglo-saxonne par le terme « time compression ». Selon González-Hidalgo et al. (2007), 50 % des flux annuels de sédiments dans les bassins versants situés en Méditerranée occidentale se produiraient en moyenne au cours des trois jours les plus érosifs de l'année.

Tout en relevant ces nombreuses avancées, Poesen (2018) souligne, dans un récent état de l'art, que trois grands verrous de connaissance doivent encore être levés pour aller vers une gestion plus durable des sols. Ces verrous de connaissance relèvent : i) des processus d'érosion des sols, tant naturels qu'anthropiques, et de leurs interactions ; ii) des modalités d'interactions des processus d'érosion dans l'espace et le temps ; et iii) de techniques et stratégies innovantes pour prévenir ou réduire l'érosion des sols. Les grands traits du fonctionnement hydro-érosif des bassins méditerranéens, évoqués ci-dessus, restent en effet insuffisants lorsqu'il s'agit de proposer une stratégie de lutte anti-érosive. La mosaïque de contextes naturels et humains qui constitue la zone méditerranéenne se traduit par une grande variabilité de fonctionnements qu'il convient d'appréhender si l'on veut être en mesure de proposer une stratégie de protection des sols adaptée à chaque situation (Laouina, 2010).

En mobilisant les dispositifs et méthodes d'observation/caractérisation présentés dans le volet 1, ce deuxième volet se propose de réinterroger ces grands traits de comportement pour différents contextes biophysiques et anthropiques méditerranéens. Il expose les connaissances acquises sur l'intensité et la variabilité des facteurs et processus pilotant les flux hydro-érosifs, d'abord à l'échelle de la parcelle, puis à l'échelle du bassin versant en explorant notamment les modalités d'interactions des processus d'érosion dans le temps puis dans l'espace.

À l'échelle de la parcelle

Hiérarchie des facteurs régissant l'érosion parcellaire en Europe

Principales collaborations : BRGM Orléans, UCL Louvain, Univ. Cagliari, Univ. Lancaster, Univ. Vienne , etc

Afin d'explorer la variabilité des taux d'érosion diffuse et/ou en rigoles et d'identifier les facteurs dominants expliquant leur variabilité spatiale en Europe, les données de 81 sites expérimentaux sur 19 pays européens ont été regroupées. La base de données ainsi constituée cumule 2741 années de mesure de l'érosion à l'exutoire de parcelles de longueur comprise entre 3 et 200 m, sous pluie naturelle et sans aménagement spécifique de conservation du sol.

L'analyse de cette base de données [A12] a permis de montrer que l'occupation du sol constitue le principal facteur régissant l'érosion de surface à l'échelle parcellaire, très loin devant d'autres facteurs comme la texture du sol, l'inclinaison et la longueur de la pente. Les taux d'érosion les plus élevés ont été mesurés pour les parcelles de sol nu. Viennent ensuite les parcelles de vigne et de verger, puis celles sous cultures annuelles conventionnelles, alors que très logiquement les parcelles sous végétation naturelle permanente sont celles qui subissent les plus faibles taux d'érosion. Ces résultats confirment bien l'impact majeur de la mise en culture sur l'érosion de surface. En comparant les taux d'érosion de la zone méditerranéenne (partie européenne uniquement) par rapport aux taux d'érosion dans les autres zones de l'Europe, nous avons constaté que l'érosion des parcelles sous végétation naturelle y est plus élevée, ce qui s'explique probablement par une densité de végétation plus faible du fait des sécheresses estivales marquées en Méditerranée. De façon plus surprenante, cette comparaison a également mis en évidence des taux d'érosion nettement moins importants sur le pourtour Nord de la Méditerranée que sur le reste de l'Europe pour les parcelles de sol nu ou cultivées en vigne et verger. Le fort taux de cailloux recouvrant les sols du pourtour Nord de la Méditerranée, connu pour son pouvoir de protection contre l'érosion en nappe et en rigoles, constitue l'explication la plus probable de ce comportement contrasté. Il y a fort à parier que le fort taux de cailloux à la surface de parcelles du pourtour Nord de la Méditerranée soit le marqueur d'une érosion intense dans le passé.

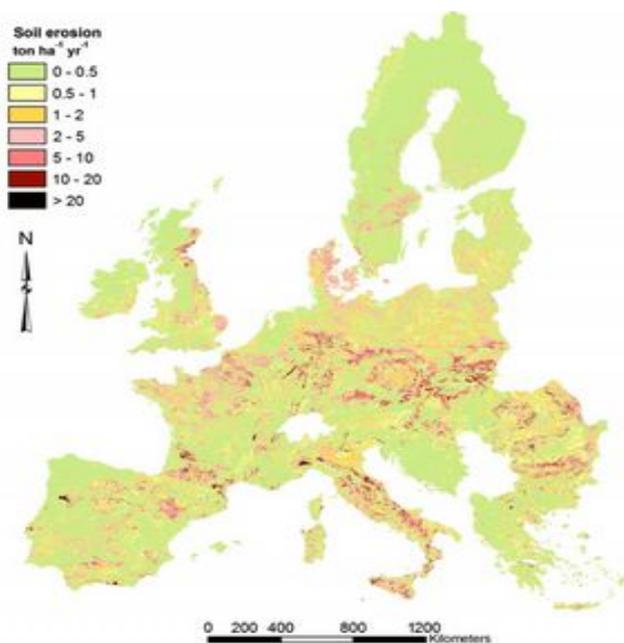


Figure 13. Carte de l'érosion diffuse et en rigoles sur l'Europe estimée par un modèle tenant compte des facteurs suivants : occupation du sol, taux de cailloux à la surface du sol, pente, longueur de pente et texture de sols (figure tirée de [A12]).

Les connaissances acquises à partir de cette base de données sur les liens entre facteurs et taux d'érosion ont été finalement mobilisées pour proposer une carte de l'érosion diffuse et en rigoles à l'échelle de l'Europe (figure 13) basée sur l'occupation du sol Corine Land Cover. L'érosion diffuse et en rigoles a ainsi été estimée à 1,24 t ha⁻¹ an⁻¹ sur l'ensemble de l'Europe, et à 3,6 t ha⁻¹ an⁻¹ si on ne considère que les terres cultivées. Ces valeurs sont beaucoup plus faibles que la plupart des valeurs qui étaient jusqu'alors estimées à partir d'une extrapolation de mesures locales sans correction de l'ensemble des facteurs pris en compte dans notre travail.

Effet des itinéraires techniques : cas de la vigne

Principales collaborations : Univ. Triers, Univ. Malaga, Univ. de Navarre (Pampelune), Univ. Valence, Wageningen, ARTeHIS Dijon

Si le travail mené à l'échelle européenne a permis de montrer que l'occupation du sol permet d'expliquer les différences d'ordre 1 des taux d'érosion parcellaire, les itinéraires techniques peuvent aussi faire fortement varier l'intensité de l'érosion au sein d'une même culture. En prenant comme cas d'étude la culture de la vigne, nous illustrons ci-dessous successivement comment la conduite et l'implantation de la vigne impactent significativement les taux d'érosion parcellaire en réaction à des modifications de l'état physique du sol, principalement en surface lors d'opérations courantes, mais également en profondeur lors d'opérations exceptionnelles.

L'impact de l'itinéraire technique de la vigne a tout d'abord été étudié en analysant les effets de différentes modalités de conduite de l'inter-rang de vigne en vigueur dans le contexte viticole Languedocien. Les différentes modalités répertoriées ont comme objectif commun la maîtrise du couvert végétal sur l'inter-rang pour éviter la concurrence en eau ou encore la prolifération de maladies. Elles reposent majoritairement sur la gestion de la végétation naturelle, bien que la pratique de l'enherbement contrôlé, basée sur le recours à des espèces végétales bien choisies, se soit assez récemment développé pour des considérations de préservation des ressources en eau et en sol. L'impact sur l'érosion de ces différentes modalités de conduite de l'inter-rang reste peu documenté et fait l'objet de large débat dans la littérature [Gómez et al., 2008]. Nous avons donc engagé un travail [A10] dont l'objectif a été d'évaluer l'effet sur le ruissellement et l'érosion de deux modalités contrastées de gestion de la végétation naturelle dans l'inter-rang :

1. le travail mécanique du sol via un labour superficiel (parcelle T)
2. le non-travail du sol avec application d'herbicides (parcelle NT)

La démarche entreprise s'est appuyée sur des données de flux hydro-érosifs acquises sous conditions naturelles à l'exutoire de deux parcelles de Roujan entre 1995 et 1999. Sachant que ces parcelles sont soumises au même forçage climatique et présentent des caractéristiques assez proches (Tableau 1), la différence de pratiques sur les deux parcelles peut être considérée comme le principal facteur responsable des différences de comportement hydro-érosif.

Paramètres	Parcelle travaillée (T)	Parcelle non travaillée (NT)
		
Superficie (ha)	0,324	0,12
Orientation	NS	EW
Pente moyenne (%)	8	12
Pente amont-centre-aval (%)	10-8-2	16-10-7
Longueur de pente (m)	105	60
Argile 0-2 µm (%)	24,6 ± 4,1	18,4 ± 2,4
Limon 2-50 µm (%)	38,6 ± 4,7	54,6 ± 3
Sable 50-2000 µm (%)	36,7 ± 6,4	26,9 ± 3,2
Carbone organique total (%)	0,9 ± 0,25	1,0 ± 0,4
Gestion de l'inter-rang	travail mécanique	application d'herbicides
Vendange	mécanique	manuelle

Tableau 1. Caractéristiques des deux parcelles de mesure du bassin versant de Roujan.

Une analyse comparative de 18 événements mesurés à l'exutoire des deux parcelles a révélé une forte variabilité de la réponse hydro-érosive d'une crue à l'autre. Le caractère transitoire de l'impact du travail du sol sur les taux d'infiltration, maximum juste après le travail et

diminuant progressivement pour atteindre des taux similaires à ceux de la parcelle non travaillée après un cumul de pluie de 200 mm environ (Andrieux, 2001) explique en grande partie ces différences. En considérant les flux hydro-érosifs moyens sur ces 18 événements (Tableau 2), l'analyse comparative a fait apparaître une différence de comportement très significative entre les deux modalités de conduite : la pratique de travail du sol par labour superficiel (T) permet de réduire les flux de ruissellement d'un facteur 2 à 3, et les flux d'érosion d'un facteur 5 par rapport à la pratique de non-travail du sol avec application d'herbicides (NT). Dans les conditions d'observation présentant des pluies courantes à rares, mais non exceptionnelles, la pratique du désherbage de l'inter-rang par travail du sol s'avère donc une pratique à privilégier par rapport à la pratique de maîtrise de la végétation naturelle sans travail du sol par l'usage d'herbicides. Des travaux complémentaires devront s'assurer que le travail superficiel du sol s'avère toujours avantageux pour la ressource en sol dans le cas d'événements exceptionnels (Fleskens & Stroosnijder, 2007). L'arrêt en 2000 du suivi des flux à l'exutoire de la parcelle travaillée n'a pas permis d'approfondir cette question sur le dispositif de Roujan.

	Pluie (mm)	I5max (mm/h)	I30max (mm/h)	Ruissellement (mm)		Q_max (l/s)		[MES] (g/l)		Erosion (t/ha)	
				T	NT	T	NT	T	NT	T	NT
Minimum	3,7	11	7	0,1	1,5	0,8	1,5	0,4	1,9	0,01	0,08
Maximum	96,1	165	107	26,2	45,2	59,5	44,7	21,4	47,3	5,16	10,50
Moyenne	30,5	60	27	6,8	16,1	13,0	16,1	5,5	17,1	0,55	2,48

Tableau 2. Résumé des valeurs caractéristiques de la pluie, du ruissellement et de l'érosion pour les 18 événements érosifs utilisés dans l'analyse comparative (I5max = intensité maximale de la pluie en 5 minutes ; I30max = intensité maximale de la pluie en 30 minutes ; Q_max = débit maximal, [MES] = concentration moyenne en matières en suspension).

Dans le cas particulier des cultures pérennes, l'intensité des processus érosifs peut également être exacerbée lors des premières années suivant l'implantation de la culture. En effet des études ont montré des pics d'érosion très élevés juste après la plantation de cultures de citronniers (Cerdà et al., 2009) ou d'oliviers (Parras-Alcántara et al., 2016), puis une décroissance régulière jusqu'à un niveau de stabilisation moyen. Les principales raisons évoquées sont les lourdes perturbations apportées au sol au moment de la plantation du fait du labour profond et du tassement lié au passage d'engins. En cas de renouvellement, ces perturbations sont encore plus fortes car les racines des anciennes cultures doivent souvent être extraites et évacuées pour des raisons sanitaires. Pour mieux appréhender l'ampleur des modifications liées à la plantation d'une nouvelle vigne, un suivi du comportement érosif a été réalisé sur deux parcelles contiguës situées dans la vallée du Rhin : l'une plantée en 2012 et l'autre depuis plus de 30 ans. Les deux parcelles sont cultivées avec le même cépage (Riesling) et conduites de façon similaire, avec un enherbement naturel maîtrisé par la combinaison du travail du sol dans l'inter-rang, à l'automne et au printemps, et de la pulvérisation d'herbicides au printemps et en été (figure 14 a et b).

Un suivi basé notamment sur la technique du déchaussement des pieds de vigne a été mis en place sur les deux parcelles pendant les 3 premières années suivant la plantation de la nouvelle vigne (2013 à 2015). Cette technique, initialement proposée par Brenot et al. (2008), repose sur la mesure de l'évolution du niveau du sol par rapport au point de greffe de chaque pied de vigne. Bien que chaque mesure individuelle porte en elle l'incertitude de la position exacte du point de greffe par rapport au niveau du sol au moment de la plantation, cette approche présente l'intérêt de proposer une vision i) intégrée, sur l'ensemble de la durée de vie de la vigne, de l'intensité de l'érosion et ii) distribuée de l'évolution du niveau du sol au sein de la parcelle de vigne.

Les résultats des suivis ([A27] et figures 14 c et d) ont permis de confirmer et quantifier le très fort impact des perturbations induites par la plantation d'une nouvelle vigne. En effet, un pic d'érosion dépassant les 60 t ha⁻¹ est atteint la première année sur la parcelle de vigne fraîchement plantée alors que le taux d'érosion sur la parcelle de vigne implantée depuis 35 ans est de l'ordre de 3 t ha⁻¹ (soit un rapport de 1 à 20). Le suivi sur 3 années consécutives permet de montrer une stabilité de l'érosion dans la parcelle de vigne de 35 ans alors que l'on constate une forte baisse de l'érosion annuelle dans la jeune vigne qui passe de 62.5 à 33,5 t ha⁻¹. Il ressort de cette étude l'importance d'orienter préférentiellement des mesures CES spécifiques (e.g. mulch) sur cette période critique des premières années du cycle de vie de la vigne.

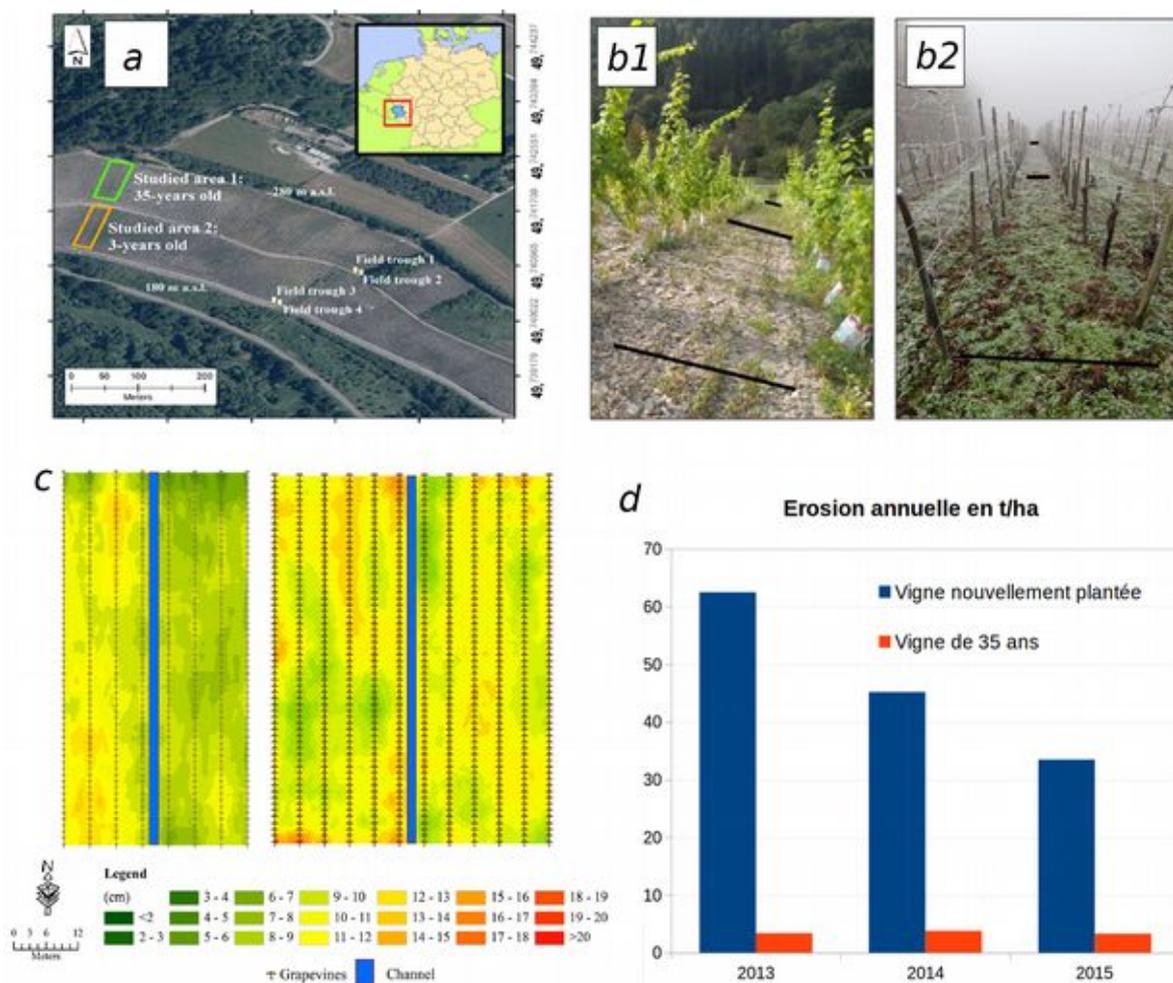


Figure 14. a) Localisation des parcelles étudiées ; b1) photographie de la parcelle de vigne de 3 ans ; b2) photographie de la parcelle de vigne de 35 ans ; c) cartographie de l'érosion des sols en 2015 par la méthode du déchaussement des pieds de vigne sur la parcelle de vigne plantée depuis 3 ans (à gauche) et depuis 37 ans (à droite) ; d) évolution des taux d'érosion annuels globaux sur chaque parcelle sur les 3 années de suivi (figure modifiée de [A27]).

Dynamique temporelle à l'échelle du bassin versant

Une bonne connaissance de la dynamique temporelle des flux hydro-érosifs est nécessaire pour guider les stratégies de lutte anti-érosive à l'échelle du bassin versant. En effet le dimensionnement d'ouvrages comme les banquettes de rétention requiert une parfaite connaissance de la répartition des flux au cours du temps, et notamment de la saisonnalité des événements intenses peu fréquents (Larson et al. 1997 ; Zhu, 2016). Par ailleurs, certaines techniques comme la mise en place de cultures intercalaires ou de bandes enherbées sont une efficacité qui varie au cours de l'année. De telles mesures ne devront être préconisées que si la saisonnalité des flux est en phase avec les périodes d'efficacité de ces mesures.

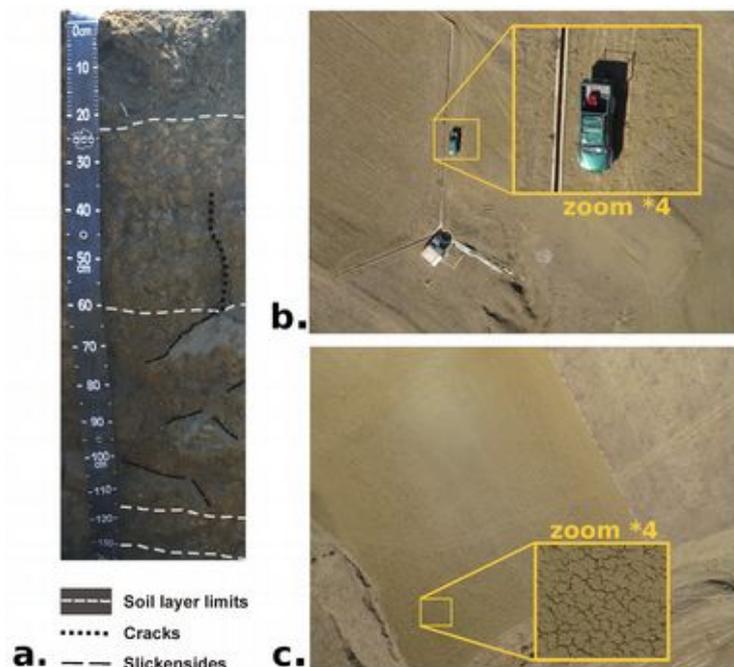
Rôle des fentes de retrait dans la dynamique saisonnière des flux hydro-érosifs à Kamech

Principales collaborations : INAT Tunis, INRGREF Tunis

Principaux encadrements : **Thèse & Post-Doc** Nesrine Inoubli

En créant des flux préférentiels d'infiltration (Mitchell and van Genuchten, 1993), la présence de fentes de retrait impacte fortement les flux de ruissellement (Arnold et al., 2005) et d'évaporation (Ritchie and Adams, 1974). De nombreux efforts ont été menés pour comprendre leur dynamique de formation en lien avec les conditions d'humidité du sol (e.g. Kirby et al., 2003). Leur impact simultané sur les flux de ruissellement et d'érosion reste cependant très mal connu à ce jour en contexte cultivé méditerranéen (Gómez et al., 2014). L'enjeu est élevé car ces sols à fort caractère vertique sont fortement représentés dans plusieurs parties du monde et font partie des sols agricoles les plus productifs du pourtour méditerranéen (Coulombe et al., 1996). Or le bassin versant de Kamech est constitué principalement de sols marneux et fortement argileux, siège d'intenses processus de gonflement-retrait (figure 15). Le dispositif emboîté et long-terme de l'observatoire a donc constitué une belle opportunité d'analyser l'impact des fentes de retrait sur la réponse hydro-sédimentaire en fonction de différentes échelles spatiales (de la parcelle au bassin versant) et temporelles (événement, mois, saison, année). La démarche retenue a consisté : i) à documenter l'ampleur et la dynamique de la présence des fentes de retrait au sein du bassin de Kamech grâce à un suivi spatio-temporel dédié ; ii) à croiser cette dynamique avec celle de 7 années de mesures des flux hydro-érosifs de la parcelle à l'exutoire du bassin versant pour identifier le rôle des fentes de retrait sur ces flux ; et iii) à affiner la quantification du rôle joué par les fentes dans la genèse des flux hydro-érosifs à l'échelle parcellaire.

Figure 15. Illustration du caractère vertique des sols de Kamech : a) photo d'un profil de sol provenant de la parcelle expérimentale et illustrant la présence de fentes et slickensides (photo de Rossano Ciampalini, 22 October 2010) ; b) photo basse altitude prise par cerf-volant montrant la présence modérée de fentes au niveau de la zone aval de la parcelle expérimentale (photo d'Olivier Planchon, 21 September 2011) ; et c) autre photo basse altitude montrant la très forte présence de fentes de retrait sur un secteur de Kamech proche de l'oued principal (photo d'Olivier Planchon, 21 September 2011). La largeur du rectangle jaune sur la figure 3b et 3c est approximativement 8m, (figure tirée de [A26]).



L'ampleur de la présence de ces fentes de retrait à la surface du sol sur l'ensemble du bassin versant a été évaluée via l'observation des fentes lors de sorties terrain à la fin de la saison sèche. Les fentes sont alors ouvertes à leur maximum. Cette cartographie de présence des fentes a montré que 2/3 du bassin était composé de sol à caractère vertique, le caractère vertique étant souvent d'autant plus prononcé que l'on s'approche de l'oued principal (bas-fonds). Parallèlement, un suivi régulier des propriétés de surface de 25 parcelles cultivées du bassin a permis de documenter précisément la dynamique temporelle d'apparition/disparition des fentes de retrait de 2005 à 2012. Sur cette période, les fentes sont présentes entre 155 et 230 jours par an, en général d'avril-mai à novembre-décembre [A26].

La confrontation de cette dynamique d'ouverture/fermeture des fentes de retrait avec l'évolution des valeurs moyennes mensuelles de pluie, ruissellement et concentration en sédiments au niveau des différentes stations emboîtées de Kamech (figure 16, [A29]) a permis d'identifier :

1. des faibles différences de la réponse hydro-érosive d'une échelle spatiale à l'autre, et ce pour l'ensemble des mois considérés ;
2. une très forte saisonnalité des flux hydro-érosifs qui se traduit par de faibles valeurs du ruissellement et de fortes concentrations en sédiments lors de la présence des fentes de retrait, notamment lors de la période post-estivale ;
3. une période critique en décembre pour le comblement du barrage de Kamech résultant de la concomitance de ruissellements qui deviennent alors vraiment significatifs alors que les concentrations en sédiments sont encore très élevées (entre 30 et 50 g l⁻¹).

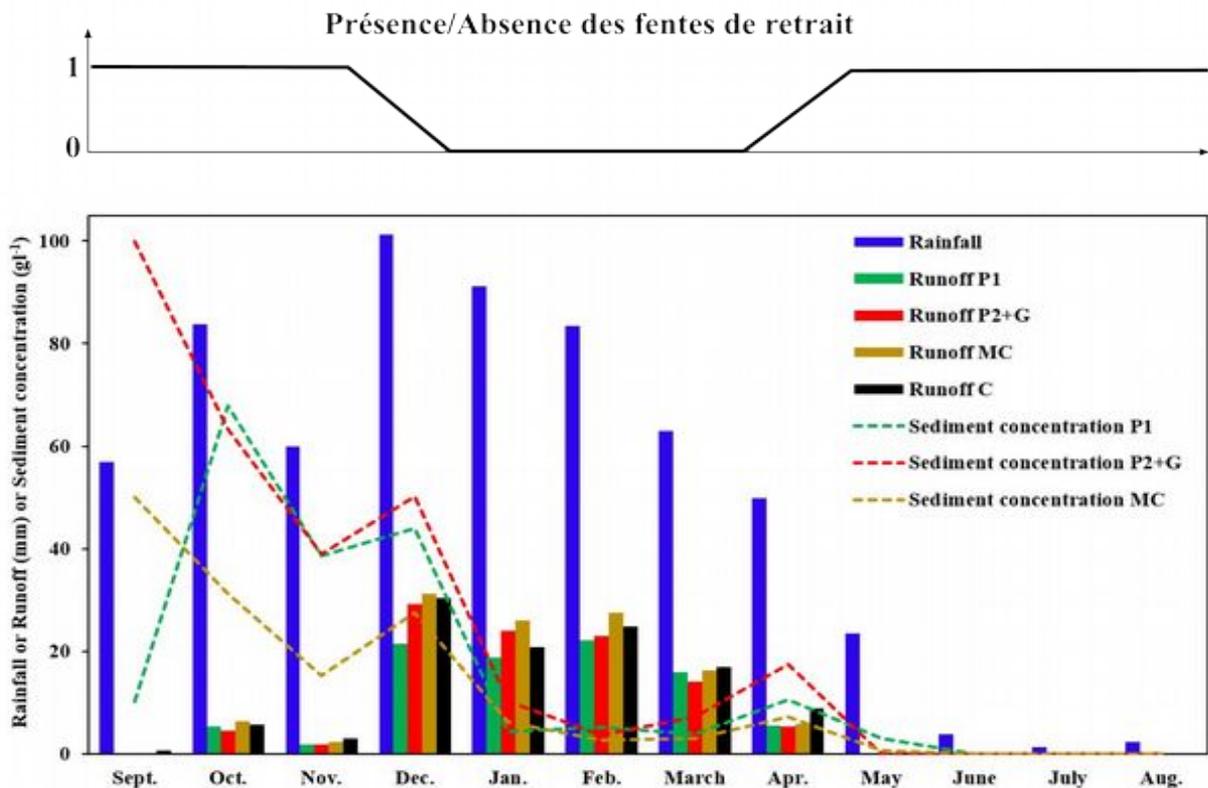


Figure 16. Dynamique saisonnière de présence/absence des fentes de retrait à la surface du sol à Kamech (haut) et valeurs mensuelles moyennes de la pluie, du ruissellement et de la concentration en sédiments calculées sur la période 2005-2012 sur les 4 stations hydrologiques du dispositif emboîté de Kamech : Parcelle (P1), Ravine (P2+G), versant (MC) et exutoire (C), (figure modifiée de [A29]).

Un triple mécanisme pourrait expliquer le lien entre le comportement hydro-érosif constaté et la présence de fentes de retrait : i) une désagrégation du sol pendant la phase de rétraction estivale des sols qui facilite le détachement-transport de sédiments lors des premières pluies ; ii) une importante limitation du ruissellement par interception de celui-ci à travers le réseau de fentes de retrait (by-pass du ruissellement) ; iii) la faible couverture végétale et les opérations de travail du sol qui coïncident avec la période de présence de fentes sur la période automnale.

Pour analyser plus finement le rôle complexe des fentes de retrait sur la genèse des flux hydro-érosifs, nous avons conduit une analyse statistique des caractéristiques de pluie, du ruissellement et de l'érosion sur les événements survenus entre 2005 et 2012 à l'exutoire de la parcelle. Il apparaît que, pour des pluies de volume et d'intensité comparables, les événements se produisant en présence de fentes de retrait génèrent un ruissellement significativement moins important en volume mais nettement plus concentré en sédiments, comparativement aux événements survenant en absence de fentes (Figure 17). Cette observation confirme bien le rôle de by-pass du ruissellement que jouent les fentes de retrait. L'observation de l'évolution du niveau de la nappe superficielle au niveau de la parcelle expérimentale a également permis de montrer que les fortes quantités d'eau s'infiltrant par les fentes de retrait ne vont pas directement à la nappe mais participent quasiment exclusivement à la ré-humectation de la zone non-saturée du sol. Au final, l'alimentation de la nappe ne s'opère significativement que lorsque le sol a été entièrement ré-humecté, c'est à dire lorsque les fentes de retrait sont entièrement refermées.

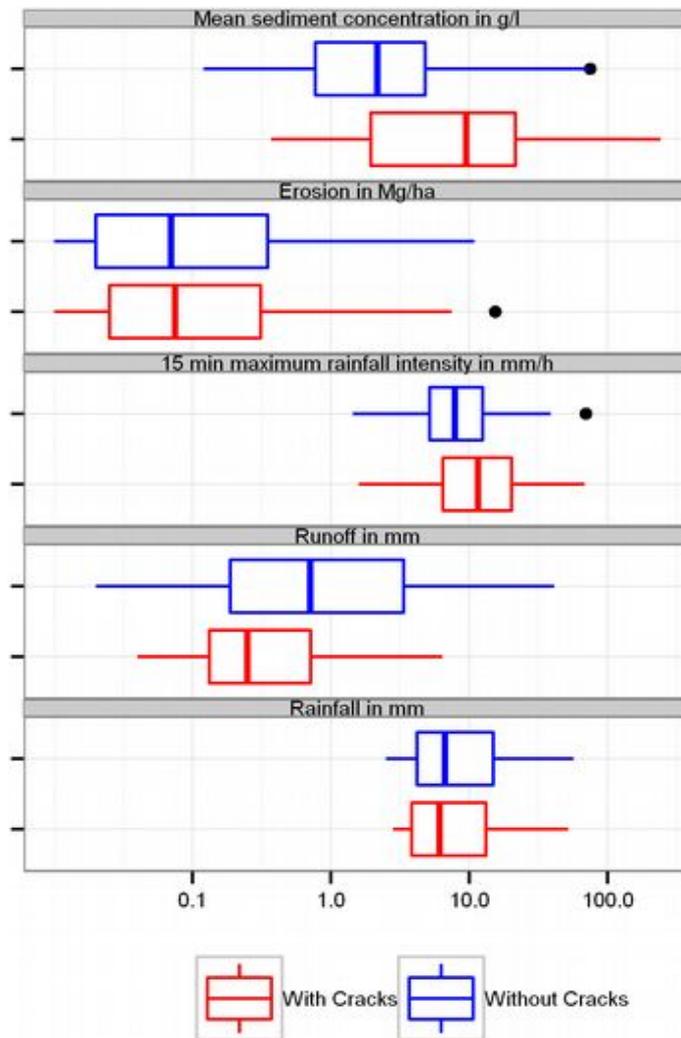


Figure 17. Comparaison sous forme de boîtes à moustache des caractéristiques de pluie, ruissellement et érosion pour la population d'événements pluvieux en différenciant les événements durant la présence ($n = 131$) et l'absence ($n = 209$) de fentes de retrait à la surface du sol au niveau de la parcelle expérimentale de Kamech (figure tirée de [A26]).

Le fait que les deux populations de flux d'érosion montrent une très forte similitude (figure 17) signifie que les effets antagonistes favorisés par la présence des fentes de retrait (*i.e.* ruissellements réduits mais concentrations en sédiments élevées) se neutralisent quasiment parfaitement à l'échelle de la parcelle. En moyenne, un événement de crue survenant en présence de fentes de retrait exporte donc autant de sédiments qu'un événement de crues survenant en absence de fentes.

Au final, cette meilleure connaissance du rôle des fentes de retrait fournit des explications à la très forte saisonnalité et à la non-linéarité temporelle des flux hydro-érosifs sur le bassin versant de Kamech. Elle fournit également des premiers éléments concrets pour orienter la lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages maghrébins dans un contexte de vertisols : agir principalement sur la période allant de la fin de l'été jusqu'à janvier en réduisant le ruissellement et en protégeant le sol de l'impact des gouttes de pluies (*e.g.* mulch, cultures intermédiaires).

Intensité et saisonnalité des flux hydro-érosifs en Méditerranée

Principales collaborations : Très nombreuses sur tout le pourtour méditerranéen

Principaux encadrements : **Post-doc** Ana Smetanova

Pour caractériser la variabilité de l'érosion sur le pourtour méditerranéen, nous avons rassemblé les chroniques de ruissellement et d'érosion enregistrées à l'exutoire de 8 petits bassins versants méditerranéens répartis sur 5 pays (Portugal, Espagne, France, Italie et Tunisie). Ces chroniques s'étendent sur des périodes variant de 3 à 29 ans et comprennent les mesures des deux bassins d'OMERE (figure 18a). L'analyse de cette base de données, totalisant 104 années complètes de flux hydro-érosifs sur une large gamme de conditions environnementales (climat, occupation du sol, aménagements,...), reflète l'extrême variabilité des flux hydro-érosifs au sein des bassins versants méditerranéens étudiés (figure 18b) : les flux spécifiques de sédiments varient de 0 à 271 t/ha à l'échelle annuelle, et de 0 à 116 t/ha à l'échelle mensuelle. Deux groupes de bassins versants avec des structures saisonnières bien contrastées ont été identifiés au sein du pourtour méditerranéen. Le premier groupe est constitué des bassins subissant un climat d'influence océanique et un été humide. Ces bassins présentent des flux maximums de sédiments au printemps et en été, et une faible concentration dans le temps des flux hydro-érosifs. Le second groupe est constitué des bassins au climat méditerranéen semi-aride ou à saison sèche. Dans ce groupe, qui inclue Roujan et Kamech, les flux de sédiments sont maximums d'octobre à janvier et les flux de sédiments sont concentrés sur un nombre très restreint de mois ou d'années. Au-delà de ce diagnostic, ce travail a proposé une méthode d'exploration de la variabilité temporelle des flux à travers une analyse combinée de la saisonnalité, de l'intensité et de la fréquence des événements, pour aider à choisir des mesures de conservation adaptées au régime hydro-érosif local [A34].

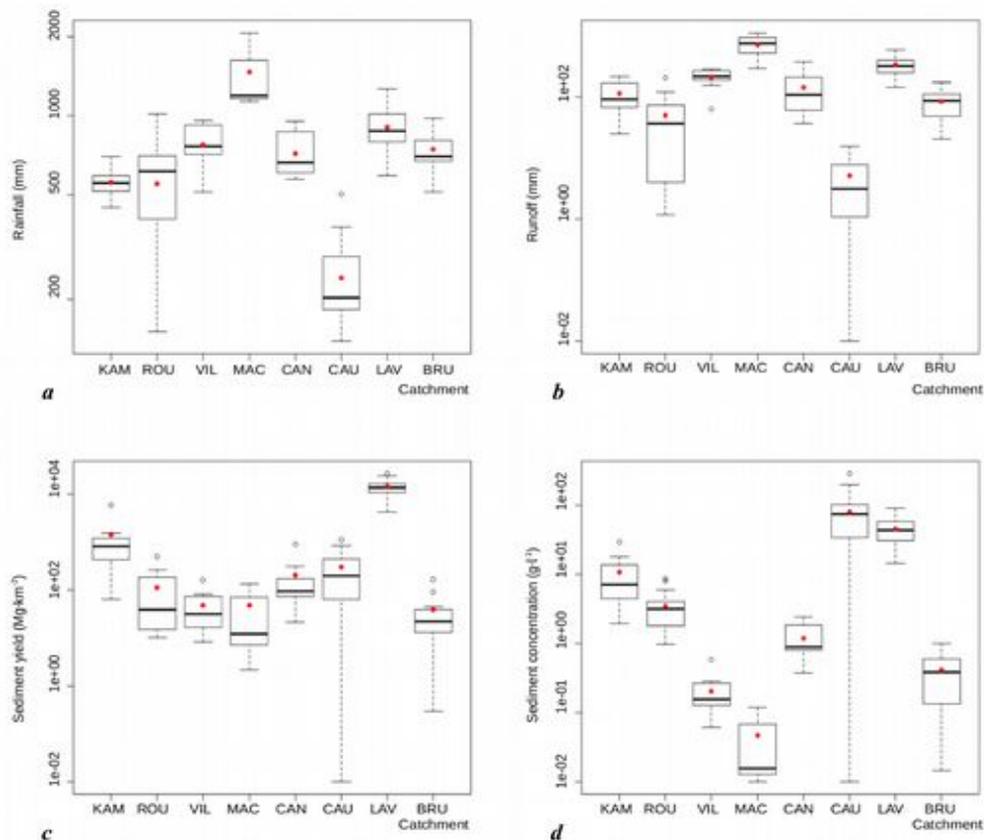


Figure 18. Boite à moustache représentant la variabilité inter-annuelle de la pluie (a), du ruissellement (b), des flux d'érosion (c) et de la concentration moyenne en sédiments (d) dans les bassins versants étudiés. L'astérisque rouge représente la valeur moyenne inter-annuelle de la variable. Les valeurs inférieures à 0,01 ont été remplacées par 0,01 (figure tirée de [A34]). La signification et l'emplacement des bassins sont renseignés dans la légende de la figure 3.

La constitution de cette base de données a également permis d'initier une analyse poussée du rôle des événements extrêmes dans les flux totaux de sédiments arrivant à l'exutoire des bassins versants. Sur la figure 19, l'analyse des taux moyens d'érosion annuel (ronds blancs) confirme la très forte variabilité des taux d'érosion d'un site à l'autre puisque les valeurs s'étendent sur plus de 2 ordres de grandeurs.

Lorsque l'on considère la contribution des 10 plus forts événements érosifs sur chaque bassin, on s'aperçoit que i) la contribution d'un événement extrême peut dépasser largement la moyenne inter-annuelle ; ii) l'importance des événements extrêmes est d'autant plus forte que les taux d'érosion moyenne inter-annuels sont faibles. Cette analyse confirme donc le très fort degré de « time compression » des flux érosifs à l'exutoire des bassins versants méditerranéens. Elle permet néanmoins de montrer une grande diversité de contribution des événements extrêmes entre les bassins qui invite une fois encore à bien prendre en compte les spécificités locales des bassins versants avant de proposer des moyens de lutte anti-érosive.

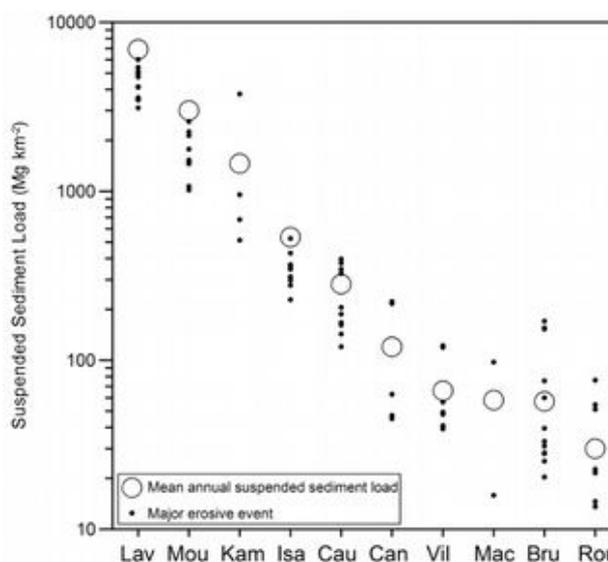
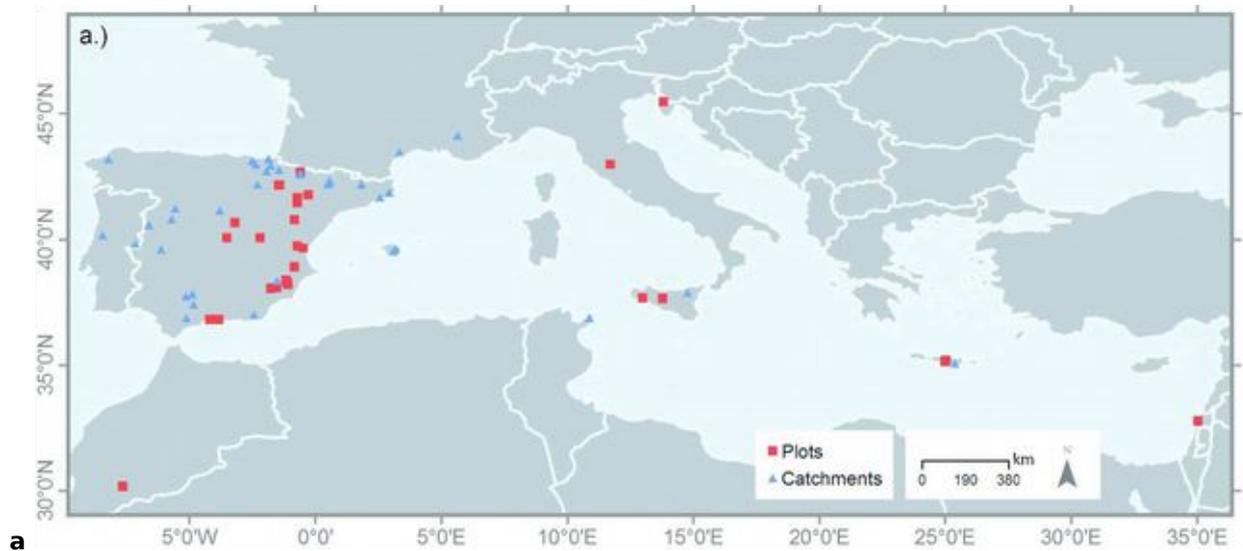


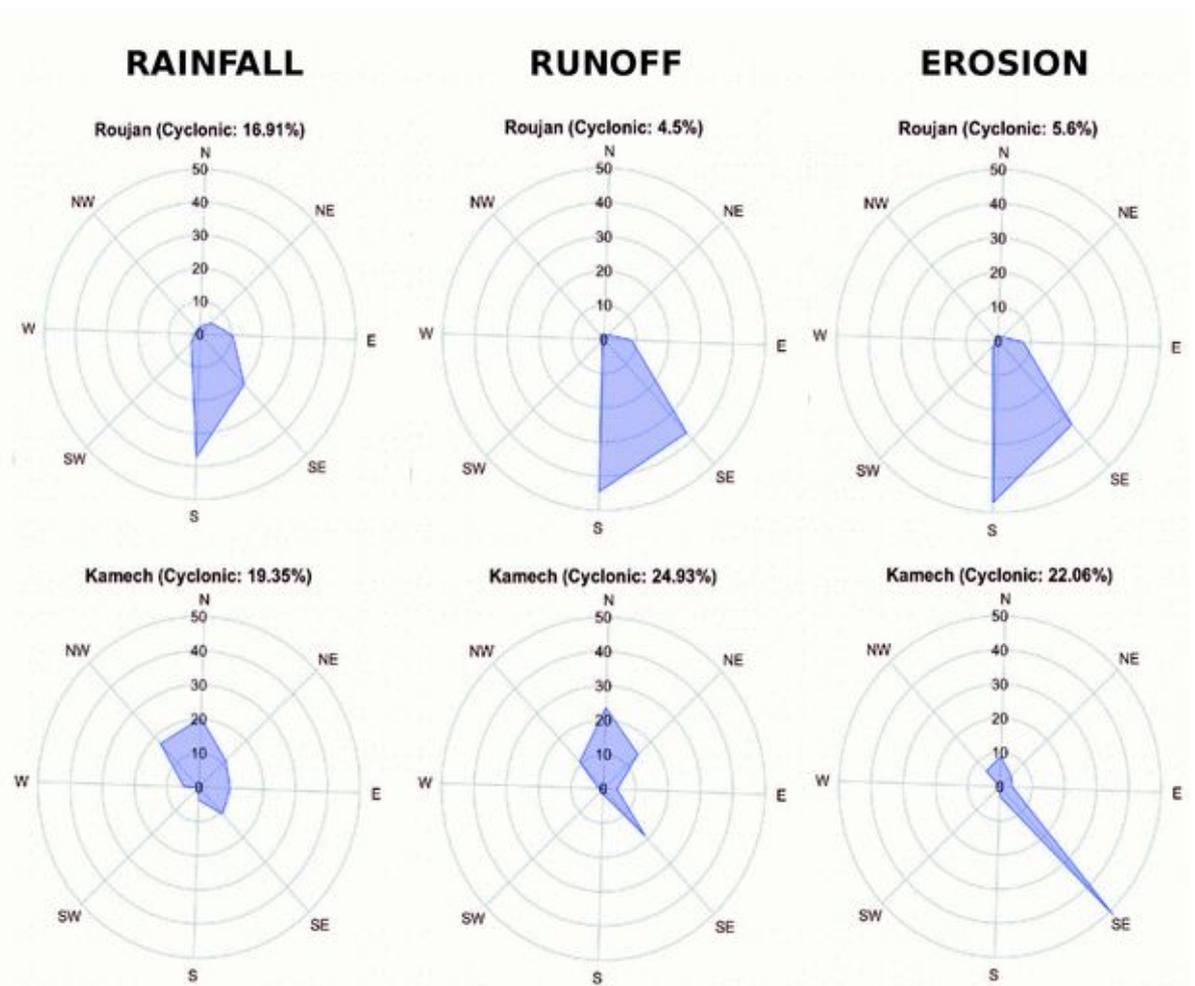
Figure 19. Diversité des taux d'érosion moyens inter-annuels sur les bassins du réseau R OSMed, et contribution des événements érosifs ayant des périodes de retour supérieures à 2 ans. La signification et l'emplacement des bassins sont renseignés dans la figure 4.

Une seconde initiative s'est attachée à analyser l'impact des conditions générales de circulation météorologique, synthétisées sous la forme de types de temps, sur la variabilité de la pluie et de la réponse hydro-érosive à l'échelle du pourtour méditerranéen. Elle s'est appuyée sur une base de données provenant de 28 parcelles et 40 petits bassins versants (figure 20a) répartis sur 9 pays du pourtour méditerranéen (Maroc, Portugal, Espagne, France, Italie, Tunisie, Sloveie, Grèce, et Israël). Les événements pluvieux et hydro-érosifs recueillis dans cette base de données ont été croisés avec les types de temps provenant du projet de ré-analyse NCEP/NCAR (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis.html>). Les résultats [A38] ont mis en avant la forte influence des types de temps sur la réponse hydro-érosive des parcelles et des bassins versants ainsi que l'existence de différentes structurations spatiales de cette influence au sein de la zone méditerranéenne.

Ce travail ouvre donc des perspectives intéressantes en matière de classification et de régionalisation des comportements hydro-érosifs sur l'espace méditerranéen à travers une prise en compte des types de temps. Dans la majorité des cas, les événements pluvieux, ruisselants et érosifs sont issus des mêmes conditions de circulation météorologique. La figure 20b illustre très bien cette situation pour le bassin de Roujan puisque l'ensemble des flux sont générés par des masses d'air provenant du Sud/Sud-Est. Cependant ce travail a également mis en lumière le comportement atypique de certains bassins, notamment du bassin versant de Kamech pour lequel la pluie et le ruissellement sont principalement produits par des flux météorologiques venant du Nord/Nord-Ouest alors que les flux d'érosion sont majoritairement générés par des flux météorologiques provenant de Sud-Est (figure 20b). Cette observation nous a amené à installer récemment, en partenariat avec l'IGE de Grenoble, un disdromètre sur Kamech afin de tester si la taille des gouttes de pluie pouvait expliquer une différence d'énergie cinétique des pluies entre celles issues de masse d'air provenant du Nord-Ouest et celles provenant du Sud-Est.



a



b

Figure 20. a) Localisation des parcelles (carrés rouges) et des bassins versants (triangles bleus) étudiés, comprenant les deux bassins versants d'OMERE et b) contribution (en %) des différents types de temps au volume total de pluie, de ruissellement et d'érosion à l'exutoire de Roujan et Kamech. Les contributions relevant d'événements cycloniques sont indiquées mais non représentées car ne pouvant pas être rattachées à une direction clairement identifiable des masses d'air (figure tirée de [A38]).

Variabilité spatiale à l'échelle du bassin versant

La définition d'une stratégie de lutte anti-érosive efficace à l'échelle du bassin versant nécessite également de bien connaître les zones sources des sédiments et les processus érosifs dominants qui les mobilisent et les transportent depuis les sources jusqu'à l'exutoire.

Hiérarchie des sources et processus d'érosion responsables de l'envasement des retenues collinaires en Tunisie

Principales collaborations : INAT Tunis, Fac. Sciences Tunis, LSCE Gif-sur-Yvette, Bioemco Grignon

Principaux encadrements : **Thèse** Abir Ben Slimane ; **Master2** Mouna Tounsi

Plusieurs pays du Maghreb ont fait le choix de se tourner massivement vers la mobilisation des eaux de surface via la construction de barrages pour faire face à la très forte irrégularité du climat (*i.e.* longue sécheresse estivale) et au manque de ressource en eau souterraine. Cependant l'envasement de ces ouvrages peut conduire à des réductions rapides de leur capacité de stockage en eau (García-Ruiz et al., 2013 ; Sadaoui et al., 2018). La retenue de Kamech a par exemple perdu un tiers de sa capacité initiale de stockage entre son année de mise en eau en 1994 et 2013 [A33]. Comme on l'a déjà évoqué en introduction de ce volet, la littérature tend à rendre l'érosion ravinatoire responsable de l'envasement de ces ouvrages en contexte méditerranéen. Les fondements de cette conclusion sont pourtant fragiles car ils reposent bien souvent sur des extrapolations de mesures menées à une échelle locale, et/ou effectuées sur un nombre très limité d'événements. Or connaître la source des sédiments et les principaux processus érosifs impliqués dans les flux de sédiments est un enjeu majeur pour pouvoir orienter efficacement les mesures de gestion et sauvegarder la capacité de stockage des retenues (Valentin et al., 2005).

Afin de quantifier le rôle réel de l'érosion ravinatoire dans l'envasement d'une retenue, nous avons cherché à élaborer une méthode permettant de quantifier la contribution relative des processus d'érosion de surface et d'érosion ravinatoire, sans avoir besoin d'extrapoler des mesures ponctuelles dans le temps ou l'espace. Par érosion de surface, nous entendons les mécanismes d'érosion diffuse et d'érosion en rigoles, *i.e.* les mécanismes qui mobilisent les premiers centimètres du sol. Par érosion ravinatoire, nous entendons l'érosion concentrée qui mobilise quant à elle des horizons plus profonds du sol, moins riches en nutriments, à travers des mécanismes de sapement de berges, d'érosion des flancs et du fond des ravines, ...

La démarche de quantification a consisté à adapter, au contexte des retenues collinaires du Maghreb, une méthode de traçage des sources de sédiments qui consiste à retrouver les contributions des sources potentielles à partir d'un échantillon mixte issu d'un mélange des sources. L'approche, désagrégative puisque basée sur une « déconvolution du signal », s'appuie sur le choix de traceurs, *i.e.* de propriétés conservatrices permettant de différencier les différentes sources. Dans le contexte des retenues collinaires du Maghreb, l'échantillon mixte est recueilli grâce à des carottages effectués dans les sédiments piégés par la retenue collinaire (figure 21). Ces carottages présentent l'énorme avantage de donner accès à une archive des flux sédimentaires depuis la création de la retenue puisque le taux de piégeage dans ce type de retenue dépasse 90 % [A6 ; A33]. L'enjeu majeur a alors été d'identifier des traceurs permettant de différencier les deux sources de sédiments qui nous intéressent : sédiments provenant de la surface du sol et sédiments provenant du fond et des berges des ravines.

Après avoir testé plusieurs propriétés, nous avons montré [A19] que le Césium 137 et le carbone organique total constituaient des traceurs appropriés dans notre contexte d'étude. Grâce à ces traceurs, nous avons pu mettre en évidence que 80 % des sédiments piégés dans la retenue de Kamech provenait de l'horizon superficiel du bassin. En d'autres termes, l'érosion ravinatoire n'est responsable que de 20 % de l'érosion totale du bassin versant. Nous avons

profité de l'environnement fortement documenté de Kamech pour étudier l'impact du nombre et de l'emplacement des carottes sur le résultat de la méthode de traçage. Ceci nous a conduit à proposer des préconisations pour la mise en œuvre de cette méthode sur d'autres retenues situées au Maghreb, en prenant en compte le nombre d'affluents alimentant le plan d'eau pour guider le nombre et l'emplacement des carottes à analyser.

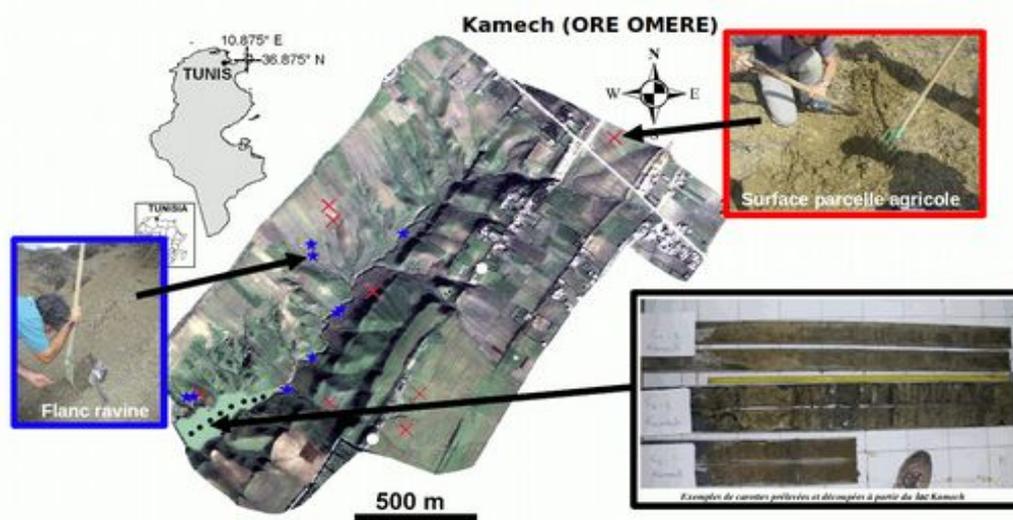


Figure 21. Illustration de la mise en œuvre de la méthode de traçage de sources de sédiments appliquée au bassin versant de Kamech à travers le prélèvement d'échantillons pour caractériser les sources potentielles de sédiments, et de carottes dans les dépôts de sédiments piégés par la retenue collinaire.

Si la méthode de traçage ne fournit que la contribution relative des processus d'érosion, son croisement avec le suivi quantitatif des flux totaux de sédiments entrant dans la retenue de Kamech a permis de quantifier l'intensité de chaque processus respectif : $12 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour l'érosion de surface et $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour l'érosion ravinaire. Le flux total de sédiments arrivant à la retenue sur la période 1994-2009 a quant à lui été évalué en sommant les sédiments piégés dans la retenue, mesurés grâce à des bathymétries, avec une estimation des flux exportés lors des déversements ou des ouvertures de la vanne de fond.

Nous avons ensuite lancé une nouvelle étude pour déterminer dans quelle mesure l'intensité relative des processus érosifs responsables de l'envasement des retenues dépendait du contexte du bassin versant alimentant cette retenue. Les objectifs de ce travail étaient : i) de vérifier la transposabilité de la méthode sur 4 autres petits bassins versants ($0,1\text{-}10 \text{ km}^2$) du Cap Bon ou de la Dorsale tunisienne ; ii) d'analyser la variabilité des contributions relatives et absolues de l'érosion de surface et de l'érosion ravinaire dans une diversité de contexte en Tunisie ; et iii) de voir si cette analyse comparative pouvait permettre d'identifier des facteurs utiles pour élaborer une stratégie de protection des retenues contre l'envasement. La mise à l'épreuve de la méthode de traçage sur des bassins versants (figure 22a) couvrant une large gamme de caractéristiques environnementales a confirmé la pertinence de l'approche de traçage basée sur le Césium 137 et le carbone organique total pour différencier l'érosion ravinaire et l'érosion de surface à partir des sédiments piégés dans les petites retenues d'Afrique du Nord [A25]. Les résultats obtenus sur les 5 bassins versants (figure 22b), issus de la méthode de traçage combinés à un suivi des flux d'érosion au niveau des retenues, ont mis en évidence un comportement médian du bassin de Kamech en matière de taux d'érosion, en même temps qu'une très large variabilité des processus responsables de l'envasement des barrages, même pour des bassins ayant des taux d'érosion très similaires (e.g. El Melah, Kamech et El Hnach). En effet, la contribution relative de l'érosion ravinaire fluctue entre 20 % et 67 % sur ces 3 bassins, et entre 20 % et 80 % si on considère les 5 bassins. Plus étonnant, l'érosion de surface s'avère être le processus dominant de l'envasement des retenues dans 3

des 5 bassins étudiés, ce qui amène à relativiser l'idée généralement véhiculée dans la littérature de la prédominance de l'érosion ravinienne en contexte méditerranéen.

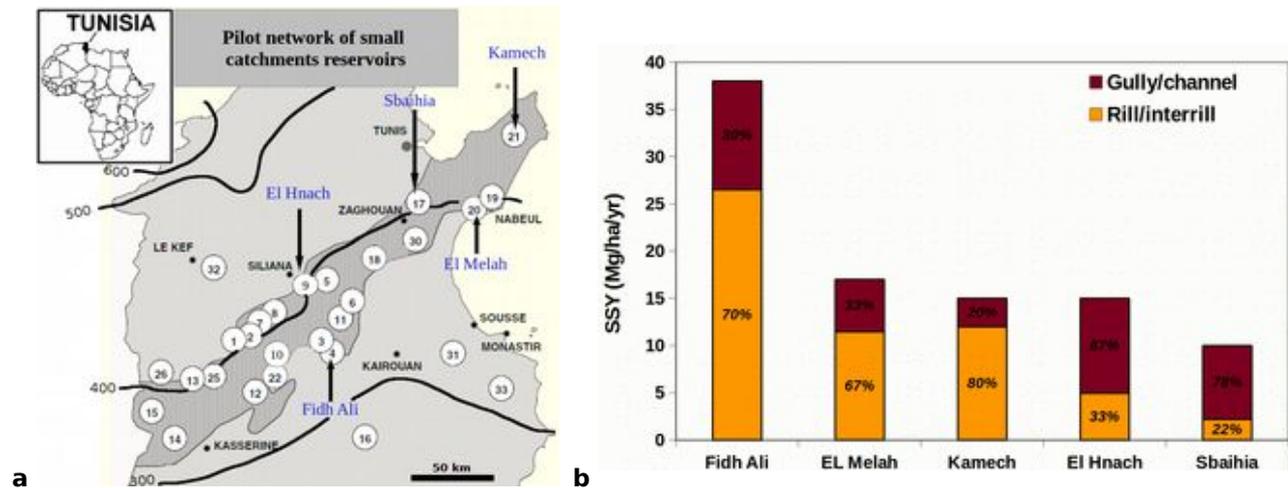


Figure 22. a) Localisation et b) contribution relatives et absolues des processus d'érosion de surface (rill/interrill) et ravinienne (gully/channel) à l'envasement des 5 retenues collinaires tunisiennes étudiées (figure tirée de [A25]).

Ce travail a par ailleurs permis d'identifier ou corroborer d'autres connaissances. À travers l'étude du bassin versant de Fidi Ali, il a par exemple confirmé la très forte sensibilité des sols gypseux à l'érosion, tant au niveau des processus d'érosion de surface que d'érosion ravinienne. Il a également montré que la proportion de surface du bassin versant couvert par des mesures de protection du sol est un facteur d'ordre 1 dans l'explication de la variabilité des taux d'érosion dans ce type d'environnement. Cependant, des interactions complexes entre les processus d'érosion de surface et les processus d'érosion ravinienne existent, puisque la baisse de la charge sédimentaire provenant des versants peut conduire à amplifier l'érosion concentrée dans les cours d'eau (García-Ruiz et al., 2017). Ainsi, il faut être très prudent dans le choix des mesures de conservation du sol à promouvoir, car certaines mesures visant à lutter contre l'érosion diffuse peuvent amplifier l'érosion ravinienne si toutefois elles n'associent par une réduction du ruissellement à la réduction du détachement du sol par l'impact des gouttes de pluie. Une protection efficace des retenues collinaires passe donc par une combinaison de techniques de conservation raisonnée à l'échelle du bassin versant. Elle doit probablement allier protection des sols agricoles (lutte contre le détachement du sol par impact des gouttes de pluie et lutte contre le ruissellement) et protection des ravines (mise en place de seuils par exemple).

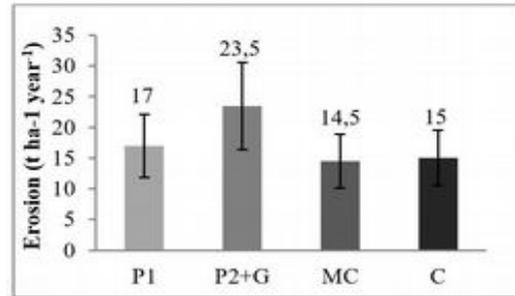
Rôle d'éléments clés du paysage sur l'efficacité du transfert de sédiments entre les zones sources et l'exutoire des bassins versants d'OMERE

Principales collaborations : INAT Tunis, INRGREF Tunis, Fac. Sciences Humaines et Sociales Tunis
 Principaux encadrements : **Thèse** Amira El Khalili ; **Post-doc** Nesrine Inoubli

Si la connaissance des sources de sédiments est importante pour identifier les processus responsables des flux d'érosion, la compréhension du transfert des sédiments des zones sources à l'exutoire des bassins versants est également fondamentale pour le choix de mesures CES appropriées. En permettant une comparaison directe des taux d'érosion sur la gamme d'échelles allant de l'hectare (échelle parcellaire) au km² (échelle du bassin versant élémentaire), le suivi pluriannuel des flux hydro-érosifs sur les dispositifs emboîtés de Kamech et Roujan constitue des dispositifs précieux pour quantifier l'impact d'éléments clés du paysage sur la connectivité hydro-sédimentaire.

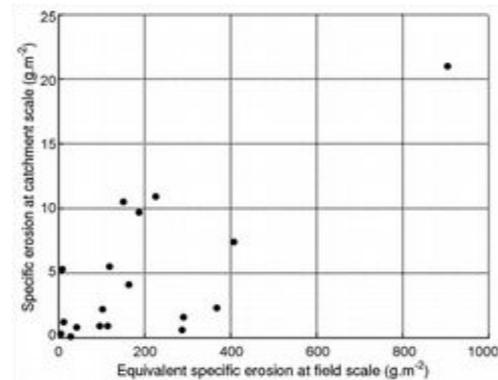
Sur le bassin de Kamech, l'analyse multi-échelle [A29] menée sur 7 années consécutives de suivi (2005-2012) a mis en exergue une faible dépendance des taux d'érosion à l'échelle spatiale considérée, que ce soit à l'échelle mensuelle (figure 16) ou annuelle (figure 23).

Figure 23. Analyse comparative des taux annuels d'érosion ($t\ ha^{-1}\ yr^{-1}$) mesurés à différentes échelles spatiales au sein du bassin versant de Kamech. Les taux d'érosion ont été établis sur 7 années consécutives de mesures de flux sur l'ensemble des stations (2005-2012) : Parcelle (P1), Ravine (P2+G), versant (MC) et exutoire (C) (figure tirée de [A29]).



Sur le bassin de Roujan, nous avons mené cette analyse multi-échelle [A10] sur une sélection de 18 événements de crues survenus entre 1995 et 1999, retenus pour couvrir une large gamme de conditions climatiques. Cette analyse a fait ressortir une diminution de l'érosion de 1 à 2 ordres de grandeur entre l'échelle parcellaire et l'échelle bassin versant (figure 24).

Figure 24. Analyse comparative de l'érosion spécifique ($g\ m^{-2}$) entre l'échelle parcellaire et l'échelle bassin versant à Roujan sur une sélection de 18 événements. Les valeurs à l'échelle du bassin versant sont issues de la mesure des flux à l'exutoire, alors que les valeurs à l'échelle parcellaire proviennent d'une combinaison linéaire des valeurs de flux mesurées à l'exutoire de la parcelle travaillée, et de la parcelle non travaillée, au prorata de la représentativité de chaque pratique au sein du bassin versant (figure tirée de [A10]).



Pour les deux bassins d'OMERE, nous constatons donc deux comportements très contrastés en matière d'efficacité du transfert de sédiments de la parcelle à l'exutoire du bassin versant : une très forte linéarité spatiale de la réponse hydro-érosive sur Kamech et une très forte non-linéarité spatiale sur Roujan. Cette différence de comportement a tout d'abord été corroborée par l'analyse des flux de ruissellement qui suivent la même tendance que les flux d'érosion : diminution du débit spécifique sur Roujan liée à des ré-infiltrations du ruissellement significatives pour les événements de crues de faible et moyenne intensité alors que le débit spécifique sur Kamech subit peu de changements de la parcelle à l'exutoire du bassin [A29]. Les observations de terrain sur les atterrissements de sédiments après les crues constituent une seconde forme de confirmation. Alors que très peu de zones d'atterrissement durable ne sont identifiées sur Kamech, les observations post-crues sur Roujan permettent de confirmer l'importance majeure des processus de dépôt au sein de ce bassin versant. En effet, d'importantes quantités de sédiments se retrouvent accumuler après des fortes crues au niveau du réseau de fossés, surtout dans les tronçons les plus plats à l'approche de l'exutoire (figure 25a) et au droit d'ouvrages ponctuels comme des passages busés (figure 25b). Ces dépôts nécessitent des curages fréquents (typiquement tous les ans) des tronçons de fossés pour restituer leur capacité hydraulique d'origine. Les dépôts se retrouvent aussi au sein même des parcelles de la dépression aval du bassin (figure 25c) et au niveau des interfaces entre parcelles lorsque celles-ci sont couvertes de végétation naturelle qui fait barrage à l'écoulement et/ou en zone de replat du fait d'un adoucissement de la pente (figure 25d, amont immédiat d'un mur de terrasse).



Figure 25. Illustration des nombreux dépôts sur le bassin de Roujan après une crue importante : a) fossé situé dans la zone basse de Roujan comblé avec environ 80 cm de sédiments ; b) passage busé sous chemin bouché par les sédiments déposés ; c) dépôt, au sein d'une parcelle de vigne, de sédiments provenant de parcelles amont plus pentues ; d) dépôt, en bas d'une parcelle de vigne, favorisé par la présence de végétation naturelle au niveau d'une zone située en amont immédiat d'un mur de terrassement. Photographies de D. Raclot (09/12/2014).

Des différences en lien avec la géomorphologie, le réseau hydrographique ou les éléments d'interface entre parcelles, sont susceptibles d'expliquer la disparité de comportement en matière d'efficacité du transfert de sédiments de la parcelle à l'exutoire que l'on peut observer entre les deux bassins d'OMERE. Ces différences, d'origine naturelle et/ou anthropique, reposent essentiellement sur des éléments de caractérisation de la connectivité hydro-sédimentaire d'un bassin versant dont les effets en matière d'efficacité du transfert des flux de sédiments restent à approfondir.

C'est ce que nous avons commencé à faire en cherchant à préciser le rôle effectivement joué par les ravines sur le bassin versant de Kamech. Nous avons commencé par caractériser l'intensité de l'érosion ravinatoire à l'échelle d'une ravine de Kamech, choisie pour être représentative de la majorité des ravines de Kamech [A20]. Cette caractérisation a été menée grâce à un suivi régulier (annuel ou bisannuel) de l'évolution morphologique interne de la ravine (longueur 110 m, surface 0.17 ha) à l'aide d'un tachéomètre LEICA. L'analyse de l'évolution de la morphologie de la ravine entre 2002 et 2009 fait apparaître une hétérogénéité des taux d'érosion à l'intérieur de la ravine avec des ablations plus marquées sur les secteurs à forte pente et sans végétation. Le bilan réalisé sur la période 2002-2009 a quantifié à 6,1 mm/an le taux moyen de dénudation de la ravine, soit environ 80 t/ha/an avec l'hypothèse d'une densité apparente de 1,3 (Figure 26). Si l'on compare ce taux à celui de la parcelle expérimentale (*i.e.* 17 t/ha/an), on constate qu'un m² de ravine produit localement 5 fois plus de sédiments qu'un m² dans la parcelle cultivée. On retrouve bien ici les germes de l'idée très répandue de la prédominance de l'érosion ravinatoire sur l'érosion diffuse.

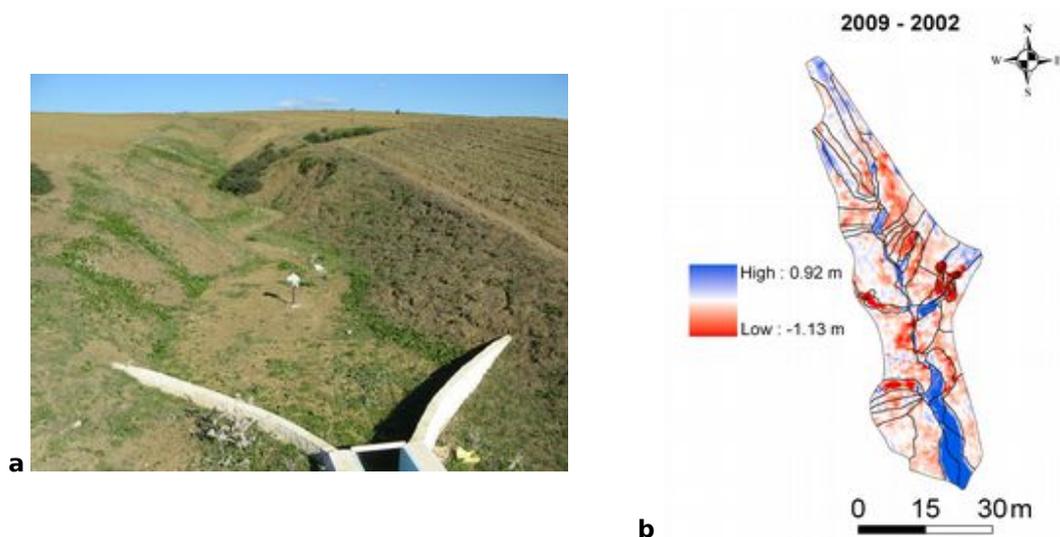


Figure 26. a) Cliché photographique (11/2006) et b) évolution morphologique d'une ravine permanente sur Kamech entre 2002 et 2009. Les valeurs positives représentées en bleu correspondent à des accumulations ; les valeurs en rouge à des dénudations (figures tirées de [A20]). Nb : le large dépôt à l'aval de la ravine, résultat de la mise en place de la station hydrométrique, n'a pas été pris en compte dans le calcul du taux de dénudation.

Cependant, il suffit de déployer une simple approche agrégative qui combine de façon linéaire les taux d'érosion de ces deux sources de sédiments, au prorata de leur surface respective, pour se rendre compte que la production de sédiments au sein des parcelles cultivées devient vite majoritaire dès que l'on considère une surface contributive de quelques hectares (figure 27b). En effet ce modèle linéaire simple permet de prédire relativement bien les taux d'érosion moyens observés aux différentes stations emboîtées de Kamech (figure 27a). Certes l'érosion ravinaire produit plus de sédiments localement, mais comme les surfaces en ravines sont bien plus faibles que celles des parcelles agricoles (rapport de 1 à 15 à l'échelle du bassin versant) c'est bien l'érosion au sein des parcelles cultivées qui alimente majoritairement les flux érosifs au niveau des différentes stations du bassin, avec une contribution évaluée par ce modèle à 75 % à l'exutoire, au niveau de la retenue collinaire.

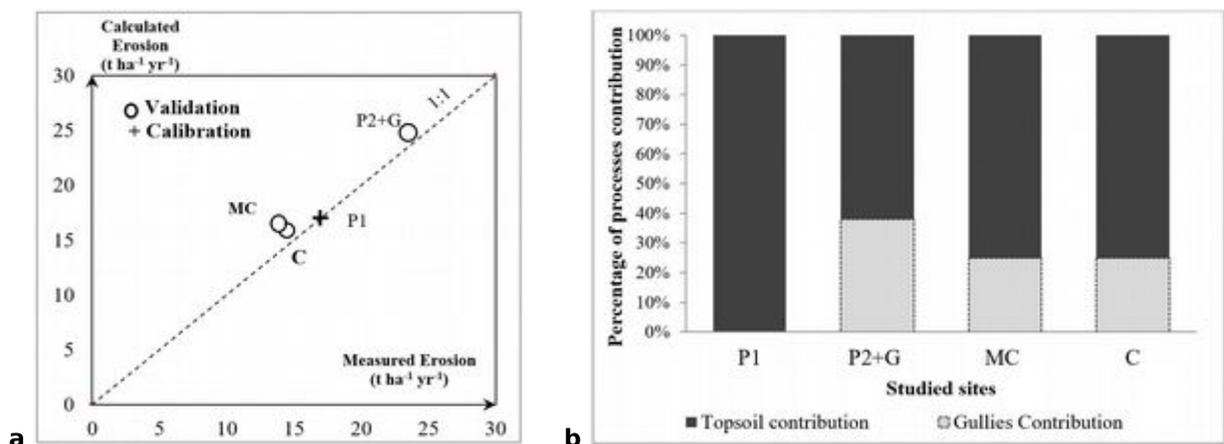


Figure 27. a) Confrontation entre les valeurs prédites par un modèle linéaire simple et les taux d'érosion mesurés au niveau des 4 stations hydrométriques de Kamech et b) contribution relative de chaque source de sédiments dérivée de ce modèle linéaire (P1 : station parcelle, P2+G : station ravine ; MC : station versant et C : station bassin versant, figures tirées de [A29]).

Pour conforter ces résultats et aller plus loin dans notre compréhension du rôle des ravines, nous avons analysé l'évolution du réseau de ravines entre 1962 et 2012 à l'échelle de l'ensemble du bassin versant et procédé à un calcul de l'évolution morphologique de l'ensemble des ravines sur 50 ans.

Cette analyse diachronique a été menée par photo-interprétation (figure 28), et a été complétée par des levés terrain réalisés en 2012 sur près de 70 % du réseau de ravines de Kamech [A33]. Elle a permis de montrer une diminution de la longueur du réseau de ravines, ainsi que l'apparition de zones de végétation permanentes au sein de certaines ravines. Ces éléments plaident pour un léger recul de l'activité de l'érosion ravinatoire au cours des 50 dernières années, qui ne sera pas sans répercussion sur le niveau de connectivité hydro-sédimentaire si toutefois ce phénomène se poursuit. Malheureusement, nous n'avons pas été en capacité d'identifier un facteur explicatif de cette tendance. Finalement, la comparaison de l'évolution morphologique des ravines avec le volume de sédiments arrivés dans le lac depuis sa mise en eau confirme que la contribution de l'érosion ravinatoire ne peut pas dépasser 30 %.

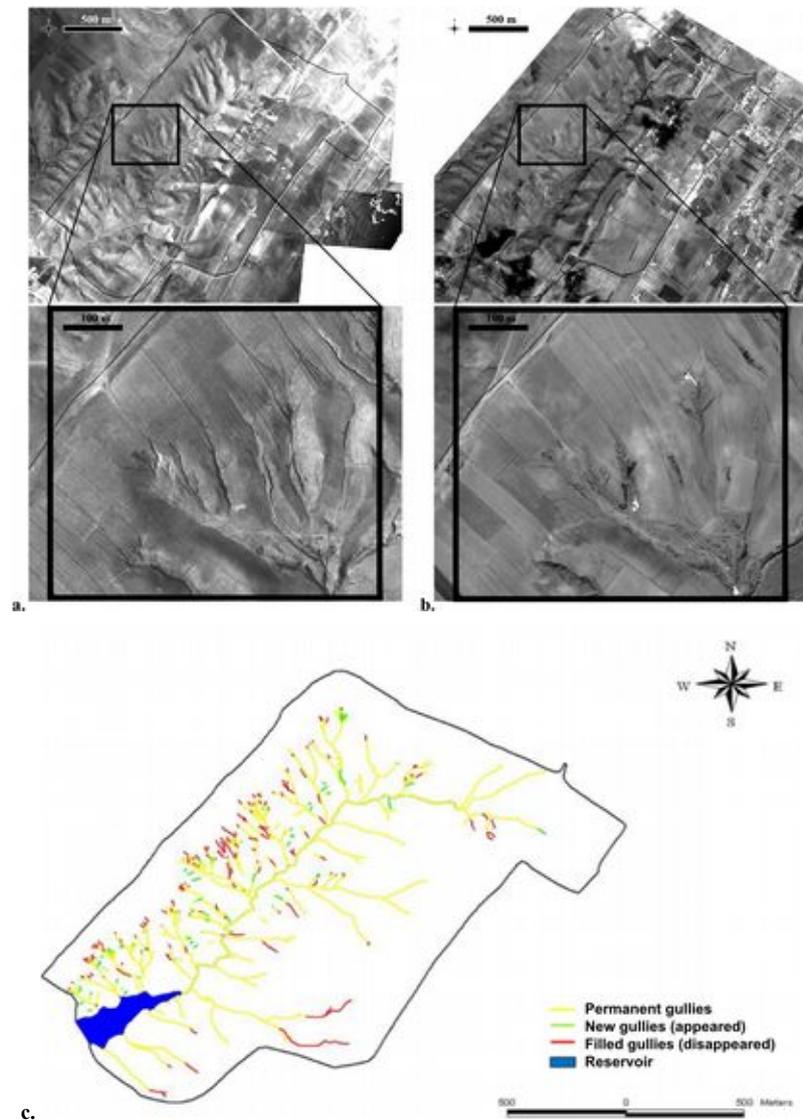


Figure 28. a) Orthophotographie de 1962 et b) image WorldView de 2012 utilisées pour l'analyse diachronique du réseau de ravines entre 1962 et 2012 ; et c) évolution du réseau de ravines entre ces deux dates (figures tirées de [A33]).

Tous ces résultats viennent conforter les conclusions tirées de la méthode de traçage sur le fonctionnement hydro-érosif du bassin versant de Kamech, à savoir :

- une nette prédominance de l'érosion de surface sur l'érosion ravinatoire, malgré le fait qu'un mètre carré de ravine permanente produit environ 5 fois plus de sédiments qu'un mètre carré de terres cultivées.
- une très forte linéarité de la réponse hydro-érosive en fonction de l'échelle spatiale, reflet d'une connectivité hydro-sédimentaire très élevée ;
- une légère tendance au recul de l'activité de l'érosion ravinatoire qui pourrait, à terme, contribuer à diminuer la très forte connectivité hydro-sédimentaire actuellement observée sur ce bassin.

Bien que très nombreuses à Kamech, les ravines permanentes ne représentent qu'une source minoritaire de production des sédiments (*i.e.* environ 20%) arrivant à l'exutoire du bassin versant de Kamech. Les ravines y jouent par contre un rôle fondamental dans l'efficacité du transfert de sédiments depuis la source (*i.e.* principalement les parcelles cultivées pour Kamech) jusqu'à la retenue (*i.e.* exutoire du bassin).

Bilan du volet 2

Ce deuxième volet s'est principalement attaché à révéler les liens entre le comportement hydro-érosif d'un bassin versant et son contexte environnemental et humain. Il a permis :

- de caractériser la très forte variabilité des réponses hydro-érosives au sein des bassins versants méditerranéens, avec l'existence de fortes non-linéarités de cette réponse en fonction de la surface contributive (*i.e.* non-linéarité spatiale) et/ou du forçage climatique (*i.e.* non-linéarité temporelle) ;
- d'identifier et hiérarchiser, pour une diversité de contextes, les processus et facteurs, naturels ou anthropiques, pilotant la réponse hydro-érosive sur une large gamme d'échelles spatiales (*i.e.* de la parcelle au bassin versant) et temporelles (*i.e.* de l'événement à la pluridécennie) ;
- de caractériser le rôle d'éléments singuliers constitutifs du paysage (*e.g.* fossés, ravines, bandes enherbées...) intervenant dans la connectivité hydro-sédimentaire et pouvant être mobilisés dans des plans de gestion des bassins versants.

Ainsi, nos travaux ont tout d'abord amené à **confirmer le rôle majeur i) des états de surface**, induits dans nos cas d'étude par les occupations des sols et les itinéraires techniques ; et ii) **des événements extrêmes** qui sont à l'origine de la majorité des flux de sédiments arrivant à l'exutoire des bassins versants.

De façon plus originale, nos résultats ont également conduit à **revisiter et/ou préciser plusieurs autres grands traits de comportement** identifiés pour le contexte méditerranéen (cf. introduction du volet 2).

En effet, nos travaux sur les deux bassins de l'observatoire OMERE **ne confirment pas une croissance des taux d'érosion spécifiques** telle que formulée par de Vente and Poesen (2005) et reproduite en figure 28, puisque ces taux sont stables de la parcelle (environ 10^{-2} km²) à l'exutoire (environ 1 km²) sur Kamech et décroissants entre ces deux entités sur Roujan. Le changement d'échelles spatiales semble plus complexe que ce que la schématisation de la figure 28 laisse supposer.

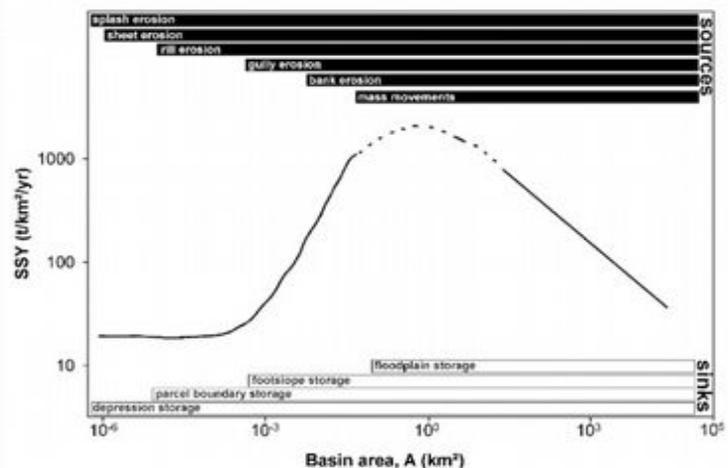


Figure 28. Modèle conceptuel qui illustre comment les taux spécifiques d'exportation de sédiments sont censés évoluer en fonction de l'échelle spatiale dans le contexte méditerranéen (tiré de de Vente & Poesen, 2005).

Le travail mené sur plusieurs bassins versants tunisiens **ne confirment pas non plus le rôle prédominant de l'érosion ravinatoire** comme processus de mobilisation des sédiments à l'échelle du bassin versant : l'érosion de surface fournit en effet la majorité des sédiments dans plus de la moitié des bassins versants étudiés. Les ravines jouent néanmoins un rôle déterminant dans les flux de sédiments à l'exutoire des bassins versants méditerranéens, car elles forment des éléments de connectivité favorisant le transfert de l'eau et des sédiments. Nous avons montré que le poids de ces deux rôles joués par les ravines, *i.e.* source et éléments de connectivité, variait fortement selon le contexte du bassin étudié : si la mobilisation des sédiments au sein des ravines est sans doute importante lors des phases de forts développements de celles-ci, elle l'est beaucoup moins pour les ravines permanentes.

De façon plus transversale, nos travaux ont **mis en exergue la très forte variabilité du régime des flux hydro-érosifs** en matière d'intensité, de saisonnalité et de fréquence d'occurrence des événements majeurs sur le pourtour méditerranéen. Le forçage climatique, à travers le régime de pluie, se révèle logiquement le moteur de premier ordre de cette dynamique saisonnière. Cependant divers facteurs strictement liés au contexte d'étude peuvent fortement complexifier ce lien : perturbations humaines exceptionnelles (e.g. plantation de cultures pérennes), présence de facteurs naturels fortement évolutifs (e.g. fentes de retrait) ou d'éléments pilotant la connectivité hydro-sédimentaire (e.g. bandes végétalisées, ravines), provenance des masses d'air...

Les avancées cognitives présentées dans ce volet 2 sont le fruit d'importants efforts de développement exposés dans le volet 1 en matière de dispositifs, méthodes et outils de caractérisation des facteurs et manifestations de la réponse hydro-érosive des bassins versants méditerranéens. Si l'approche réductionniste a pu être mise en place à l'échelle de la parcelle (e.g. analyse comparative de parcelles jumelles sur Roujan), les approches holistiques de type downward (Sivapalan et al., 2003), basées sur des dispositifs emboîtés ou sur des approches comparatives de dispositifs d'observation « mis en réseau » (i.e. méta-analyses), deviennent d'autant plus incontournables que l'on s'intéresse à l'échelle du bassin versant. En effet, la condition « toute chose étant égale par ailleurs », permettant d'isoler un seul facteur de variation, est de plus en plus difficile à assurer lorsque la surface du domaine considéré s'accroît. La pertinence de l'approche downward repose toutefois sur la capacité à éviter/corriger un éventuel biais lié à la possible concentration des observations sur des configurations qui présentent des problèmes d'érosion (Vanmaercke et al., 2014). Elle repose également sur la capacité à réunir un nombre de configurations d'observations variées nettement supérieur au nombre de facteurs et processus en jeu. Étant donné la lourdeur à mener des observations classiques de chroniques des flux hydro-érosifs sur le long-terme, les **approches alternatives** permettant de fournir une information intégrée, dans le temps et/ou dans l'espace, de l'intensité des processus érosifs (e.g. déchaussement des pieds de vigne, traçage à partir des sédiments piégés dans les retenues collinaires, analyses multi-date du ravinement) offrent un fort potentiel **pour démultiplier les configurations d'observations**. En tant que véritables laboratoires à ciel ouvert, les dispositifs de type « observatoire » jouent un rôle central pour la mise au point ou la mise à l'épreuve de ce type d'approche alternative.

Synthèse du volet 2

Le deuxième volet de ce mémoire a synthétisé les avancées cognitives en matière de compréhension des facteurs et processus expliquant la genèse des flux hydro-érosifs sur une large gamme d'échelles de temps (de l'événement à la pluri-décennie) et d'espace (de la parcelle au bassin versant). Ces connaissances se sont largement appuyées sur les développements méthodologiques élaborés dans le volet 1, enrichis de quelques approches alternatives permettant une caractérisation rapide et intégrée du comportement hydro-érosif. Les développements méthodologiques ont bénéficié en retour de ces avancées cognitives, par exemple en ce qui concerne le choix des stratégies d'observation, les implémentations du modèle MHYDAS_Erosion ou les méthodes de mise en œuvre de modèles distribués.

Ces avancées cognitives ont été réalisées principalement au cours de 3 thèses et deux stages de post-doctorat. Elles ont donné lieu à la publication de 12 articles référencés WOK.

À l'issue de ce bilan, les lacunes en connaissances sur les facteurs et processus contrôlant la réponse hydro-érosive des bassins versants sont encore multiples. Le recours à des approches alternatives d'observation (e.g. traçage, suivi par capteurs intégrateurs, recours à des proxys...), à même de soulager et compléter le suivi « classique » des flux de ruissellement et d'érosion, me semble être une voie prioritaire à creuser pour continuer à nourrir ce volet cognitif.

Volet 3. Quelques exemples d'appui à la gestion des bassins versants

Introduction

S'il existe, dans la littérature, des inventaires des principales mesures CES à disposition des gestionnaires avec leur impacts associés (e.g. Morgan, 2005), il existe un besoin important de raisonner ces leviers d'atténuation de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants (i.e. choix des mesures et organisation spatiale de leur combinaison). Dans un contexte où l'expérimentation est rarement possible à l'échelle du bassin versant, la préconisation de plans d'actions à l'échelle d'un territoire passe par le développement d'outils et méthodes d'aide à la décision permettant des évaluations des impacts tant au niveau local (i.e. impacts « *on-site* ») que global (i.e. impacts « *off-site* ») de ces plans.

Le recours à des modèles cartographiques d'évaluation des risques d'érosion peut être utile pour cibler les situations les plus critiques où il faut intervenir préférentiellement. À l'image du modèle PESERA (Kirkby et al, 2008), ces modèles visent à produire des cartes couvrant de grandes zones à partir de la combinaison experte de couches d'informations spatialisées. Ils sont surtout utiles dans des contextes où il n'existe pas ou peu de références expérimentales. Dans le projet MESOEROS21 notamment, j'ai participé à la mise en œuvre et à l'analyse de sensibilité de tels modèles, sur des bassins versants de plusieurs centaines de km², et sur l'ensemble du pourtour méditerranéen [A15 ; O3]. Cependant, ces modèles sont limités dans leur capacité à rendre compte d'actions de gestion impliquant des discontinuités temporelles (e.g. modification des itinéraires techniques, apparition d'événements extrêmes, seuil lié à la surverse de banquettes anti-érosives). De plus, les évaluations qu'ils fournissent ont une signification multi-locale uniquement, ce qui limite fortement leur intérêt pour évaluer les impacts « *off-site* » de l'érosion.

Par construction, la modélisation distribuée permet, a contrario, d'évaluer l'impact dynamique et spatialisé d'actions de gestion. Par sa capacité à expérimenter numériquement de multiples configurations de mesures CES sous des conditions environnementales actuelles ou futures, elle est l'outil de prédilection pour aider à la définition de politiques plus actives d'aménagement de l'espace. Elle n'offre cependant que des garanties partielles en matière d'opérationnalité pour de multiples raisons : i) l'étape de paramétrisation est généralement très coûteuse ; ii) une étape de calage nécessitant de nombreuses données observées est souvent nécessaire ; iii) la technicité requise pour leur mise en œuvre est généralement élevée ; iv) son utilisation devrait se limiter à des configurations rentrant dans son champ de calage/validation initial...

Une approche alternative consiste à dresser un retour d'expérience des nombreux plans d'aménagement qui ont été appliqués sur le terrain dans le passé. La principale difficulté réside dans le fait que ces plans de gestion ont rarement fait l'objet d'un suivi quantitatif. Le défi méthodologique est alors de reconstruire les conditions d'une analyse rétrospective qui permette de juger de l'efficacité des mesures CES qui ont été testées.

Les exemples présentés dans ce troisième volet montrent comment l'articulation des avancées cognitives et méthodologiques des deux premiers volets appuient une gestion anti-érosive des bassins versants. Les deux premiers exemples ont pour objectif de quantifier l'impact de changements d'utilisation du sol sous des hypothèses de fonctionnement exprimées par une modélisation distribuée. Il s'agit donc d'explorations numériques. Le dernier exemple expose une évaluation de l'efficacité de mesures CES visant à lutter contre le ravinement via une analyse rétrospective en conditions réelles. À travers ce retour d'expérience, il s'agit cette fois-ci de démontrer et de quantifier l'existence de l'impact d'une mesure CES.

Impact du nombre et de la localisation de bandes enherbées

Principales collaborations : Univ. Laval & INRS-ETE (Quebec)

Principaux encadrements : **Thèse** Silvio Gumiere

De nombreuses mesures CES peuvent être mobilisées dans les stratégies de lutte anti-érosive au sein des bassins versants. Il est reconnu que la distribution spatiale de ces mesures au sein d'un bassin versant peut avoir un fort impact sur l'efficacité de la stratégie de lutte [Fryirs et al., 2007]. Étant donné le nombre très important de configurations spatiales à tester, le recours à l'expérimentation en conditions réelles est peu envisageable pour analyser le degré de modulation qu'offre une modification de l'allocation des mesures CES au sein du bassin versant. Face à cette difficulté, nous avons développé une méthode [A23] qui permet d'explorer numériquement l'impact de la distribution spatiale de mesures anti-érosives sur les sorties d'un modèle de fonctionnement. La démarche a consisté à proposer un modèle de simulation stochastique des allocations des aménagements au sein du bassin versant et de l'implémenter en couplage avec une procédure d'analyse de sensibilité. Ce modèle est basé sur les 2 paramètres de contrôle suivants : la densité d'aménagements sur les emplacements potentiels qui contrôle le nombre total d'aménagements (paramètre r), et un paramètre de répartition préférentielle amont ou aval des aménagements (paramètre p). Une analyse de sensibilité globale du modèle de fonctionnement, basée sur de nombreux tirages aléatoires des paramètres p et r , permet dès lors d'explorer le rôle respectif de chaque facteur sur les sorties du modèle [Saltelli, 2009, 2010].

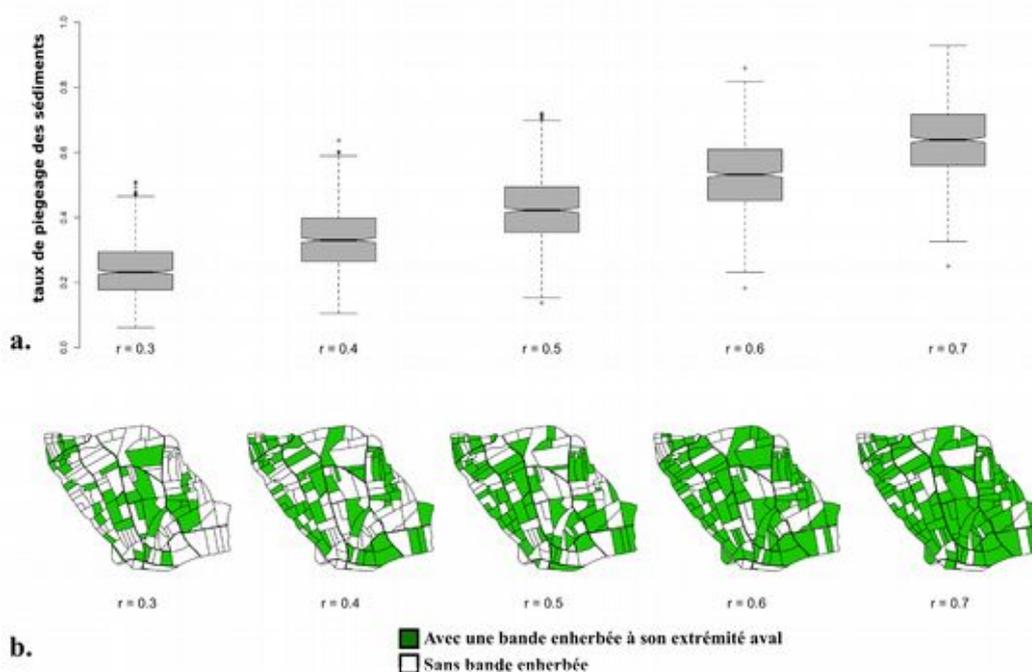


Figure 29. Illustration, pour cinq densités d'aménagement différentes (paramètre r), de : a) l'évolution du taux de piégeage en sédiments à l'exutoire du bassin versant de Roujan, et b) de la configuration spatiale maximisant le taux de piégeage (figure adaptée de [A23]).

La mise en œuvre de cette démarche a permis d'évaluer, sur le bassin versant de Roujan, l'impact de la distribution spatiale de bandes enherbées sur la réduction des flux hydro-érosifs à trois niveaux d'emboîtement du bassin versant. Elle a été facilitée par la remobilisation du développement du module de connectivité de MHYDAS_Erosion [A14] et du travail de calage/validation multi-échelle de ce modèle sur Roujan [B10]. De multiples évaluations des pertes en sol pour 800 tirages aléatoires de r et p ont été testées pour une averse de 4 heures à 60 mm h^{-1} . L'analyse de sensibilité associée à cette expérience numérique montre que le nombre d'aménagements (r) est le paramètre de premier ordre sur les trois niveaux d'échelle

considérés, expliquant environ 70 % de la variance des flux d'érosion. Cependant, pour un nombre d'aménagements donné (valeur de r), les boîtes à moustache de la figure 29a montrent la modulation du taux de piégeage des sédiments qu'offre la disposition spatiale des aménagements. Parmi les configurations testées, il est dès lors possible d'identifier une configuration optimale qui, pour un nombre donné d'aménagements, maximise le piégeage des sédiments (figure 29b). Dans ce cas, la connectivité sédimentaire est minimale.

Impact de plans de gestion dans un contexte de changement climatique

Principales collaborations : CSIC Barcelone, INRGREF & INRAT Tunis, IAV Rabat, Univ. Aveiro & Lisbonne, Univ.

Catane, BRGM Montpellier et Orléans, AgroClim Avignon, INRA sciences du sol Orléans, CLIFA Montpellier

Principaux encadrements : **Post-docs** Amandine Pastor & Anna smetanova & Rossano Ciampalini ; **Thèse** Fatiha Choukri & **Master2** Marien Laurene

Afin de quantifier l'effet du changement global (*i.e.* climat et utilisation du sol) sur les ressources en eau et en sol dans les décennies à venir, les travaux prospectifs s'appuyant sur ces modèles numériques hydrologiques distribués se sont progressivement développés depuis les années 1990 (Li & Fang, 2016). Comme pour toute démarche prospective, ces travaux de modélisation sont basés sur de nombreuses hypothèses qui vont se traduire par de fortes incertitudes sur les résultats obtenus (Ludwig & Roson, 2016) en lien avec : les projections climatiques ; les scénarios socio-économiques ; la disponibilité et la qualité des données ; les lacunes de connaissances sur les interactions entre processus érosifs et plus globalement entre climat, végétation, sol et hydrologie ; le retard d'intégration de ces connaissances dans les modèles d'impact... Conscient de ces limites, mais aussi conscient de la nécessité de répondre à une demande sociétale de plus en plus pressante pour appuyer des démarches d'atténuation/adaptation de l'impact des changements en cours, nous avons contribué au développement et au test d'un cadre conceptuel, le plus cohérent possible avec les connaissances et outils disponibles, pour explorer les impacts de changements possibles du climat et/ou de l'utilisation du sol sur la ressource en eau et en sol. Dans nos applications, un changement d'utilisation du sol correspond à un changement d'occupation du sol et/ou à l'implantation de mesures de protection du sol, élément plus original par rapport à ce qui se fait couramment dans les autres études d'impact environnementales du changement global.

Notre démarche consiste à simuler, avec des modèles hydro-érosifs préalablement validés sur un site donné, des scénarios de changement du climat et/ou d'utilisation des sols établis par ailleurs de façon plus ou moins indépendante. Malheureusement très peu de scénarios peuvent être simulés. En effet l'exercice de simulation avec des modèles fortement distribués reste très lourd en temps de calcul et d'implémentation, et ceci malgré les nombreux progrès dans ce domaine. Par ailleurs, nous sommes confrontés à une difficulté majeure : prédire les changements d'usage des sols à l'horizon des quelques décennies dépendant de critères socio-économiques (*e.g.* aides et prix de vente des cultures liés aux marchés nationaux et internationaux) dont les évolutions sont difficiles à anticiper (Nearing et al., 2004). Le choix de scénarios clés contrastés est dès lors fondamental si l'on veut explorer une large gamme des évolutions possibles du ruissellement et de l'érosion des sols dans le futur. Toute cette démarche repose sur l'hypothèse forte que les modèles restent valides pour les conditions testées de changement.

Tout en s'inscrivant dans cette démarche assez commune, nous avons tenu à ce que le plan d'expérimentation numérique intègre la simulation de toutes les combinaisons possibles entre la situation actuelle et les situations futures du climat et de l'utilisation du sol. Ainsi, nous serons en mesure de différencier les impacts isolés et combinés de l'évolution de ces deux facteurs. Certaines applications y ajoutent un autre volet plus spécifique comme le test de l'impact d'un événement extrême ou la modification de l'occurrence de feux. Les trajectoires clés d'évolution de l'utilisation du sol ont été élaborées en croisant des critères de production

économique (e.g. production agricole) et de protection de l'environnement. Dans le projet MASCC par exemple, quatre trajectoires ont été implémentées sous forme de paramètres d'entrée des modèles de simulation : i) un scénario tendanciel ; ii) un scénario d'intensification de la production ; iii) un scénario de protection très forte de l'environnement ; iv) un scénario intermédiaire tentant un compromis entre production et préservation de l'environnement. Ces scénarios narratifs ont été construits sur la base d'enquêtes auprès d'experts et de gestionnaires afin de traduire au mieux les contraintes locales associées à chaque site d'étude. Chacun d'entre eux contient une projection des pourcentages d'occupation du sol, le choix et le nombre de mesures CES à implémenter, ainsi que des règles de transition et d'allocation spatiales permettant de traduire ces éléments narratifs en cartes et paramètres d'entrée pour le modèle d'impact. La spatialisation est réalisée à l'aide d'outils existants (e.g. CLU-S pour Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent model, Verbug et al., 2002) et/ou de procédures développées en interne, notamment pour la spatialisation des infrastructures de protection des sols.

L'élaboration de données climatiques d'entrée des modèles hydro-érosifs constitue un problème délicat pour la communauté travaillant sur l'impact du changement global sur les processus érosifs. En effet si des projections produites par des modèles climatiques régionaux (e.g. ALADIN de Météo France) sont disponibles via des plateformes comme Medcordex.eu pour les scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre établis par le GIEC (i.e. les RCP pour Representative Concentration Pathway), ces modèles climatiques ne peuvent simuler la pluie que sur des pixels de plus de 100 km² et des incréments de temps de plusieurs heures (typiquement la journée). Or la modélisation de l'érosion hydrique appliquée à des bassins de petite ou moyenne taille en contexte méditerranéen nécessite des données pluviométriques finement localisées, avec des pas de temps souvent infra-horaires du fait de l'importance des pluies de fortes intensités et de courte durée dans le régime climatique méditerranéen. C'est pourquoi nous avons proposé d'appliquer une descente d'échelle temporelle à la chronique de pluie issue des modèles climatiques ayant préalablement subie une réduction statistique des biais par une approche classique de type quantile-mapping. La descente d'échelle temporelle retenue s'appuie sur une recherche d'analogues entre la série débiaisée et les séries observées de pluie. Le degré d'analogie s'appuie sur un critère combinant la quantité de pluie, la saison et le nombre de jours de la séquence de pluie. Les chroniques de pluies futures à pas de temps infra-horaire ainsi constituées auront donc toujours une dynamique temporelle déjà réalisée par le passé. En cas d'analogie éloigné (courant pour les pluies fortes et extrêmes car correspondant à des phénomènes plus rares), un tirage aléatoire est réalisé parmi les analogues les plus proches, de façon à ce que le même analogue ne soit systématiquement retenu. Une compensation des intensités de pluie est alors effectuée de façon à respecter le cumul de pluie.

Les développements et mises en œuvre de ce cadre conceptuel se sont fortement appuyés sur nos acquis en matière de développement/utilisation de modèles numériques distribués de l'érosion, notamment le calage et la validation multi-échelle poussée de ces modèles sur différents sites grâce à des dispositifs d'observations long-terme (cf. figure 11 p 37). Ils se sont d'abord faits lors de travaux visant à analyser les impacts du changement global sur les taux d'érosion et la durabilité des sols à la fin du 21^{ème} siècle sur un bassin viticole du Sud de la France : le bassin versant de la Payne, 75 km² [A24] (projet ANR MESOEROS21). Nous avons testé les quatre scénarios de changements d'utilisation du sol suivants : un désherbage chimique de l'inter-rang (Accentuation) ; une augmentation des terres agricoles au détriment des forêts (Production) ; une augmentation de l'enherbement permanent pour l'inter-rang (Protection) ; une protection systématique réglementaire des sols (Environmental law). La figure 30 illustre les cartes d'érosion produites avec le climat actuel et avec un climat simulé pour la fin du 21^{ème} siècle, ainsi que la combinaison des taux d'érosion avec une carte de

profondeur des sols afin de calculer l'espérance de vie des sols. Les résultats mettent en évidence : i) une faible durabilité des sols sur ce bassin, avec une durée de vie médiane de 273 ans dans les conditions actuelles ; ii) un impact des changements d'utilisation des sols testés plus fort que celui induit par le changement climatique ; iii) l'efficacité d'une trajectoire de gestion agro-écologique basée sur un couvert herbacé permanent des inter-rangs pour améliorer significativement la durabilité des sols dans ce bassin.

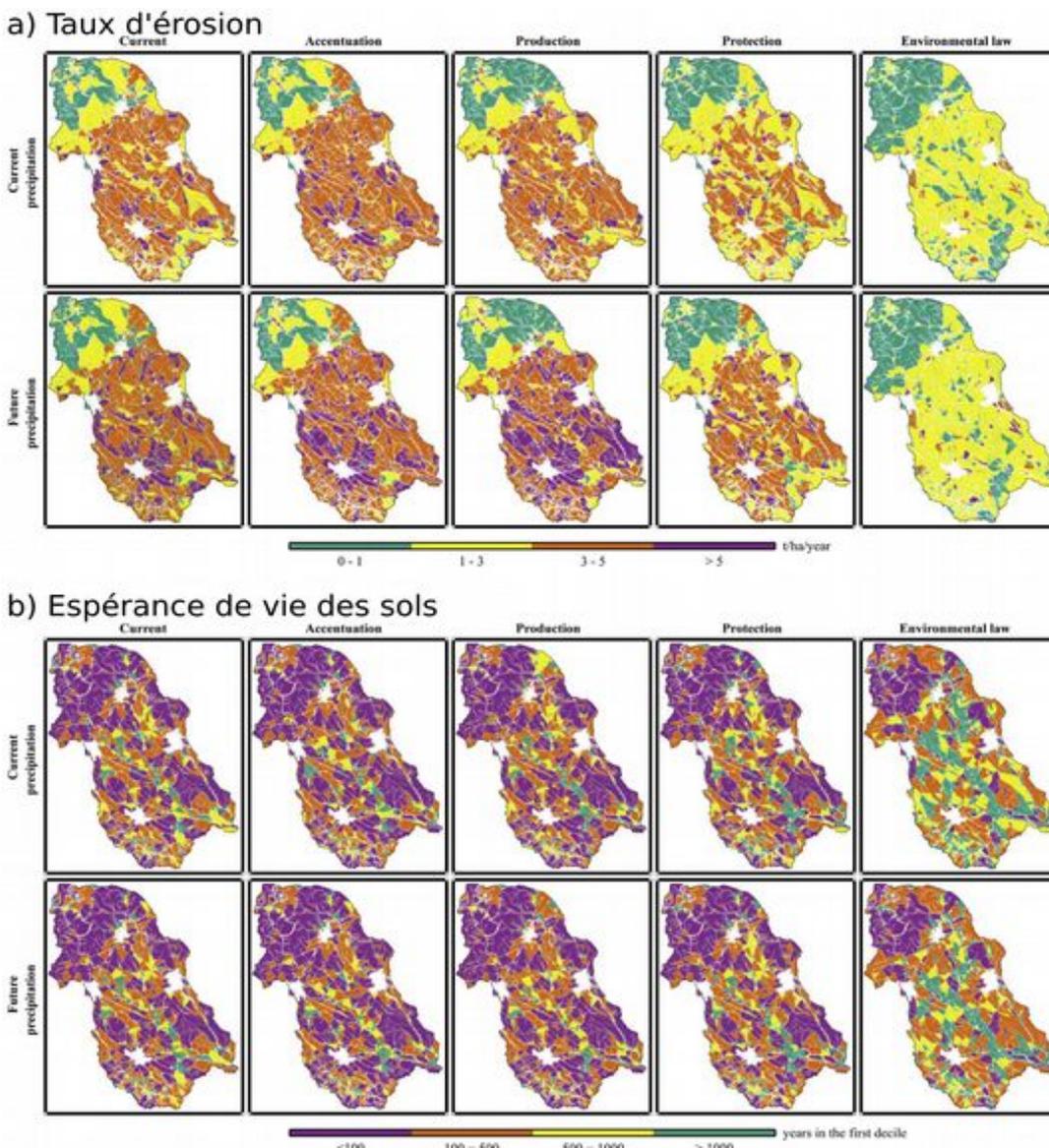


Figure 30. Cartographie des résultats des simulations de l'impact de scénarios de changement d'utilisation du sol sur le bassin de la Peyne pour le climat actuel et un climat simulé de la fin du 21^{ème} siècle (figure adaptée de [A24]).

Ces développements se sont poursuivis dans le cadre du projet Arimnet2 MASCC pour couvrir une diversité d'agrosystèmes du pourtour de la Méditerranée : polyculture/élevage en zone de relief collinaire, système viticole, système sylvicole, secteur en déprise agricole et prairies de pâturage. Grâce à la diversité des contextes étudiés, ces applications ont permis de confirmer la nécessité d'établir des diagnostics et propositions d'adaptation spécifiques à chaque agrosystème [A30]. Elles ont aussi montré que, pour chacun de ces cas d'études, la modulation de l'utilisation du sol pouvait constituer un levier efficace pour atténuer les impacts du changement climatique. Des résultats sur le devenir d'un réservoir de barrage au Nord du Maroc [A40], le rôle d'événements extrêmes dans un site viticole français [A37] ou l'effet de la fréquence des feux de forêt au Portugal [A39] ont déjà fait l'objet de publications.

Efficacité d'aménagements de lutte contre le ravinement

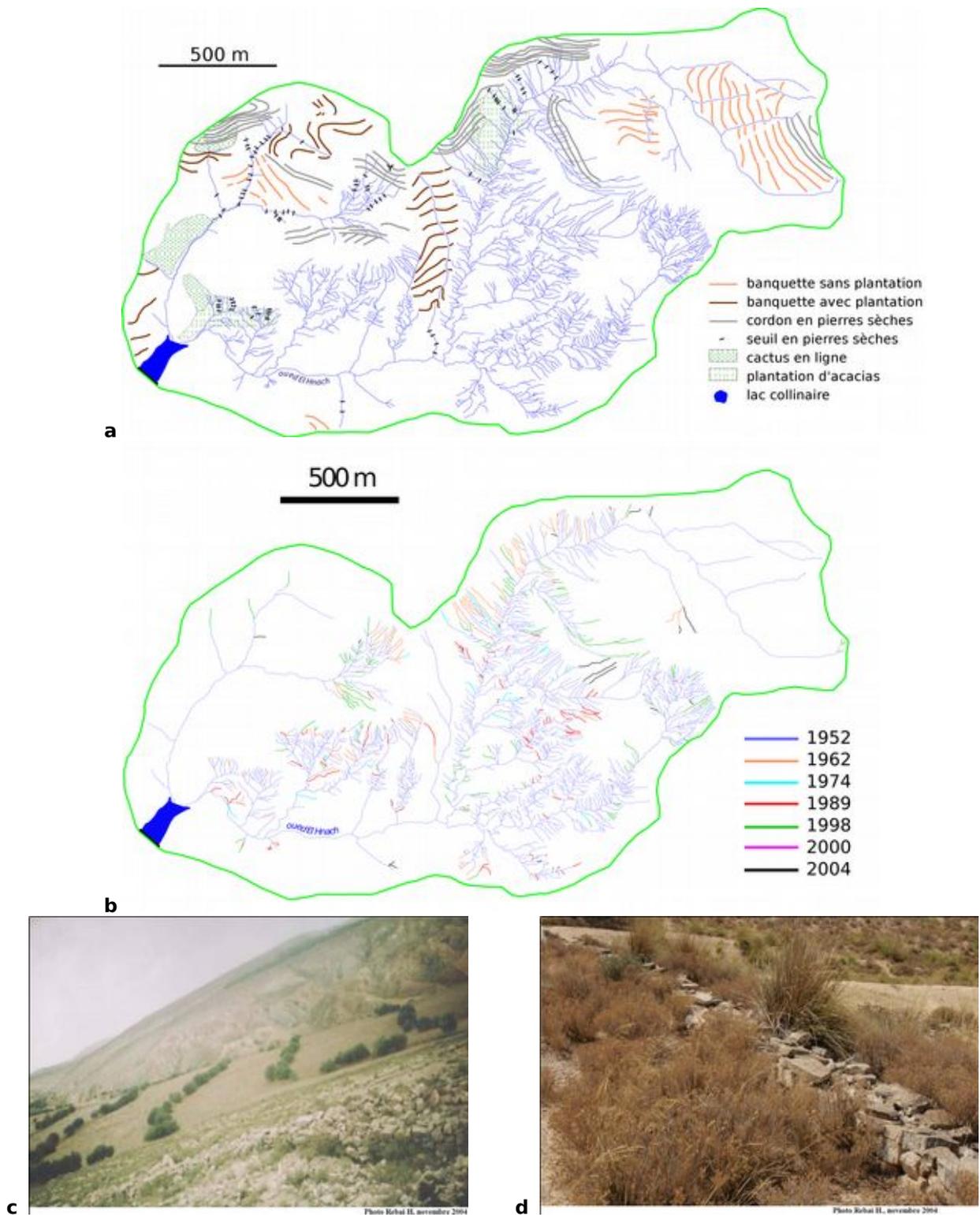
Principales collaborations : Fac. Humaines et Sociales de Tunis

Principaux encadrements : **Thèse** Houda Rebai

Bien que de nombreuses mesures CES aient été mises en place pour lutter contre la dégradation de la ressource en sol, les évaluations de leur efficacité par retour d'expérience sont rares, sans doute parce que les conditions naturelles (*i.e.* sous climat non contrôlé) conduisent à la double difficulté i) de trouver une situation de référence (*e.g.* situation non aménagée) pour laquelle toutes les autres conditions sont équivalentes (« toute chose égale par ailleurs ») et ii) de couvrir une gamme de conditions hydro-météorologiques représentatives du contexte étudié incluant des événements extrêmes (Fleskens & Stroosnijder, 2007).

Le travail sur l'impact du mode de conduite de la vigne à partir d'une analyse comparative de deux parcelles « jumelles » sur un site d'observation long-terme, décrit en p 43, illustre une situation pour laquelle ces conditions étaient satisfaites. Cependant de tels appariements de dispositifs d'observation long-terme sont lourds et par conséquent peu fréquents. Heureusement, certains processus comme le ravinement marquent durablement le paysage, ce qui permet d'envisager de dresser des retours d'expérience en conditions naturelles tout en s'affranchissant du coûteux suivi continu sur plusieurs années, voire décennies. C'est ce que nous avons effectué pour évaluer l'efficacité d'aménagements réalisés en vue de limiter le ravinement. La démarche proposée [A22] consiste à recréer des conditions d'une analyse comparative de l'évolution de l'érosion ravinaire avant et après aménagement. Elle s'appuie d'abord sur une cartographie de l'évolution des longueurs des ravines entre différentes dates permettant de couvrir une période pré-aménagement et une période post-aménagement. La cartographie est issue de la photo-interprétation de séries de photographies aériennes remontant jusque dans les années 1950. La seconde étape consiste à établir, sur les secteurs non aménagés et aménagés, des références d'évolution des longueurs du réseau de ravines sur les deux périodes (avant et après aménagement) par type de contexte (*e.g.* pente et lithologie). Il est alors possible d'évaluer l'efficacité des aménagements en comparant dans les zones aménagées l'évolution des longueurs des ravines avant et après aménagement à l'évolution des longueurs des ravines du secteur de référence non aménagé pour le même contexte et pour les mêmes périodes. Cette comparaison à des secteurs « témoins » non aménagés constitue un moyen de corriger l'impact d'une possible variation climatique entre les deux périodes, et le fait que les zones effectivement aménagées n'ont pas forcément les mêmes dynamiques de ravinement que les secteurs non aménagés.

Cette démarche a été mise en œuvre sur le bassin versant d'El Hnach (3,7 km², Tunisie centrale), partiellement aménagé vers 1989 avec diverses pratiques anti-érosives (plantations d'arbres, construction de banquettes, de seuils et de cordons de pierre, cf. figure 31), ainsi que sur le bassin versant de Sbahia (3,6 km², Tunisie centrale). Si l'on suppose que les aménagements ont été normalement entretenus, ces deux exemples permettent de tirer les précieux retours d'expérience suivants concernant l'efficacité d'ouvrages de lutte contre le ravinement sur la Dorsale tunisienne : i) les plantations d'acacias et de cactus sont efficaces sur des pentes inférieures à 20° ; ii) les banquettes utilisées pour les pentes faibles à très faibles (<6°) sont efficaces pour les secteurs à roches tendres ou à alternances de roches tendres et de roches dures ; iii) les cordons de pierres ont un comportement plus mitigé puisqu'ils sont globalement efficaces sur roches dures et tendres mais complètement inefficaces sur les zones présentant des alternances de roches dures et de roches tendres; iv) les seuils en pierres sèches construits dans des secteurs de roches tendres ne sont plus efficaces pour les pentes supérieures à 6°.



D'autres retours d'expériences ont été initiés sur des bassins versants marocains [B12 ; B17]. Un inventaire des mesures CES et de leur état actuel a été mené et comparé avec les plans établis au moment de leur réalisation. Diverses techniques d'évaluation de leur efficacité allant des traditionnels suivis in-situ sur plusieurs années (e.g. piquetage) jusqu'à des estimations des taux d'érosion long-terme dans les secteurs aménagés et les secteurs non aménagés, via des techniques basées sur des radionucléides, y ont été engagées.

Bilan du volet 3

Grâce au développement des modélisations distribuées et à l'augmentation de la puissance de calcul, les expérimentations numériques susceptibles d'appuyer les plans de gestion des bassins versants se sont multipliées. Dans ce contexte, nous avons contribué au développement d'approches permettant d'identifier, parmi un grand nombre de scénarios, des configurations optimales de mesures CES et d'évaluer les impacts « *on-site* » et « *off-site* » de scénarios de changement global. Ces développements ont permis de dériver des **connaissances importantes sur le degré de modulation** que rend possible **l'agencement spatial de mesures CES** au sein des bassins versants, ou encore un **changement d'utilisation du sol** par rapport au changement climatique attendu.

Cependant ces **expérimentations numériques** présentent encore aujourd'hui de **nombreuses limites** en lien avec i) l'énorme quantité de données requises pour alimenter ces modèles ; ii) les incertitudes sur les projections lorsque l'on se place dans un travail de prospective ; iii) la forte expertise nécessaire pour paramétrer et calibrer ces modèles distribués ; iv) et notre compréhension imparfaite des interactions entre les processus en jeu à l'échelle du bassin versant. Selon (Poesen, 2018), les futurs développements en matière de modélisation distribuée de l'érosion doivent par conséquent se concentrer sur l'amélioration de : i) l'intégration de tous les processus importants de mobilisation des sédiments (*e.g.* les ravines, les mouvements de masse) ; ii) la prise en compte de la connectivité sédimentaire au sein des bassins versants ; iii) la représentation des impacts des utilisations du sol et des mesures CES.

À mon sens, la difficulté à comprendre et à rendre compte, dans les modèles distribués, de la **complexité des interactions entre les différents processus actifs** dans un bassin versant constitue un point de blocage majeur qui limite notre capacité à éclairer la prise de décision en matière de plans de gestion des bassins versants (les autres points de blocage relevant plutôt du ressort de l'évaluation socio-économique en lien avec l'acceptabilité des plans de gestion et le maintien d'une activité économique viable pour les acteurs locaux). En effet, lutter contre l'érosion diffuse et concentrée en diminuant le ruissellement via une augmentation de l'infiltration peut par exemple activer des mouvements de masse (Zhu et al, 2016) qui sont rarement pris en compte dans les modèles actuels. Qui plus est, les **interactions entre les processus hydro-érosifs, la dynamique de l'eau dans le sol et la dynamique de la végétation** sont, elles aussi, **insuffisamment maîtrisées** si bien que les modèles actuels sont incapables de prédire les points de basculements vers un stade de dégradation irréversible des sols qui peuvent se produire dans un contexte de changement global (Garcia-Ruiz et al., 2017).

Les **analyses rétrospectives** en conditions réelles constituent quant à elles un moyen unique de ne pas occulter les interactions entre processus et ainsi d'analyser les possibles **points de basculements** qui peuvent conduire l'écosystème vers une situation d'équilibre très différente de la situation actuelle. Ces retours d'expérience doivent se faire sur des **temps longs** car l'écosystème réagit parfois avec beaucoup d'inertie, à savoir que des changements de trajectoires d'équilibre ne sont parfois perceptibles que des années, voire des dizaines d'années après l'événement déclencheur. Un exemple illustrant le basculement de la réponse pluie-débit au Sahel du fait d'une sécheresse marquée entre les années 1970 et le milieu des années 1990 est relaté par Wendling et al. (2019) : la végétation s'est progressivement réduite si bien que le ruissellement est nettement plus élevé aujourd'hui qu'il ne l'aurait été avant les années 1985 pour une même pluie. Le système a basculé vers une dégradation irréversible des sols, le ruissellement entraînant le ravinement qui entretient la dégradation des sols et empêche la réinstallation de la végétation... À l'image de ce travail, il me semble intéressant d'intensifier ce type d'analyses rétrospectives, car elles constituent un moyen unique

d'identifier et de comprendre de telles boucles d'interactions et de rétro-actions. Ces analyses rétrospectives peuvent prendre diverses formes. Dans ce mémoire, elles ont été esquissées sous la forme de l'exploitation de chroniques long-terme acquises sur des observatoires, l'analyse d'archives sédimentaires ou encore l'analyse d'images de télédétection. Concernant l'appui à la gestion, elles ont permis de démontrer et quantifier l'impact long-terme de plusieurs mesures CES en conditions réelles d'application.

Synthèse du volet 3

Le troisième volet de ce mémoire a présenté, à travers quelques exemples, comment les développements méthodologiques (volet 1) et les avancées cognitives (volet 2) peuvent être mobilisés au service de l'appui à la gestion conservatoire de la ressource en sol dans les bassins versants méditerranéens ruraux. Une première voie a exploré, via l'exploration numérique à l'aide de modèles distribués de l'érosion, l'impact de l'implantation de mesures CES à l'interface de parcelles ou plus globalement de plans complets de gestion de bassins versants dans un contexte de changement global. Une seconde voie, basée sur l'analyse rétrospective, a permis d'établir un retour d'expérience en conditions réelles de l'efficacité mesures CES sur le long-terme.

Ces exemples d'appui à la gestion des bassins versants ont été développés principalement au cours de 3 thèses et trois stages de post-doctorat. Ils ont donné lieu à la publication de 6 articles référencés WOK.

Le développement d'analyses rétrospectives me semble une voie très prometteuse pour progresser dans la compréhension des interactions complexes entre les processus et facteurs pilotant la réponse hydro-érosive des bassins versants sur le long-terme. À l'inverse, l'exploration numérique me semble avoir atteint un seuil dans sa capacité à éclairer la prise de décision en matière de plans de gestion des bassins versants.

Perspectives

Le bilan de mes activités a exposé mes principales contributions en matière de **développements de méthodes, outils et connaissances pour comprendre la réponse hydro-érosive des bassins versants méditerranéens dans le but de gérer durablement ces milieux**. La démarche retenue pour soutenir ces développements repose sur la **complémentarité** entre un volet « caractérisation/observation », un volet « modélisation » et un volet « compréhension » des facteurs et processus érosifs. Si la mobilisation de ces 3 volets est relativement classique en géosciences, mon profil initial combinant hydrologie (ENGEES) et approche spatialisée (DEA) m'a permis de développer une démarche qui se veut originale par son **équilibre entre dimension spatiale et dimension temporelle**, et par son **positionnement** sur un domaine spatial allant de la parcelle agricole (ou de l'aménagement individuel type bande enherbée) au petit bassin versant (*i.e.* quelques km², voire la centaine de km²) et un domaine temporel allant de la minute à la pluridécennie. Si mon expertise s'est principalement construite dans le contexte méditerranéen, la plupart des développements méthodologiques proposés ne sont pas spécifiques à ce contexte ; ainsi ils pourraient facilement être redéployés dans d'autres cadres géographiques.

Jusqu'à présent, mes travaux ont principalement porté sur les **aspects quantitatifs** de l'érosion hydrique des sols (*i.e.* quantité de matière perdue, quantité ou flux massique de matière transitant en un point, etc) et sur du **court et moyen-terme** (*i.e.* de l'événement pluvieux à la pluridécennie). A l'issue de ce bilan, il me paraît important d'orienter mes perspectives de recherche vers :

- un approfondissement du **lien entre le court** (*i.e.* événement pluvieux), **moyen** (*i.e.* année-décennie) et **long-terme** (*i.e.* siècle ou plus) afin de mieux appréhender l'évolution de la ressource en sol au sein des bassins versants ruraux ;
- l'intégration des **aspects qualitatifs de l'érosion** afin de caractériser l'évolution de la ressource en sol dans toutes ses composantes, et de mieux évaluer ainsi la durabilité des services écosystémiques rendus par les sols.

Les savoir-faire acquis jusqu'à aujourd'hui m'incitent à inscrire mes futures recherches dans la continuité de la démarche méthodologique développée jusqu'à maintenant, *i.e.* poursuivre et valoriser mes investissements dans i) l'observation long-terme sur les dispositifs de l'observatoire OMERE, et la mise en réseau de tels dispositifs en France, en Europe et en Méditerranée (*e.g.* IR OZCAR) ; ii) le recours à la modélisation distribuée avec MHYDAS_Erosion comme principal modèle de connaissances ; iii) le développement de méthodes de caractérisation de la variabilité interne des bassins versants. Des développements complémentaires seront néanmoins conduits en matière d'observation de **la qualité des sédiments transportés** (*e.g.* granulométrie, concentration en matières associées) et d'**analyses rétrospectives** afin d'accéder à des **profondeurs temporelles** plus vastes que celles offertes aujourd'hui par nos observatoires de recherche. Pour cela, des collaborations avec des géomorphologues, des spécialistes de sciences du sol et du devenir des matières associées au flux de sédiments, voire des archéologues, devront être intensifiées. Des progrès en matière d'appui à la définition de plans de gestion passeront aussi par un renforcement de mes collaborations sur les aspects socio-économiques et agro-écologiques (*i.e.* lien biotique/abiotique) des mesures CES. Ces collaborations pourront, pour partie, se faire au sein du LISAH, alors que d'autres devront faire appel à des chercheurs d'autres unités françaises ou internationales. Des premières pistes sont évoquées dans les projets d'actions développés ci-dessous. Ces développements complémentaires nécessiteront très certainement une baisse d'activité en lien avec le développement d'outils et méthodes pour la modélisation distribuée, a minima le temps que des avancées cognitives suffisamment robustes soient produites.

Cette dernière section se limite à la présentation des **nouvelles actions** de recherche que j'envisage d'initier dans les cinq années à venir. Ces nouvelles actions viendront renforcer et enrichir des travaux initiés dans la parfaite continuité de recherches décrites dans ce mémoire (e.g. caractérisation des fentes de retrait par imagerie cerf-volant, analyse de l'érosivité des pluies à Kamech en fonction du type de temps, approfondissement de l'analyse des « hotspots » et « hot moments » érosifs en Méditerranée ainsi que du rôle des types de temps).

Volet qualitatif de l'érosion

Il y a au moins deux intérêts à adjoindre un volet qualitatif au suivi quantitatif des processus d'érosion : i) aborder des sujets à fort intérêt sociétal en lien avec la qualité du sol (et de l'eau) ; ii) explorer dans quelle mesure des propriétés qualitatives peuvent constituer des proxys des processus d'érosion (i.e. ablation, transport, dépôt).

1) Redistribution spatiale et devenir de la matière organique à l'échelle du paysage

Principales collaborations : INRGREF & INRAT Tunis ; iEES Paris.

Cadre structurel : ORE OMERE, LMI NAILA, PSIP-IRD « Séquestration continentale du carbone » et « Géorressources, Développement Humain et Environnement »

Il existe un débat intense au sein de la communauté scientifique pour savoir si l'érosion des sols est globalement source ou puits de carbone à l'échelle mondiale (Van Oost et al., 2007 ; Lal, 2003 ; Harden et al., 2008 ; Xiao et al., 2018). Cette question est cruciale au moment où l'humanité est confrontée à deux défis majeurs : celui d'assurer l'alimentation d'une population globale croissante tout en maintenant la durabilité des ressources naturelles, et celui de limiter les émissions de gaz à effets de serre pour lutter contre le changement climatique. Pour répondre à cette question il faut progresser sur la connaissance des vitesses et mécanismes impliqués dans le devenir du carbone (organique) à l'échelle du paysage (Doetterl et al., 2016 ; Xiao et al., 2018). Selon ces auteurs la réponse à cette question dépend de notre capacité à documenter finement, en conditions naturelles, les amplitudes des redistributions latérales du carbone organique sur un continuum source-transfert-puits en y associant une évaluation des dynamiques et des facteurs de contrôle (communautés microbiennes associées notamment) de minéralisation du carbone.

Conscient du potentiel offert par le dispositif des bassins OMERE à l'exutoire desquels un suivi continu des flux de carbone a été mis en place en 2018 dans le cadre du projet ASSESS, nous avons proposé et obtenu un financement de l'IRD (bourse ATRS) pour une bourse de thèse qui commencera à l'automne 2020 sur le sujet suivant : « Impact de l'érosion hydrique sur la redistribution spatiale et le devenir de la matière organique à l'échelle du paysage en contexte cultivé méditerranéen ». Conduite sur le bassin versant de Kamech en Tunisie, la démarche allie un suivi des flux de carbone depuis les zones sources de sédiments jusqu'aux principales zones de dépôt, avec une caractérisation de la biodégradabilité du carbone organique sur le continuum source-transport-dépôt des sédiments.

Les questions auxquelles la thèse cherchera à répondre sont :

- Combien de carbone un bassin versant agricole méditerranéen, en milieu carbonaté, a-t-il en stock dans ses sols et comment ce carbone est-il réparti au sein du bassin versant ?
- Combien un tel bassin exporte-t-il de carbone par an, quelles sont les zones qui perdent du carbone, celles qui en emmagasinent, à quelle vitesse et pourquoi ?
- Quelle est la nature et la dégradabilité des matières organiques du sol sur le continuum source-transport-dépôt ?

- Quel est l'impact de l'érosion hydrique sur l'évolution du potentiel agronomique et des propriétés contrôlant les flux d'eau et de matières associées à l'échelle du paysage ?

Un descriptif détaillé de ce sujet de thèse est disponible en annexe 1.

2) Des proxys des processus de redistribution des sols

Principales collaborations : INRGREF & INRAT Tunis, HSM Montpellier, ECO&Sol, iEES, etc.

Cadre structurel : ORE OMERE, IR OZCAR, LMI NAILA

Cette seconde voie consiste à explorer la capacité des propriétés qualitatives des matières transportées (e.g. granulométrie, matière organique, métaux lourds, pesticides) à nous renseigner sur les processus érosifs de redistribution du sol au sein des bassins versants, et donc de façon indirecte à la compréhension de la connectivité hydro-sédimentaire. À l'image des connaissances que l'on peut dériver de traceurs géochimiques sur les chemins et les temps de résidence de l'eau dans un bassin versant (Leibundgut et al., 2009), l'idée est de recourir à un suivi spatial et/ou temporel de propriétés qualitatives pour mieux comprendre les processus hydro-érosifs. L'information produite pourrait utilement s'articuler avec une analyse des boucles d'hystérésis de la relation concentration entre matières en suspension et débit, qui fournit des informations intégrées sur les processus dominants et les sources contributives dans les bassins versants (e.g. Williams, 1989). En lien avec l'action précédente, les propriétés qui seront testées prioritairement sont la granulométrie et la matière organique pour Kamech, ces deux mêmes éléments ainsi que le cuivre pour le bassin versant viticole de Roujan.

Mieux lier érosion événementielle et évolution de la ressource en sol sur le moyen et long-terme

Les approches rétrospectives sur le moyen et le long-terme présentent un fort potentiel pour identifier et comprendre, à partir de trajectoires passées, les interactions complexes entre les différents processus érosifs, hydrologiques, biologiques... Cette compréhension des trajectoires passées permet de mieux expliquer le comportement hydro-érosif que l'on observe actuellement. Elle est également fortement utile pour les exercices prospectifs dans le contexte des changements globaux dans la mesure où la modélisation ne sait pas à ce jour reproduire de manière satisfaisante ces interactions complexes. Les approches rétrospectives aident aussi à mieux cerner comment la dynamique événementielle de redistribution des sédiments, et de ses matières associées, impacte la ressource en sol dans la durée, et vice-versa. Elles contribuent de ce fait à développer une gestion durable des bassins versants.

3) Analyse rétrospective via des archives sédimentaires

Principales collaborations : CERTE, SUERC Glasgow.

Cadre structurel : ORE OMERE, LMI NAILA

Une rupture de la connectivité hydro-sédimentaire dans un bassin versant, du fait par exemple d'un aménagement, d'un replat ou de végétation, peut conduire à l'accumulation de sédiments au sein de zones de dépôt préférentiel. L'identification et l'investigation de ces archives sédimentaires sont autant d'informations utiles pour comprendre la connectivité hydro-sédimentaire actuelle et passée des bassins versants, et pour fournir une histoire des processus hydro-érosifs en amont de ces zones. J'ai déjà présenté, dans ce mémoire, comment les sédiments piégés dans les retenues collinaires en Tunisie nous renseignent, grâce au recours à des techniques de traçage, sur l'origine des sédiments et au final sur la hiérarchie des processus érosifs responsables de l'envasement des retenues. Ce cas d'étude est idéal car le piégeage imposé par l'aménagement anthropique est quasi-exhaustif. La voie proposée dans cette nouvelle action est d'étendre ces travaux à d'autres archives sédimentaires portant sur

les dépôts au droit des chemins préférentiels du ruissellement (*i.e.* ravines, fossés). L'interprétation de ces archives constitue un défi car il faut prendre en compte le fait que le dépôt n'est ni continu, ni total, et qu'il peut même être tronqué du fait de processus de reprise de sédiments lors d'événements importants. L'enjeu est cependant important car, bien que ces zones de dépôt ne représentent qu'une surface très limitée des bassins versants, plusieurs études montrent qu'elles peuvent jouer un rôle majeur sur le fonctionnement de la zone critique en contrôlant notamment de façon significative i) les échanges nappe/rivière (Dagès et al., 2009) ; ii) le développement de la végétation (Herzon et Helenius, 2008) et iii) le devenir des matières transportées comme les polluants (Stehle et al., 2011). Par ailleurs, nous savons, grâce à des études de cas bien documentées (*e.g.* Vanwalleghem et al., 2005, 2017), que plusieurs cycles de creusement et de remplissage des ravins peuvent avoir eu lieu sur des périodes allant de plusieurs décennies à plusieurs siècles. Si nous voulons mieux prévoir l'évolution des ravins et élaborer des stratégies de gestion appropriées, nous devons mieux comprendre les facteurs qui régissent le remplissage des ravins (Poesen, 2018).

Avec Guillaume Coulouma, pédologue au LISAH, des partenaires tunisiens spécialistes de géophysique et des partenaires écossais spécialistes de la datation par luminescence stimulée optiquement (OSL), nous avons construit un projet de recherche nommé CARAFE pour « Caractérisation et genèse des sols spécifiques à l'environnement des Ravines et Fossés agricoles en Méditerranée ». Ce projet vise à développer des méthodes pour mieux cerner l'extension latérale et verticale des zones de dépôt au droit des ravines et fossés, et en comprendre leur genèse. Avec les ravines de Kamech et les fossés agricoles de Roujan comme support, la démarche envisagée repose sur une combinaison de techniques géophysiques, de datations et d'analyses stratigraphiques et physico-chimiques. CARAFE n'a pas été retenu pour financement lors de l'appel à projet EC2CO 2019. Nous comptons l'enrichir et le soumettre à nouveau à la prochaine session de cet appel à projet. Des contacts avec des archéologues de l'[UMR « Archéologie des Sociétés Méditerranéennes »](#) à Montpellier ont été pris en vue de les associer au projet. Un descriptif détaillé du projet CARAFE, tel qu'il a été soumis à EC2CO en 2019, est disponible en annexe 2.

4) Analyse rétrospective via des archives d'images

Principales collaborations : INRGREF, Fac. Humaines et Sociales de Tunis.
Cadre structurel : LMI NAILA

Cette dernière action vise à démultiplier l'analyse rétrospective du ravinement basée sur les campagnes de photographies aériennes existantes. Jusqu'à maintenant un frein majeur relevait de la lourdeur du pré-traitement des photographies aériennes pour les corriger géométriquement et les assembler avec une précision géométrique compatible avec l'analyse des évolutions de longueur des ravins entre chaque campagne. Le développement récent d'une méthode dite TIME-SIFT (Feurer et al, 2018), basée sur les progrès réalisés en photogrammétrie en Structure from Motion avec stéréoscopie multi-vues, facilite grandement le traitement de séries d'images multi-date. En desserrant cette contrainte du pré-traitement des images, cette technique doit permettre de créer des jeux d'observation sur des configurations d'observation suffisamment nombreuses et contrastées pour rendre opérant l'analyse statistique. Les perspectives offertes concernent l'identification des facteurs dominants impliqués dans la morpho-dynamique du ravinement, comme le rôle du climat et des événements extrêmes, le rôle des aménagements anthropiques ou encore le rôle de la végétation et de la géologie... Le déploiement de cette action est envisagée sur la Tunisie dans un premier temps, mais des travaux similaires pourraient rapidement être initiés en France et au Maroc afin de couvrir une gamme de conditions environnementales plus vastes.

Liste bibliographique citée (extérieure au candidat)

- Allan JD, 2004. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. [Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics](#), 257-284.
- Amundson R, Berhe AA, Hopmans JW, Olson C, Sztein AE, Sparks DL, 2015. Soil and human security in the 21st century. [Science](#) 348, 6235.
- Andrieux P, Hatier A, Asseline J, De Noni G, Voltz M, 2001. Predicting infiltration rates by classifying soil surface features in a Mediterranean wine-growing area. Final Proc. International Symposium "The Significance of soil Surface Characteristics in Soil Erosion", COST 623 "Soil Erosion and Global Change" Workshop, Strasbourg.
- Arnold J, Potter K, King K, Allen P, 2005. Estimation of soil cracking and the effect on surface runoff in a Texas Blackland Prairie watershed. [Hydrological Processes](#) 19, 589-603.
- Asseline J, De Noni G, Chaume R, 1999. Note sur la conception et l'utilisation d'un drone lent pour la télédétection rapprochée. Photo Interprétation, images aériennes et spatiales, 37(2), 42-47.
- Auzet AV, Boiffin J, 1995. Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. [Earth Surface Processes and Landforms](#) 20, 759-769.
- Auzet V, Poesen J, Valentin C, 2001. Soil patterns as a key controlling factor of water erosion. [Catena](#) 46(2-3), 85-87.
- Auzet V, Poesen J, Valentin C, 2004. Editorial : Soil surface characteristics: dynamics and impact on soil erosion. [Earth Surf. Process. Landforms](#), 29, 1063-1064.
- Beven K., Freer J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. [Journal of Hydrology](#), 2001, 249 (1-4), 11-29.
- Blöschl G, Sivapalan M, 1995. Scale issues in hydrological modelling: a review. [Hydrological Processes](#) 9, 251-290
- Boardman J, 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. [Catena](#) 68, 73-86.
- Boardman J, Vandaele K, Evans R, Forster IDL, 2019. Off-site impacts of soil erosion and runoff: Why connectivity is more important than erosion rates. [Soil Use & Management](#) 35, 245-256.
- Bracken L, Wainwright J, Ali G, Tetzlaff D, Smith M, Reaney S, Roy A, 2013. Concepts of hydrological connectivity : research approaches, pathways and future agendas. [Earth-Science Reviews](#) 119, 17-34.
- Brenot J, Quiquerez A, Petit C, Garcia JP, 2008. Erosion rates and sediment budgets in vineyards at 1-m resolution based on stock unearthing (Burgundy, France). [Geomorphology](#) 100, 345-355.
- Cammeraat LH, 2004. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. [Agriculture, Ecosystems and Environment](#) 104, 317-332.
- Cammeraat LH, Imeson AC, 1998. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in SE Spain and France. [Geomorphology](#) 23, 307-321.
- Cammeraat LH, 2002. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. [Earth Surf. Processes Landforms](#) 27, 1201-1222.
- Cerdà, A., Giménez-Morera, A., Bodí, M.B., 2009. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin. [Earth Surf. Process. Landforms](#) 34, 1822-1830.
- Cerdan O, Souchère V, Lecomte V, Couturier A, Le Bissonnais Y, 2001. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff and erosion model: STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management). [Catena](#) 46, 189-205.
- Colin F, 2013. Hydrologie et Qualité des Eaux dans les Paysages Agricoles : contributions d'approches spatialisées à la caractérisation, la compréhension et la gestion des ressources en eau de surface. [Mémoires HDR](#), 76 p.
- Congalton RG, 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. [Remote Sensing of Environment](#), 37(1), 35-46.
- Corbane C, Andrieux P, Voltz M, Chadoeuf J, Albergel J, Robbez Masson JM, Zante P, 2008. Assessing the variability of soil surface characteristics in row-cropped fields: the case of Mediterranean vineyards in Southern France. [Catena](#) 72 (1), 79-90.
- Coulombe C, Wilding L, Dixon J, 1996. Overview of vertisols: characteristics and impacts on society. In [Advances in agronomy](#), Sparks DL (ed). Academic Press: New York, 289-375.
- Dages C, Voltz M, Bsaibes A, Prevot L, Huttel O, Louchart X, Garnier F, Negro S, 2009. Estimating the role of a ditch network in groundwater recharge in a Mediterranean catchment using a water balance approach. [Journal of Hydrology](#) 375(3-4), 498-512.
- Dagnelie P, 2012. Principes d'expérimentation : planification des expériences et analyse de leurs résultats. [Gembloux, Presses agronomiques](#), 413 p.
- Deletic A, 2001. Modelling of water and sediment transport over grassed areas. [Journal of Hydrology](#) 248(1-4), 168-182.
- Deletic A, 2005. Sediment transport in urban runoff over grassed areas. [Journal of Hydrology](#) 301(1-4), 108-122.
- De Franchis L, Ibanez L, 2003. Threats to Soils in Mediterranean Countries. Document review. [Plan Bleu papers 2. Plan Bleu UNEP Sophia Antipolis](#). 67 p.
- de Vente J, Poesen J, 2005 Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semiquantitative models. [Earth-Science Reviews](#) 71 (1-2), 95-125.
- de Vente J, Poesen J, Bazzofi P, Van Rompaey A, Verstraeten G, 2006. Predicting catchment sediment yield in Mediterranean environments: the importance of sediment sources and connectivity in Italian drainage basins. [Earth Surf Proc Land](#) 31, 1017-1034.
- de Vente J, Poesen J, Arabkhedri M, Verstraeten G, 2007. The sediment delivery problem revisited. [Progress in physical geography](#) 31(2), 155-178.
- de Vente J, Poesen J, Verstraeten G, Van Rompaey A, Govers G, 2008. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. [Global and Planetary Change](#) 60, 393-415.

- Doetterl S, Berhe AA, Nadeu E, Wang Z, Sommer M, Fiener P, 2016. Erosion, deposition and soil carbon: a review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. [Earth Sci. Rev. 154, 102-122.](#)
- Doherty J, 2004. PEST: Model-Independent Parameter Estimation—User Manual. [Watermark Numer. Comput., Brisbane, Qld., Australia](#)
- Dominati E, Patterson M, Mackay A, 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. [Ecol. Econ. 69\(9\), 1858-1868.](#)
- EIP-AGRI Focus Group, 2015. Soil organic matter content in Mediterranean regions. [Final Report EIP-Agri Focus Group, March 2015.](#)
- Feurer D, Vinatier V, 2018. Joining multi-epoch archival aerial images in a single SfM block allows 3-D change detection with almost exclusively image information. [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 146, 495-506.](#)
- Fleskens L, Stroosnijder L, 2007. Is soil erosion in olive groves as bad as often claimed? [Geoderma 141, 260-271.](#)
- Fryirs KA, Brierley GJ, Preston NJ, and Kasai M, 2007. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. [CATENA, 70\(1\), 49-67.](#)
- García-Ruiz JM, Nadal-Romero E, Lana-Renault N, Beguería S, 2013. Erosion in Mediterranean landscapes: changes and future challenges. [Geomorphology 198, 20-36.](#)
- García-Ruiz JM, Beguería S, Lana-Renault N, Nadal-Romero E, Cerdà A, 2017. Ongoing and emerging questions in water erosion studies. [Land degradation & development 28, 5-21.](#)
- Gómez JA, Giraldez JV, Vanwalleghem T, 2008. Comments on “Is soil erosion in olive groves as bad as often claimed?” by L. Fleskens and L. Stroosnijder. [Geoderma 147 \(1-2\), 93-95.](#)
- Gómez JA, Vanwalleghem T, De Hoces A, Taguas EV, 2014. Hydrological and erosive response of a small catchment under olive cultivation in a vertic soil during a five-year period: implications for sustainability. [Agriculture, Ecosystems & Environment 188, 229-244.](#)
- González-Hidalgo JC, Pêna-Monné JL, de Luis M, 2007. A review of daily soil erosion in Western Mediterranean areas. [Catena 71, 193-199.](#)
- González-Hidalgo JC, Batalla RJ, Cerdà A, de Luis M, 2012. A regional analysis of the effects of largest events on soil erosion. [Catena 95, 85-90.](#)
- Grayson R, Blöschl G, 2000. Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modelling. [Cambridge University Press, Cambridge. 404 p.](#)
- Harden JW, Berhe AA, Torn M et al. (2008). Soil erosion: Data say C sink. [Science. 320, 178-179.](#)
- Herzon I and Helenius J, 2008. Agricultural drainage ditches, their biological importance and functioning. [Biological Conservation 141\(5\), 1171-1183.](#)
- Hooke JM, 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. [Geomorphology 79, 311-335.](#)
- [ISO/FDIS 10930, 2012.](#) Soil quality — measurement of the stability of soil aggregates subjected to the action of water. 13 p.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: [Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change \[Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer \(eds.\)\]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.](#)
- IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M
- ITPS, 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main report. [Food and Agricultural Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy. 607 p.](#)
- Jebari S, Berndtsson R., Lebdi F., Bahri A. 2012. Historical aspects of soil erosion in the Mejerda catchment, Tunisia. [Hydrological Sciences Journal 57\(5\), 901-912.](#)
- Jetten V, Boiffin J, De Roo A, 1996. Defining monitoring strategies for runoff and erosion studies in agricultural catchments: a simulation approach. [European Journal of Soil Science 47, 579-592.](#)
- Jetten V, Govers G, Hessel R, 2003. Erosion models: quality of spatial predictions. [Hydrological Processes 17\(5\), 887-900.](#)
- Kirchner JW, 2006. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology, [Water Resour. Res., 42, W03S04.](#)
- Kirkby MJ, 1987. The Hurst effect, its implications for extrapolating processes data. [Earth Surface Processes and Landforms 12, 57-67.](#)
- Kirkby J, Bernardi A, Ringrose-Voase A, Young R, Rose H, 2003. Field swelling, shrinking, and water content change in a heavy clay soil. [Australian Journal of Soil Research 41, 963-978.](#)
- Kirkby MJ, Irvine BJ, Jones RJA, Govers G., and PESERA team, 2008. The PESERA coarse scale erosion model for Europe. Model rationale and implementation. [European Journal of Soil Science 59 \(6\),1293-1306.](#)
- Klemeš V. 1983. Conceptualization and scale in hydrology. [Journal of Hydrology 65, 1-23.](#)
- Kosmas C, Danalatos N, Cammeraat L, Chabart M, Diamantopoulos J, Farand R, Gutierrez L, Jacob A, Marques H, Martinez-Fernandez J, Mizara A, Moustakas N, Nicolau J, Oliveros C, Pinna G, Puddu R, Puigdefabregas J, Roxo M, Simao A, Stamou G, Tomasi N, Usai D, Vacca A, 1997. The effect of Land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. [Catena 29, 45-59.](#)
- Lacombe G, Valentin C, Sounyafong P, De Rouw A, Souleilou B, Silvera N, Pierret A, Sengtaheuanghoung O, Ribolzi O, 2018. Linking crop structure, throughfall, soil surface conditions, runoff and soil detachment : 10 land uses analyzed in Northern Laos. [Sci. Total Environ. 616-617, 1330-1338.](#)
- Lahlou A, 2000. Quelques aspects environnementaux dans les pays du Maghreb, [ed. ISESCO, Rabat, Maroc.](#)

- Lal R, 1998. Soil Erosion Impact on Agronomic Productivity and Environment Quality. [Critical Reviews in Plant Sciences 17\(4\), 319-464.](#)
- Lal, R., 2003. Soil erosion and the global carbon budget. [Environment International, 29\(4\), 437-450.](#)
- Lal R, 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. [Science 304 \(5677\), 1623-1627.](#)
- Laouina A, 2010. Conservation des eaux et des sols au Maroc : prise en compte de la diversité géographique. [Norois 214, 85-99.](#)
- Larson WE, Lindstrom MJ, Schumacher TE, 1997. The role of severe storms in soil erosion: a problem needing consideration. [J Soil Water Conserv 50, 90-95.](#)
- Le Bissonnais Y, Fox D, Bresson LM, 1998. Incorporating crusting processes in erosion models. In: Boardman, J., Favis-Mortlock, D. (Eds.) *Modelling Soil Erosion by Water*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 237-246.
- Leibundgut C, Maloszewski P., Külls C, 2009. Tracers in hydrology. [Wiley-Blackwell, Oxford, UK. 415 p.](#)
- Léonard J, Andrieux P, 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in southern France. [Catena 32, 209-223.](#)
- Li Z. & Fang H, 2016. Impacts of climate change on water erosion: A review. [Earth-Science Reviews 163, 94-117.](#)
- Ludwig R. & Roson R, 2016. Climate change, water and security in the Mediterranean: Introduction to the special issue. [Science of the Total Environment 543: 847-850.](#)
- Mitchell A, van Genuchten M, 1993. Flood irrigation of a cracked soil. [Soil Science Society of America Journal 57, 490-497.](#)
- Montgomery DR, 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. [PNAS, 104 \(33\), 13268-13272.](#)
- Morgan RPC, 2005. Soil Erosion & Conservation. [Blackwell Publishing Ltd, 3rd edition. 304 p.](#)
- Moussa R, Voltz M, Andrieux P, 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. [Hydrological Processes 16, 393-412.](#)
- Nadal-Romero E, Martínez-Murillo JF, Vanmaercke M, Poesen J, 2011. Scale-dependency of sediment yield from badland areas in Mediterranean environments. [Progress in Physical Geography 35\(3\), 297-332.](#)
- Nearing MA, Pruski FF, O'Neal MR. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. [Journal of Soil and Water Conservation 59: 43-50.](#)
- Nex F & Remondino F, 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. [Appl. Geomat. 6, 1-15.](#)
- Parras-Alcántara L, Lozano-García B, Keesstra S, Cerdà A, Brevik EC, 2016. Long-term effects of soil management on ecosystem services and soil loss estimation in olive grove top soils. [Sci. Total Environ. 571, 498-506](#)
- Parsons AJ, Brazier RE, Wainwright J, Powell DM, 2006. Scale relationships in hillslope runoff and erosion. [Earth Surf. Processes Landforms 31,1384-1393.](#)
- Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C, 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. [Catena 50, 91-133.](#)
- Poesen J, 2018. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. [Earth Surface Processes and Landforms 43, 64-84.](#)
- Renard KG, Nichols M, Woolhiser DA, Osborn HB, 2008. A brief background on the U.S. Department of Agriculture Agricultural Research Service Walnut Gulch Experimental Watershed. [Water Resources Research 44 \(5\), W05S02.](#)
- Ritchie JA, Adams JE, 1974. Field measurement of evaporation from soil shrinkage cracks. [Soil Science Society of America Proceedings 38: 131-134.](#)
- Roose E (ed.), Sabir M (ed.), Laouina A (ed.), Benchakroun F (collab.), Al Karkouri J (collab.), Lauri P (collab.), Qarro M (collab.), 2010. Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. [Marseille, IRD, 343 p. ISBN 978-2-7099-1683-7](#)
- Sadaoui M, Ludwig W, Bourrin F, Le Bissonnais Y, Romero E, 2018. Anthropogenic Reservoirs of Various Sizes Trap Most of the Sediment in the Mediterranean Maghreb Basin. [Water, 10, 927; doi:10.3390/w10070927](#)
- Saltelli A, Chan K, & Scott EM, 2009. [Sensitivity analysis, Wiley, London.](#)
- Saltelli A, Annoni P, Azzini I, Campolongo F, Ratto M, & Tarantola S, 2010. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Comput. Phys. Commun.* 181(2), 259-270.
- Shakesby RA, 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. [Earth-Science Reviews 105, 71-100.](#)
- Simonneaux V, Cheggour A, Deschamps C, Mouillot F, Cerdan O, Le Bissonnais Y, 2015. Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco). [Journal of Arid Environments 122, 64-75.](#)
- Sivapalan M, Blöschl G, Zhang L, Vertessy R, 2003. Downward approach to hydrological prediction. [Hydrol. Process., 17: 2101-2111.](#)
- Stehle S, Elsaesser D, Gregoire C, Imfeld G, Niehaus E, Passeport E, Payraudeau S, Schaefer RB, Tournebize J, Schulz R., 2011. Pesticide Risk Mitigation by Vegetated Treatment Systems: A Meta-Analysis. [J. of Env. Qual. 40\(4\), 1068-1080.](#)
- Stroosnijder L, 2005. Measurement of erosion: Is it possible? [Catena 64, 162-176.](#)
- Talineau JC, Selmi S, Alaya K, 1994. Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. [Sécheresse, 5, 251-256.](#)
- Thornes JB, 2002. Emerging mosaics. In [Mediterranean desertification—a mosaic of processes and responses, Geeson NA, Brandt CJ, Thornes JB \(eds\). John Wiley and Sons, LTDs, 419-427.](#)
- Valentin C, Poesen J, Li Y, 2005. Gully erosion : impacts, factors and control. [Catena 63, 132-153.](#)
- Valentin C, Boonsaner A, Janeau JL, Jouquet P, Henry des Tureaux T, Huon S, Latsachack K, Le Troquer Y, Maeght JL, Orange D, Pham Dinh Rinh, Pierret A, Podwojewski P, Ribolzi O, de Rouw A, Sengtaheuanghoung O, Silvera N, Robain H, Soulileuth B, Thothong W, Tran Duc, Toan, Tran Sy Hai, 2014. Lessons from long-term monitoring of soil erosion in three southeast Asian agricultural catchments undergoing rapid land-use changes. [IHS publication 363, 303-308.](#)

- Vanmaercke M, Poesen J, Verstraeten G, de Vente J, Ocakoglu F, 2011. Sediment yield in Europe: spatial patterns and scale dependency. [Geomorphology 130, 142-161](#).
- Vanmaercke M, Maetens W, Poesen J, Jankauskas B, Jankauskiene G, Verstraeten G, de Vente J, 2012. A comparison of measured catchment sediment yields with measured and predicted hillslope erosion rates in Europe. [Journal of Soils and Sediments 12, 586-602](#).
- Vanmaercke M, Poesen J, Broeckx J, Nyssen J, 2014. Sediment yield in Africa. [Earth Science reviews 136, 350-368](#).
- Van Oost K, Quine TA, Govers G, De Gryze S, Six S, Harden J, Ritchie JC, McCarty GW, Heckrath G, Kosmas C, Giraldez JV, Marques Da Silva JR and Merckx R, 2007. The impact of agricultural Soil Erosion on the Global Carbon Cycle. [Science, 318-626](#).
- Vanwalleghem T, Bork HR, Poesen J, Schmidtchen G, Dotterweich M, Nachtergaele J, Bork H, Deckers J, Brüsck B, Bungeneers J, De Bie M, 2005. Rapid development and infilling of a buried gully under cropland, central Belgium. [Catena 63, 221-243](#).
- Vanwalleghem T, Gómez JA, Infante Amate J, González de Molina M, Vanderlinden K, Guzmán G, Laguna A, Giraldez JV, 2017. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. *Anthropocene* 17, 13-29.
- Verburg P, Veldkamp W, Espaldon R, Mastura S, 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. [Environ. Manag. 30, 391-405](#).
- Verheijen FGA, Jones RJA, Rickson RJ, Smith CJ, 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. [Earth Sci. Rev. 94, 23-38](#).
- Voltz M, Ludwig W, Leduc C, Bouarfa S, 2018. Mediterranean land systems under global change: current state and future challenges. [Regional Environmental Change 18, 619-622](#).
- Xiao H, Li Z, Chang X, Huang B, Nie X, Liu C, Liu L, Wang D, Jiang J, 2018. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion. [Geoderma, 329, 73-81](#).
- Wainwright J & Parsons AJ, 1998. Sensitivity of sediment-transport equations to errors in hydraulic models of overland flow. In: Modelling soil erosion by water, Boardman J., Favis-Mortlock D. (eds). [SPRINGER-VERLAG, Berlin, pp. 271-284](#).
- Walker B, 1994. Global change extensive strategy agriculture options in the regions of the world. [Clim. Change 27, 39-47](#).
- Walling DE, 1983. The sediment delivery problem. [J. Hydrol. 65, 209-237](#).
- Warner RF, 2006. Natural and artificial linkages and discontinuities in a Mediterranean landscape: Some case studies from the Durance Valley, France. [Catena 6\(3\), 236-250](#).
- Wendling V, Peugeot C, Garcia-Mayor A, Hiernaux P, Mougin E, Walcker R, Grippa M, Kergoat L, Galle S, Lebel T, 2019. Drought induced regime shift and resilience of a Sahelian eco-hydrosystem. [Environmental Research Letters, 14\(10\)](#).
- Westoby M, Brasington J, Glasser N, Hambrey M, and Reynolds J, 2012: "Structure-from-Motion" photogrammetry: A lowcost, effective tool for geoscience applications. [Geomorphology 179, 300-314](#).
- Williams GP, 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events. [Journal of Hydrology 111, 89-106](#).
- Wischmeier WH & Smith DD, 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. [Agric. Handb. 537. USDA Science and Educ. Admin., Hyattsville, MD](#).
- Woodward JC, 1995. Patterns of erosion and suspended sediment yield in Mediterranean river basins, in: Foster IDL, Gurnell AM, Webb BW (Eds.), *Sediment and Water Quality in River Catchments*. [Wiley, Chichester, 365-389](#).
- Zehe E & Sivapalan M, 2009. Threshold behaviour in hydrological systems as (human) geoeosystems: manifestations, controls, implications. [Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 1273-1297](#).
- Zhu TX, 2016. Effectiveness of Conservation Measures in Reducing Runoff and Soil Loss Under Different Magnitude-Frequency Storms at Plot and Catchment Scales in the Semi-arid Agricultural Landscape. [Environmental Management 57, 671-682](#).

Lexique des principaux acronymes et abréviations utilisés

ANR : Agence Nationale de la Recherche
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CES : Conservation des Eaux et des Sols
CESBIO : Centre d'Études Spatiales de la BIOSphère
CLIFA : CLImat et Fonctionnement des Agro écosystèmes
DEA : Diplôme d'Études Approfondies
DIGISOL-HYMED : DIGItal SOiL Mapping by HYperspectral imagery for environmental modelling in MEDiterranean regions
DG ACTA : Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles
DGPS : Differential Global Positioning System
EC2CO : ECosphère Continentale et Côtière
ENGEES : École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg
IGE : Institut des Géosciences de Environnement
INAT : Institut National Agronomique de Tunisie
INRA : Institut National de Recherche Agronomique
INRGREF : Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêts (Tunis)
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
JRC : Joint Research Center
LISAH : Laboratoire d'études des Interactions entre Sols-Agrosystèmes-Hydrosystèmes
MESALES : Modèle d'Evaluation Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols
MESOEROS21 : MEDiterranean SOils EROSion and vulnerability to global change during the 21st century
MSEC : Multi-Scale Environmental Changes observatory
MISTRALS : Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales
MHYDAS : Modélisation HYdrologique Distribuée des AgroSystèmes
MHYDAS-PF : Plate-Forme de Modélisation HYdrologique Distribuée des AgroSystèmes
OMERE : Observatoire Méditerranéen de l'Eau et de l'environnement Rural
OpenFLUID : Software Environment for Modelling Fluxes in Landscapes
ORE : Observatoire de Recherches en Environnement
OSL : Optical Stimulated Luminescence dating
PESERA : Pan-European Soil Erosion Risk Assessment
SICMED : Surfaces et Interfaces Continentales Méditerranéennes
SIG : Systèmes d'Informations Géographiques
SOERE : Systèmes d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement
STREAM : Sealing and Transfer by Runoff and. Erosion related to Agricultural Management
USLE : Universal Soil Loss Equation

ANNEXES

ANNEXE 1 : Projet de thèse ayant obtenu un financement IRD-ARTS	80
ANNEXE 2 : projet CARAFE (version soumise à EC2CO en 2019)	89
ANNEXE 3 : sélection de tirés à part	96

ANNEXE 1 : Projet de thèse ayant obtenu un financement IRD-ARTS

Impact de l'érosion hydrique sur la redistribution spatiale et le devenir de la matière organique à l'échelle du paysage en contexte cultivé méditerranéen

Mots-clefs: érosion hydrique, matière organique, observatoire de recherche en environnement, bassin versant méditerranéen, qualité de la ressource en sol.

Contexte général

L'humanité est aujourd'hui confrontée à l'un de ses plus grands défis : assurer l'alimentation d'une population globale croissante tout en maintenant la durabilité des ressources naturelles. Le compartiment sol se trouve en premier plan pour apporter des solutions à ce défi. En fournissant une grande diversité de services écosystémiques primordiaux pour nos sociétés (Dominati et al., 2010, INRA, 2017), la ressource en sol se situe à la base même de la chaîne alimentaire. Cependant on estime à 12 millions d'hectares la surface perdue chaque année du fait de la dégradation des sols (Rickson et al., 2015), principalement du fait de l'érosion hydrique (Orr et al., 2017).

En région Méditerranéenne, la conjugaison de facteurs naturels et anthropiques favorise ce mode de dégradation (Raclot et al., 2018) si bien que la durabilité de la ressource en sol et de tous les services qui y sont rattachés n'est clairement plus assurée en de nombreux endroits (García-Ruiz et al., 2013). En Tunisie, l'érosion hydrique touche ainsi près de 3 millions d'hectares de sols agricoles. Elle constitue une menace majeure pour la production agricole de ce pays puisqu'elle affecte notamment la durabilité des retenues collinaires (*i.e.* comblement par envasement), la quantité et la qualité des sols (*i.e.* leur fertilité), et la qualité des eaux mobilisables puisque le transfert de bon nombre de contaminants se fait majoritairement sur la phase particulaire et organique.

La matière organique des sols (MOS) joue un rôle central de dans la fourniture des services écosystémiques rendus par les agrosystèmes (fig. 1). Elle constitue entre autres un facteur clé de la fertilité des sols. Malheureusement, une particularité des sols Méditerranéens est de présenter de très faibles teneurs en matière organique, bien souvent inférieures à 1 ou 2 % (EIP-Agri Focus Group, 2015). Ce constat très alarmant illustre la mise en place d'un cercle vicieux entre érosion et dégradation des sol sur le pourtour de la méditerranée : en mobilisant de façon privilégiée les horizons de surface les plus humifères, l'érosion hydrique fait décroître les teneurs en MOS, rendant ainsi le sol de plus en plus sensible à l'érosion. De nombreuses fonctions assurées par la matière organique comme la structure des sols, la rétention des nutriments et de l'eau et la purification de l'eau, le développement de la végétation ou encore le stockage du carbone se voient donc altérées (Albergel et al. 2006).

La lutte contre l'érosion des sols et la recherche d'une meilleure gestion de la fertilité des sols, notamment organique, sur le moyen et le long terme s'avère donc un enjeu majeur pour de nombreux pays méditerranéens, notamment sur la rive sud, pour lesquels l'agriculture est un secteur socioéconomique clé.

S'il existe un débat intense aujourd'hui pour savoir si l'érosion des sols est globalement source ou puits de carbone à l'échelle mondiale (Van Oost et al., 2007 ; Lal, 2003 ; Harden et al., 2008 ; Xiao et al., 2018), les faibles teneurs en MOS dans les parcelles agricoles sur le pourtour de la Méditerranée ne laissent peu de place au doute sur le bilan et la trajectoire en cours pour ce type de milieu. Malheureusement, les taux et vitesses actuels de transfert au sein des bassins versants, du fait de l'érosion hydrique, des sédiments et de la matière organique associée n'est qu'insuffisamment documenté bien qu'elle soit nécessaire pour : i) comprendre la redistribution et le devenir à plus long-terme de la matière organique au sein des paysages, et ii) orienter vers des stratégies de gestion conservatoire de la ressource en sol qui permettent la maintien, voire l'accroissement des teneurs en MOS au niveau des parcelles agricoles (Doetterl et al., 2016).

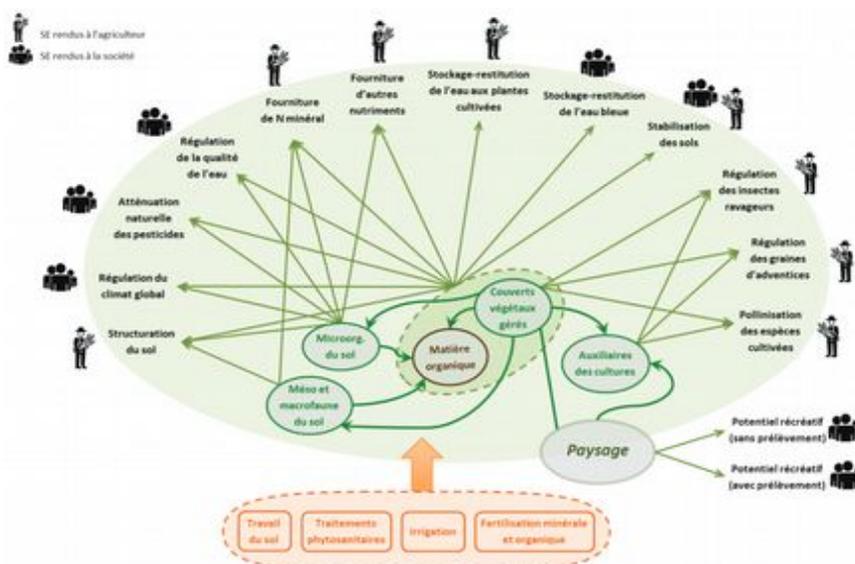


Fig. 1 : Représentation simplifiée des principaux leviers impliqués dans la fourniture des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles aux agriculteurs et à la société (INRA, 2017)

Enfin, on sait que le changement climatique risque d'accentuer l'érosion des sols du fait notamment de événements extrêmes plus fréquents (Regnier et al., 2013), ce qui entraînera mécaniquement une hausse de la redistribution de la matière organique au sein des bassins versants Méditerranéens. Une retombée secondaire d'une meilleure gestion conservatrice de la MOS concerne la lutte contre le réchauffement climatique. En effet, le stockage du carbone organique dans les sols pourrait augmenter bon nombre de services rendus par les sols (meilleure stabilité, hausse de la fertilité), et en même temps contrebalancer au moins partiellement l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (Beer et al, 2010 ; <http://4p1000.org/>), c'est-à-dire limiter le changement climatique. En Tunisie, le potentiel d'absorption associé à une meilleure gestion des sols est estimé au-delà de 50% de l'ensemble des émissions nationales, tous secteurs confondus (ANER, 2001 ; MEATDD, 2014).

Etat de l'art

Les matières organiques des sols (MOS), qui contiennent plus que 50% de C organique, influent directement sur la fertilité des sols par des fonctions physiques, chimiques et biologiques clés : elles sont source des nutriments et d'énergie pour les plantes et les microorganismes du sol, elles augmentent le potentiel de rétention de l'eau des sols, et elles contribuent à la rétention des polluants (Stockmann et al, 2013). Les MOS jouent également un rôle important par l'amélioration de la stabilité des agrégats, qui augmente la résistance des sols à l'érosion hydrique. En dehors des fonctions agronomiques, les MOS jouent un rôle environnemental clé comme i) la régulation des flux hydro-sédimentaires via le développement de la végétation ou le contrôle des propriétés hydrodynamiques comme la structure du sol (Le Bissonnais, 1996, Chenu et al., 2000), ou ii) la régulation du climat puisqu'elles constituent le plus gros réservoir superficiel de carbone organique (Lal, 2004 ; Stockmann et al., 2015 ; Minasny et al., 2017).

Les processus menant à la stabilisation des MOS à moyen et long terme sont (i) la protection physique grâce à l'inclusion des MO dans les agrégats du sol ou des micropores où elles ne sont plus accessibles pour les micro-organismes (Balesdent et al. 2000) et (ii) la protection physico-chimique grâce à une interaction MO-minéraux, cations complexants et/ou autres molécules organiques qui change la stéréométrie des molécules empêchant ainsi une attaque enzymatique (Baldock et Skjemstad, 2000). La plupart des études sur la stabilisation des MOS ont été effectuées dans des sols non carbonatés (Paul, 2016 ; Matus et al, 2014 ; Rumpel et al, 2009 ; Chabbi et al, 2009 ; Bahri et al, 2006). Travaillant sur des sols calcaires, Grunewald et al (2006) ont montré que l'accumulation des MOS est due essentiellement à l'attachement aux charges positives des minéraux argileux. Dans le même contexte Munneer et Oades (1989) et Paradelo et al, (2015) ont montré que le calcium (endogène ou apporté) joue un rôle important

dans le comportement physique du sol vu son pouvoir flocculant vis-à-vis des argiles et son rôle stabilisant des composés organiques, ainsi il contribue à l'organisation de la structure du sol et à sa stabilité.

Dans un contexte où la dégradation des sols par érosion hydrique impacte lourdement les potentialités agronomiques des sols, il est important de mieux comprendre l'impact de la redistribution du sol sur la redistribution et le devenir du carbone dans le sol en s'intéressant à la totalité des processus impliqués dans l'érosion des terres (Lal, 2003 et 2005). L'érosion hydrique des sols affecte les couches supérieures des sols où sont concentrées les MOS, ce qui entraîne un épuisement du carbone organique du sol des sites d'érosion (zones sources de sédiments). Cet épuisement du carbone organique impacte la capacité de rétention d'eau et des nutriments, génère un déséquilibre eau nutriment et perturbe les cycles hydrologiques si bien que les sols érodés ont une productivité primaire inférieure à celle des sols non érodés. Après leur détachement et au cours de leur transport, les MOS subissent bien souvent une dynamique de minéralisation (Lal, 2004) accrue par rapport au MOS resté en place. Les mécanismes mis en cause sont la dispersion des agrégats par l'érosion hydrique, ce qui expose les MOS à des processus microbiens de minéralisation. De plus, la fraction transportée par le ruissellement semble plus instable et facilement minéralisable, et 20 à 30% du carbone organique déplacé peut être perdu par émission vers l'atmosphère (Jacinthe et Lal, 2001). Ainsi, il a été suggéré que l'érosion du sol serait responsable d'une baisse des teneurs en carbone organique avec plus de 1GtC/an qui serait émis dans l'atmosphère par minéralisation (Lal, 2004). Cependant, les MOS érodées finissent bien souvent par se déposer, notamment au niveau d'infrastructures naturelles ou anthropiques du paysage (dépressions topographiques, haies, fossés, retenues collinaires, les banquettes anti-érosives, ...) où elles vont être enfouies et séjourner durablement (White, 2005). Les matériaux dispersés sont ainsi ré-agrégés et physiquement protégés.

Beaucoup de travaux récents ont cherché à évaluer le bilan de l'impact de l'érosion sur le stockage du carbone pour un enjeu de changement climatique. Ces bilans établis globalement à l'échelle continentale sont insuffisants pour répondre aux enjeux agronomiques qui nécessitent d'identifier finement les zones de pertes et de stockage de la matière organique. En effet un stockage de la matière organique dans des zones non cultivables comme le fond des barrages ne permet pas d'accroître la productivité agricole. Seule une identification fine des redistributions latérales de la matière organique par érosion hydrique nous permettra de prendre en compte les préoccupations d'ordre agronomique.

Par ailleurs, il existe des interactions complexes entre érosion, quantité et nature de la MOS. En effet, un élément majeur pour comprendre le comportement des MOS érodées est l'étude de leur nature. Les MOS sont constituées d'un continuum allant des MO fraîches aux MO stabilisées. Leur nature n'a pas été complètement élucidée à ce jour. On sait cependant que l'érosion est un processus sélectif qui affecte préférentiellement les MO légères (Rumpel et al., 2006). Toutefois, le type de MO érodée peut changer en fonction de l'intensité des pluies et des processus d'érosion actifs (Rodriguez et al., 2004 ; Rumpel et al., 2006). La comparaison de la nature et de la minéralisation potentielle de la MO dans les sédiments transportés et dans le sol en place constitue un élément de réponse. Cependant, le manque des données expérimentales, sous conditions naturelles, concernant la quantité et la nature des MOS mobilisées par l'érosion hydrique reste aujourd'hui un élément limitant pour progresser dans cette voie. Enfin, la majorité des travaux portant sur les flux latéraux de carbone se sont appuyés sur le suivi de la dynamique du carbone dissout uniquement (Aufdenkampe et al., 2011 ; Lauerwald et al., 2017 ; Regnier et al., 2013) alors que les flux de carbone particulaire ne peuvent pas être négligés en contexte Méditerranéen si l'on veut pouvoir déboucher sur des préconisations en matière de gestion conservatoire de la fertilité des sols méditerranéens. La bonne connaissance de ces flux et de leur impact sur le devenir du carbone est un pré-requis pour l'étude des mécanismes de transferts des nombreux éléments fortement adsorbés sur les sédiments et la matière organique comme le sont de nombreux contaminants.

Au final, seule une documentation fine en conditions naturelles des amplitudes des redistributions latérales du carbone organique sur un continuum source-transfert-puits, associée à une évaluation des dynamiques et des facteurs de contrôle (communautés microbiennes associées notamment) de

minéralisation au cours du transport permettra de progresser sur les vitesses et mécanismes impliqués dans le devenir du carbone (organique) à l'échelle du paysage (Doetterl et al., 2016 ; Xiao et al., 2018).

Objectif de la thèse

L'objectif de ce projet de thèse est d'étudier, en conditions naturelles, l'impact de l'érosion hydrique sur les flux et la dynamique de dégradation du carbone organique sur un continuum source-transport-dépôt en contexte cultivé méditerranéen afin de répondre aux questions suivantes :

1. Combien de carbone un bassin versant agricole méditerranéen, en milieu carbonaté, a-t-il en stock dans ses sols, comment ce carbone est-il réparti au sein du bassin versant, et combien en exporte-t-il par an ?
2. Où sont les zones qui perdent du carbone, celles qui en emmagasinent, à quelle vitesse et pourquoi ?
3. Quelle est la nature et la dégradabilité des MOS sur le continuum source-transport-dépôt ?
4. Quel est l'impact de l'érosion hydrique sur l'évolution du potentiel agronomique et des propriétés contrôlant les flux d'eau et de matières associées à l'échelle du paysage ?

Site d'étude

Ce travail sera réalisé sur un bassin versant appartenant à l'Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) OMERE (Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau : <http://www.obs-omere.org/>) labélisé depuis 2002. Il s'agit du bassin de Kamech, qui est situé au nord du Cap-Bon (Tunisie). La pluviométrie inter-annuelle moyenne est d'environ 620 mm. L'exutoire du bassin est occupé par un lac collinaire (140 000 m³ de contenance) qui constitue une zone de piégeage de la quasi-totalité des sédiments (taux de piégeage supérieur à 90%). L'occupation des sols se caractérise par un taux de mise en culture proche de 75 % dominés par les céréales et les légumineuses. Ce bassin fait l'objet d'un suivi des pratiques agricoles ; des flux d'eau et de matières associées depuis 1994 à son exutoire, et sur plusieurs stations hydrométriques emboîtées depuis 2005 (Inoubli et al, 2017). Une première campagne de mesures des teneurs en carbone organique dans les sols a été menée en 2017 dans le cadre du projet ARIMNet2 « MASCC », et un suivi de ces teneurs dans les sédiments transportés au cours des crues a été engagé à l'été 2017 dans la cadre du projet ERANET-MED « ASSESS ».

Démarche scientifique

L'originalité de la thèse est de proposer une démarche qui allie un suivi des flux de carbone depuis les zones sources de sédiments jusqu'aux principales zones de dépôt, avec une caractérisation de la biodégradabilité du carbone organique pour permettre de dresser une vue globale de la dynamique du carbone organique sur le continuum source-transport-dépôt des sédiments comme préconisé par plusieurs auteurs (Stallard, 1998; Battin et al, 2008 ; Doetterl et al., 2016 ; Xiao et al., 2018).

Cette thèse s'appuiera sur le dispositif existant de l'ORE OMERE (Kamech) pour lequel les flux hydro-érosifs ont été intensément étudiés (e.g. Inoubli et al, 2017). Elle complétera et poursuivra les actions engagées autour du carbone dans le cadre du projet ARIMNet2 MASCC (pour l'analyse du carbone en place dans les sols) et du projet EranetMED ASSESS (pour le suivi du flux de carbone à l'exutoire de plusieurs bassins dont Kamech).

La démarche reposera sur :

- une caractérisation d'une dizaine de fosses pédologiques pour représenter au mieux la diversité des sols au sein de Kamech
- un suivi des flux d'eau, de sédiments et de carbone, sur 5 années hydrologiques (2017-2022) et sur 4 stations au sein du bassin de Kamech

- une caractérisation des MO (flux, stock et nature) dans les sédiments transportés et dans diverses zones de dépôt situées aussi bien en position intermédiaire de versant (au niveau d'une paléo-ravine par exemple) que dans les sédiments piégés au sein de barrages (à l'aide de carottages).

Le travail sera décomposé en cinq parties :

Partie 1 : Une analyse bibliographique sera menée afin d'identifier le lien entre les processus majeur de l'érosion hydrique dans le contexte méditerranéen et la fertilité des sols érodés d'une part, et de mieux cerner les méthodes analytiques et les protocoles expérimentaux compatibles avec le contexte pédologique de l'étude (sols carbonatés, faibles teneurs en MOS,...) d'autre part.

Partie 2 : Une deuxième partie portera sur l'analyse quantitative du carbone en place dans les sols de Kamech (composante organique et inorganique). Cette caractérisation s'appuiera sur une dizaine de profils choisis pour couvrir au mieux la diversité du paysage au sein du bassin (occupation du sol, pédologie, niveau de pente,...) et pour lesquels nous disposons d'une caractérisation fine incluant i) une description pédologique fine de chaque profil, ii) des analyses physico-chimiques sur les différents horizons identifiés (texture, pH, CEC, CC, PF, Carbone organique et inorganique, etc). De nouveaux profils seront décrits et analysés sur différentes zones de dépôt, et des approches complémentaires (géophysiques, datation) seront conduites pour mieux cerner l'extension spatiale (stock) et l'histoire de ces dépôts (rythme de dépôt, provenance des sédiments, ...). Toutes ces données serviront à comprendre l'organisation spatiale du stock de carbone dans le sol et dériver un bilan complet du carbone contenu au sein des sols en place à Kamech. Des analyses de la structure du sol (stabilité structurale) seront également réalisées sur les horizons de surface, afin de mieux comprendre l'impact de la redistribution du sol et du carbone sur l'évolution de l'érodibilité des sols.

Partie 3 : Cette partie concernera le suivi des flux latéraux actuels de carbone au niveau du bassin versant de Kamech. Pour ce faire, ce projet de thèse s'appuiera sur les stations hydrométriques emboîtées de l'ORE (parcelle, sous-bassin, oued en amont de la retenue, pour lesquelles débit et érosion sont mesurés depuis 2005), qui ont été complétées à l'été 2017 par l'installation de préleveurs automatiques complémentaires pour les analyses de carbone. Ce suivi sera poursuivi tout au long de la thèse, permettant d'acquérir au total 5 années hydrologiques complètes de suivi des flux d'eau, de sédiment et de carbone sur un emboîtement d'échelles spatiales allant de 1 ha à quelques km². À chaque exutoire et pour chaque crue, les flux de carbone sous forme dissoutes et particulaire, organique et inorganique, seront quantifiées. Un bilan des exportations de carbone sous chaque forme sera alors dressé sur chaque station et analysé pour comprendre l'effet de la distance de transfert sur les flux du carbone transportés lors des crues.

Partie 4 : Cette partie concerne l'analyse qualitative de la matière organique en vue de relier les dynamiques rapides de redistribution latérale du carbone organique par érosion avec le devenir à plus long-terme de ces MOS, afin d'estimer le temps de résidence des MOS érodées par exemple. Pour cela la nature chimique des MOS érodées sera étudiée et reliée à leur stabilité à la dégradation microbienne. Afin de caractériser la vitesse et l'intensité de la dégradation microbienne, des incubations au laboratoire (28°C, à l'obscurité et durant 2 à 3 mois) seront donc conduites sur les MO couvrant le continuum source-transport-dépôt, à savoir dans i) les MO des sols en place (au niveau des profils de sol étudiés) ; ii) les MO transportés sous forme particulaire (sédiments déplacés lors des crues) ; iii) les MO piégées au niveau des zones de dépôts investiguées (dépôts intermédiaires de versant et dépôts au niveau de la retenue via des carottages). Cette caractérisation sera complétée par une identification des communautés microbiennes impliquées dans les processus de dégradation. L'analyse des PLFA (PhosphoLipid Fatty Acid : PLFA) (Findlay et al. 1993, 1996), qui permet la détection de rapides changements dans les communautés microbiennes, sera mobilisé à cet effet à travers une collaboration conduite avec Cornelia Rumpel de IESS.

Partie 5 : Cette dernière partie synthétisera les résultats dérivés des parties précédentes pour établir un bilan de l'impact de l'érosion hydrique sur la dynamique de redistribution de la matière organique au

sein du bassin versant et de ses répercussions en matière de stabilité et de fertilité des sols. Elle tentera de formuler des préconisations pour une meilleure gestion conservatoire de la ressource en sol qui permettent de maintenir la matière organique au sein des parcelles agricoles.

Collaborations de l'équipe de recherche impliquée dans l'encadrement de ce travail de thèse

La thèse sera co-dirigée par Haithem Bahri (INRGREF, Tunis, agro-pédologue spécialiste de la dynamique des matières organiques en Tunisie) et Damien Raclot (IRD-LISAH, Montpellier, hydrologue spécialiste du suivi des flux d'eau et de matières associées dans les bassins versants méditerranéens).

L'encadrement sera en outre complété par Mohamed Annabi (INRAT, Tunis, agronome spécialiste de la dynamique des matières organiques en lien avec les pratiques agricoles dans les sols cultivés), Cornelia Rumpel (IEES, géochimiste spécialiste de la dynamique des matières organiques), et Guillaume Coulouma (INRA, LISAH, pédologue).

Les principales équipes de recherche impliquées dans l'encadrement de cette thèse (INRGREF, UMR LISAH, INRAT et IEES) collaborent ensemble depuis longtemps à travers l'encadrement d'étudiants ou des projets de recherche, à savoir :

- Laboratoire Mixte International (LMI-NAILA) créé en 2016
- Observatoire de Recherche en Environnement (ORE)-OMERE (Observatoire Méditerranéen sur l'Erosion, le Ruissellement et l'Environnement en Tunisie (<http://www.obs-omere.org/>)).
- Projet de recherche ARIMNet2 MASCC (Mediterranean Agricultural Soils Conservation under global Change ; 2016-2019).
- Projet de recherche ERANETMED ASSESS (impacts and feedbacks between climate and Soil affected by Erosion: cost in terms of carbon Storage in Mediterranean regions ; 2017-2020).
- Projet EC2CO « CARAFE : Caractérisation et génèse des sols spécifiques à l'environnement des Ravines et Fossés agricoles en Méditerranée » (coord. G. Coulouma) en cours d'évaluation.
- Convention cadre entre l'Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêts (INRGREF) et l'Institut de Recherche Développement (IRD) qui est signée depuis 2002.
- Des premiers travaux de recherche initiés sur cette thématique à Kamech entre les 4 laboratoires (Annabi, 2017 ; Bahri et al, 2010 a et b ; Ben Slimane et al, 2013 ; Raclot et al, 2018, Lagacherie et al., 2018).

Cadre de la thèse

Ce travail de thèse s'inscrit dans les activités de l'ORE OMERE, du LMI NAILA et du PSIP « GéoRessources de la zone critique sub- et inter-tropicale et Environnement: Valorisations, impacts et Développement humain».

Il bénéficiera :

- du dispositif mis en place par l'ORE OMERE et des compléments réalisés dans le cadre des projets MASCC (pour les profils de sol) et ASSESS (pour le suivi du carbone à l'exutoire de Kamech).
- d'un soutien technique du personnel de l'observatoire
- de moyens financiers de l'observatoire et du projet ERANETMED ASSESS et du projet CARAFE s'il est accepté.
- des moyens analytiques présents au laboratoire Ecogéochimie isotopique (IsoEco) sous la supervision de Cornelia Rumpel (analyseur CHN, chambres d'incubation, mesure isotopiques, PLFA ...)

- des moyens analytiques présents à l'INRGREF et à l'INRAT (centrifugeuse, chambres d'incubations, ...)
- du cadre de réflexion collective induite au sein du LMI NAILA, et du PSIP « Séquestration du carbone ».

Impacts attendus

Les principaux impacts attendus de la thèse sont :

- une documentation des flux latéraux de carbone organique et inorganique sur la phase dissoute mais également sur la phase particulaire, sur un continuum allant du sol en place jusqu'au dépôt à l'exutoire d'un bassin versant de plusieurs km².
- une caractérisation de la dynamique de dégradation du carbone en contexte carbonaté méditerranéen sur du sol en place, du sédiment en transport, du sédiment redéposé.
- une meilleure compréhension du fonctionnement de la zone critique à travers des avancées sur le rôle de l'érosion hydrique en matière d'évolution dans le temps et l'espace des teneurs en MOS, grâce à un bilan complet et fortement documenté de la dynamique du carbone dans toutes les phases de sa redistribution.
- des propositions pour une meilleure gestion conservatoire de la ressource en sol à des fins de productions agricoles et de régulation des flux d'eau et de matières associées
- une ouverture vers la communauté travaillant sur la séquestration de carbone dans un objectif de réchauffement climatique pour une meilleure prise en compte des flux latéraux de carbone sur phase particulaire dans les modèles globaux du devenir du C.

Au final, la thèse contribuera principalement

- au volet 2 « Fonctionnements biophysiques sous influence anthropique » du LMI Naila et au PSIP « GéoRessources de la zone critique sub-et inter-tropicale et Environnement: Valorisations, impacts et Développement humain»;
- aux ODD 2 « Faim zéro », 15 « Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres » et 17 « Partenariats pour la réalisation des objectifs » ;
- à la consolidation d'un partenariat franco-tunisien autour d'un observatoire, avec la mise en synergie de spécialités complémentaires (agronomie, géochimie, hydrologie, pédologie).

De façon plus secondaire, ses contributions pourront s'inscrire dans le PSIP « Séquestration continentale du carbone » et l'ODD 13 « Mesures relatives à la lutte contre le réchauffement climatique » et alimenter les initiatives pluri-institutionnelles comme « 4P1000 des sols pour la sécurité alimentaire et le climat » ou « Adaptation pour l'Agriculture Africaine » (AAA).

Mobilité

Le candidat sera amené à partager son temps de travail entre la Tunisie (environ 8 mois par an) et la France (environ 4 mois par an). En Tunisie, il sera basé dans le laboratoire commun INRGREF/INRAT, alors que ses séjours en France se feront à Montpellier (LISAH) avec des missions à Paris (IEES) afin de réaliser les analyses au sein du laboratoire d'Ecogéochimie isotopique (ECO_ISO).

Références bibliographiques

- Albergel Jean, Mansouri T., Zante Patrick, Ben Mamou A., Abdeljaoued S. In Roose Eric (ed.), Lal R. (ed.), Feller Christian (ed.), Barthès Bernard (ed.), Stewart B.A. (ed.) Soil erosion and carbon dynamics Source. Boca Raton : Taylor et Francis, 2006, p. 289-299. (Advances in Soil Science). ISBN 978-1-56670-688-2
- Annabi M., Raclot D., Bahri H., Bailly J.S., Gomez C., Le Bissonnais Y. (2017). Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. *Catena*, 153: 157-167. doi: 10.1016/j.catena.2017.02.010

- ANER, 2001. Agence nationale des énergies renouvelables : émissions de gaz à effet de serre en Tunisie. 24 p.
- Aufdenkampe, A. K., Mayorga, E., Raymond, P. A., Melack, J. M., Doney, S. C., Alin, S. R., Aalto, R. E., and Yoo, K. (2011): Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9:53-60.
- Bahri H., Dignac M.-F., Rumpel C., Rasse D.P., Bardoux G., Chenu C., Mariotti A., 2006. "Lignin turnover kinetics in an agricultural soil is monomer specific". *Soil Biology & Biochemistry* 38 (7) : 1977-1988.
- Bahri H., Annabi M., Raclot D. Rumpel C. 2010a. Stocks and microbial degradability of organic matter in calcareous subsoil under agriculture in the Mediterranean basin. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 02-07 May 2010.
- Bahri H., Annabi M., Raclot D., Rumpel C. 2010b. Organic matter dynamics in agricultural calcareous soil in the North-East of Tunisia. Colloque SOM 2010 "Organic matter stabilization and ecosystem functions", Presqu'île de Giens (France), 19-23 septembre 2010.
- Baldock, J.A., and Skjemstad, J.O., 2000. Role of the mineral matrix and minerals in protecting natural organic materials against decomposition, *Org. Geochem*, 31, 697-710.
- Balesdent, J., chenu, C., Balabane. M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53, 215-230.
- Battin, T.J., Kaplan, L.A., Findlay, S., et al. (2008), Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. *Nature Geoscience*, 1, 95-100.
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Arain, M.A., Baldocchi, D., Bonan, G.B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luysaert, S., Margolis, H., Oleson, K.W., Rouspard, O., Veenendaal, E., Viovy, N., Williams, C., Woodward, F.I., Papale, D., 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, 329, 834-838.
- Ben Slimane, A., Raclot, D., Evrard, O., Sanaa, M., Lefèvre, I., Ahmadi, M., Tounsi, M., Rumpel, C., Ben Mammou, A., Le Bissonnais, Y., 2013. Fingerprinting sediment sources in hillside reservoir within a cultivated catchment of Tunisia. *Journal of Soils and Sediments*, 13: 801-815. doi: 10.1007/s11368-012-0642-6.
- Chabbi, A., I. Kögel-Knabner., C. Rumpel. 2009. Stabilised carbon in subsoil horizons is located in spatially distinct parts of the soil profile. *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 41, Issue 2, Pages 256-261
- Chenu C., Le Bissonnais Y., Arrouays D. 2000. Organic Matter Influence on Clay Wettability and Soil Aggregate Stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1479-1486
- Doetterl, S., Berhe, A.A., Nadeu, E., Wang, Z., Sommer, M., Fiener, P., 2016. Erosion, deposition and soil carbon: a review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth Sci. Rev.* 154, 102-122
- Dominati E, Patterson M, Mackay A, 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69(9), 1858-1868.
- EIP-Agri Focus Group, 2015. Soil organic matter content in Mediterranean regions. Final Report EIP-Agri Focus Group. March 2015. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_fg_soil_organic_matter_final_report_2015_en_0.pdf
- García-Ruiz JM, Nadal-Romero E, Lana-Renault N, Beguería S, 2013. Erosion in Mediterranean landscapes: changes and future challenges. *Geomorphology* 198, 20-36.
- Grünewald G., Kaiser K., Jahn R., Guggenberger G. 2006. Organic matter stabilization in young calcareous soils as revealed by density fractionation and analysis of lignin-derived constituents. *Org. Geochem.* 37: 1573-1589
- Harden JW, Berhe AA, Torn M et al. (2008). Soil erosion: Data say C sink. *Science*, 320, 178-179.
- INRA. 2017. Les services écosytémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Résumé de l'étude EFESSE. 12p. (<https://inra-dam-front-resources-cdn.wedia-group.com/ressources/afile/415424-07dbc-resource-efese-services-ecosystemiques-rendus-par-les-ecosystemes-agricoles-resume-francais.pdf>)
- Inoubli N., Raclot D., Mekki I., Moussa R., Le Bissonnais Y. 2017. A spatio-temporal multiscale analysis of runoff and erosion in a Mediterranean marly catchment. DOI:10.2136/vzj2017.06.0124
- Jacinthe, P.A., and Lal, R., 2001. A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosional events. *Land degradation & Development*, 12, 329-339.
- Lagacherie P., Álvaro-Fuentes J., Annabi M., Bernoux M., Bouarfa S., Douaoui A., Grünberger O., Hammani A., Montanarella L., Mrabet R., Sabir M., Raclot D. (2018). Managing Mediterranean Soil resources under global changes. *Regional Environmental Change*, 18(3): 663-675.

- Lal, R., 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29(4), 437-450
- Lal, R. 2004, Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623-1627.
- Lal, R. 2005. Soil erosion and carbon dynamics. *Soil & Tillage Research* (81), 137-142.
- Lauerwald, R., Regnier, P., Camino-Serrano, M., Guenet, B., Guimberteau, M., Ducharne, A., Polcher, J., and Ciais, P. 2017. ORCHILEAK (revision 3875): a new model branch to simulate carbon transfers along the terrestrial-aquatic continuum of the Amazon basin. *Geosci. Model Dev.* 10: 3821–3859.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil science*. 47: 425-431.
- Matus, F., C. Rumpel., R. Neculman., M. Panichini., M.L. Mora. 2014. Soil carbon storage and stabilisation in andic soils: A review. *CATENA*, Volume 120, Pages 102-110
- MEATDD, 2014. Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques: Premier rapport biennal de la Tunisie/ 106 p.
- Minasny, B., Malone, B., McBratney, A., Angers, D., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z., Cheng, K., Das, B., Field, D., Odeh, I., Padarian Campusano, J., Stockmann, U., et al (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86.
- Munneer, M., Oades, J.M., 1989. The role of VAM-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and Models. *Aust. J. Soil. Res*, 27: 411-423.
- Orr, B.J., Cowie, A.L., Castillo Sanchez, V.M., Chasek, P., Crossman, N.D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G.I., Minelli, S., Tengberg, A.E., Walter, S., Welton, S., 2017. Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn, Germany 978-92-95110-42-7 (hard copy), 978-92-95110-41-0 (electronic copy).
- Paradelo, R., Virto, I., Chenu, C., 2015. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 202 (2015) 98–107.
- Paul, E.A. 2016. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 98, Pages 109–126
- Raclot D., Le Bissonnais Y., Annabi M., Sabir M., Smetanova A. (2018). Main issues for preserving Mediterranean soil resources from water erosion under global change. *Land Degradation & Development*. DOI: 10.1002/ldr.2774
- Rickson, R.J., Deeks, L.K., Graves, A., Harris, J.A.H., Kibblewhite, M.G., Sakrabani, R. (2015): Input constraints to food production: the impact of soil degradation, *Food Security*, 7(2): 351-364.
- Regnier, P., Frielingstein, P., Ciais, P. et al., 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 6, 597-607.
- Rodriguez Rodriguez, A., Guerra, A., Arbelo, C., Mora, J.L., Gorrin, S.P., Armas, C., 2004. Forms of eroded soil organic carbon in andosols of the Canary Islands (Spain). *Geoderma*, 121, 205-219.
- Rumpel, C., Chaplot, V., Planchon, O., Bernadou, J., Valentin, C., Mariotti, A., 2006. Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture. *Catena* 65, 30-40.
- Rumpel, C., Chabbi, A., Nunan, N., Dignac, M.-F., 2009 : Impact of land use change on the molecular composition of soil organic matter. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85, 431-434.
- Stallard, R.F., 1998. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global biogeochemical cycles*, 12, 231-257.
- Stockmann, U., Adams, M., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., de Courcelles, V., de R., Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P.C., Chenu, C., Jastrow, J., Lal, R., Lehmann, C.J., O'Donnell, A.G., Parton, W.J., Whitehead, D., Zimmermann, M., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric. Ecosyst. Environ.* 164, 80–99.
- Stockmann, U., Padarian, J., McBratney, A., Minasny, B., de Brogniez, D., Montanarella, L., Hong, S.Y., Rawlins, B.G., Field, D.J., 2015. Global soil organic carbon assessment. *Glob. Food Sec.* 6, 9–16.
- Van Oost, K., Quine, T.A., Govers, G., De Gryze, S., Six, S., Harden, J., Ritchie, J.C., McCarty, G.W., Heckrath, G., Kosmas, C., Giraldez, J.V., Marques Da Silva, J.R and Merckx, R., 2007. The impact of agricultural Soil Erosion on the Global Carbon Cycle. *Science*, 318-626.
- White S. 2005. Sediment yield prediction and modelling. *Hydrol. Process.* 19, 3053–3057.
- Xiao, H., Li, Z., Chang, X., Huang, B., Nie, X., Liu, C., Liu, L., Wang, D., Jiang, J., 2018. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion. *Geoderma*, 329, 73-81.

ANNEXE 2 : projet CARAFE (version soumise à EC2CO en 2019)

Caractérisation et génèse des sols spécifiques à l'environnement des Ravines et Fossés agricoles en méditerranée (CARAFE)

Mots-clefs: Fossé agricole, paléo-ravine, géophysique, érosion/dépôt, analyse rétrospective, datation, sol, observatoire

Etat de l'art et contexte du projet de recherche

Le fonctionnement hydrologique (transfert d'eau et de matières associées) des bassins versant est fortement impactés par les réseaux de drainage en surface, éléments clés de la connectivité hydro-sédimentaire. Ces réseaux peuvent être d'origine naturelle (dépressions initiées par le ravinement) ou anthropique (fossés). En interceptant les flux provenant des versants amont, ces éléments linéaires constituent des chemins préférentiels pour le transfert de l'eau de ruissellement avec ses matières associées (sédiments, matières adsorbées). En fonction des caractéristiques locales (pente, végétalisation,...) et du fonctionnement des zones amont, les éléments linéaires peuvent être le siège d'ablation (*i.e.* érosion linéaire par ravinement ou sapement de berges), être à l'équilibre (*i.e.* ablation et dépôt se compensent) ou être le siège d'accumulation de sédiments provenant de l'amont (*i.e.* lorsque les processus de dépôt dominant). Les sols situés dans l'environnement proche de ces éléments linéaires sont donc le fruit d, mais aussi un peu t méthodologique.ge, mais cela peut prpendant sans doute de l'e. son évolution (on pourrait mépot/singulière'interactions complexes entre les caractéristiques de l'élément linéaire et les processus hydro-érosifs qui se déroulent localement et à l'amont. Ces interactions complexes évoluent au cours du temps en fonction des forçages climatiques et anthropiques. En milieu Méditerranéen, le fonctionnement hydrologique très intermittent de ces éléments ajoute une complexité supplémentaire, avec de longues périodes sans ruissellement entrecoupées de rares événements très intenses. Les sols ainsi constitués immédiatement autour des éléments linéaires sont donc très singuliers. En effet, ils se démarquent des autres sols du paysage par le fait qu'ils sont le fruit d'une morphogénèse très marquée associée à une pédogénèse spécifique liée à leur position de bas-fond. Si ces sols ne représentent qu'une surface très limitée des bassins versant, plusieurs études montrent qu'ils peuvent jouer un rôle majeur sur le fonctionnement de la zone critique en contrôlant notamment de façon significative i) les échanges nappe/rivière (Dagès et al., 2009) ii) le développement de la végétation (Herzon et Helenius, 2008 ; Curran et Hession, 2013) et iii) le devenir des matières transportées comme les polluants (Stehle et al., 2011). Malgré leur rôle majeur, les sols situés dans l'environnement proche des linéaires sont pourtant peu étudiés (Vaughan et al., 2010 ; Dollinger et al., 2018). A ce jour, le manque de connaissance de leur extension latérale et verticale, de leurs propriétés physico-chimiques et de leur génèse constitue un verrou majeur pour mieux comprendre le rôle de ces éléments sur les fonctions rendues par le paysage.

Les formations colluviales de bas de versant (Eriksson et al., 2000 ; Smetanova et al., 2017) et les alluvions de tête de bassin versant (Fuchs et al., 2010) sont en effet des lieux privilégiés pour reconstituer l'érosion récente et ancienne des versants. Quelques travaux ont cherché à comprendre et reconstituer l'histoire des versants à partir d'observations dans les zones de dépôt de paléo-ravines principalement dans des conditions de dépôts favorables en Europe centrale (Dotterweich et al., 2012 ; Dotterweich et al., 2013). Ces dépôts représentent une archive des processus morphogénétiques des versants (événements extrêmes inclus) sur des temps longs (plusieurs centaines ou milliers d'années) qui viennent très utilement compléter les documentations réalisées à travers les dispositifs d'observation long terme de la zone critique (quelques décennies au mieux). En milieu Méditerranéen, les zones de dépôts au droit d'anciennes ravines (paléo-ravines) et de fossés agricoles proviennent de remplissages successifs entrecoupés de période d'exportations. La reconstitution de l'histoire des remplissages est de ce fait plus compliquée.

Cependant cette compréhension des sols au droit des linéaires (*i.e.* nature, géométrie, propriétés, etc) est une source d'information indispensable pour (i) caractériser l'extension et la nature des zones de dépôts, (ii) comprendre et quantifier comment ces zones contrôlent les flux d'eau et de matières associées, et (iii) quantifier l'intensité et la chronologie des processus d'érosion des versants situés en amont de ces zones de dépôts sur le long-terme. En permettant une confrontation des dynamiques hydro-sédimentaires avec les forçages anthropiques et climatiques sur des temps bien plus longs que ceux permis par l'observation directe, ce projet vise à améliorer la prédiction de l'évolution des propriétés fonctionnelles de ces éléments clés de la zone critique dans un contexte de changement global.

Les techniques géophysiques constituent aujourd'hui une approche indispensable pour la détermination de la variabilité spatiale des discontinuités au sein du sol (profondeur de l'altérite, géométrie d'horizons de sol). La tomographie de résistivité électrique (ERT) est une méthode précise en présence de contrastes de résistivité (Coulouma et al., 2013). En milieu très conducteur peu contrasté, la tomographie peut également être utilisée lorsque les conditions d'humectation du sol sont favorables (Coulouma et al., 2018). La combinaison de l'ERT avec l'analyse des ondes de surfaces (MASW) est considérée comme une solution efficace pour cartographier la profondeur de sol en condition peu contrastée de sol méditerranéen (Coulouma et al., 2012). D'autres techniques comme la sismique réfraction présentent un potentiel intéressant pour cartographier ces dépôts. À notre connaissance, l'utilisation de techniques géophysiques pour cartographier la nature et la profondeur des dépôts ravinaires et de fossés agricoles (de nature également peu contrastée par rapport aux sols et roches encaissantes) n'a pas été testée.

Des techniques de datation sont également disponibles pour recadrer temporellement l'histoire des dépôts et apporter ainsi des éléments nouveaux sur l'histoire de la morphogénèse des versants. La détection d'éléments radioactifs tels que le Cs137 dans les horizons permet d'attribuer les dépôts à une période ultérieure au milieu du siècle dernier (émissions liées aux essais nucléaires et à l'accident nucléaire de Tchernobyl). Dans le même sens, des marqueurs métalliques des activités anthropiques historiques peuvent être utilisés en tenant compte du contexte de l'occupation humaine du bassin versant étudié (Véron et al., 2018). Dans le cas des fossés agricoles du Languedoc, une analyse de la teneur en Cuivre dans les horizons de dépôts permet probablement d'identifier les dépôts postérieurs à l'utilisation du cuivre en viticulture (*i.e.* fin du 19^e siècle). Pour les périodes antérieures aux activités humaines intensives, les techniques de datation par luminescence stimulée optiquement (OSL, Sanderson et Murphy, 2010) permettent de dater le début de l'enfouissement sédimentaire à travers la mesure du temps de décroissance radioactive des quartz depuis leur dernière exposition au soleil. Enfin, la datation au carbone 14 constitue une alternative de datation en cas de présence de résidus de matière organique et de charbons dans les dépôts.

Objectif général et questions de recherche traitées

L'objectif général du projet est de proposer un modèle conceptuel de l'histoire des processus de dépôt/reprise de matériaux explicatif de la mise en place des sols au droit des linéaires en contexte méditerranéen en s'appuyant sur la caractérisation de la géométrie et des propriétés des dépôts au droit de talwegs naturels (paléo-ravines) et de talwegs anthropiques (fossés agricoles). Plusieurs questions de recherches seront traitées au cours du projet.

Sur le plan méthodologique :

- Peut-on caractériser les différents dépôts successifs en combinant des méthodes géophysiques non destructives (combinaison de tomographie de résistivité électrique et de sismique de surface) ?
- Les techniques de datation relatives et absolues sont-elles efficaces pour définir un cadre temporel pour les différents remplissages identifiés ?

Sur le plan cognitif :

- Est-on capable d'établir, à partir des caractérisations et datations, un modèle conceptuel reflétant l'histoire de la mise en place de ces sols au droit des éléments linéaires ?
- Peut-on documenter les impacts respectifs des différents forçages naturels et anthropiques sur des temps longs (siècle/millénaire), et approfondir l'analyse de ces impacts déduite des enregistrements climatiques, hydrologiques et agricoles intensifs réalisés depuis quelques décennies sur les deux sites de l'observatoire de recherche en environnement OMERE ?

Caractère innovant et prise de risque

L'idée du projet est de caractériser les déterminants de la mise en place de deux systèmes d'écoulement au sein de versants en milieu semi-aride méditerranéen avec des forçages naturels et anthropiques contrastés. Cette idée repose sur la similitude des deux systèmes en matière de fonctions exercées au sein des versants et de la nécessité de caractériser ces éléments singuliers, peu étudiés dans la littérature. Une avancée cognitive est attendue sur la pédologie spécifique de ces éléments, séparément très peu étudiés à ce jour et jamais étudiés de façon conjointe. Cette perspective est primordiale pour l'étude des fonctions importantes associées à ces éléments. L'utilisation d'une combinaison des méthodes géophysiques (ERT, sismique réfraction, MASW...) est une méthodologie innovante pour documenter, de façon non invasive, les caractéristiques et la géométrie profonde des dépôts au niveau des ravines et fossés agricoles. La mise en œuvre de techniques de datation relative et absolue est innovante pour ces éléments qui ne sont pas considérés comme pleinement conservatifs, à l'inverse de dépressions endoréiques ou retenues collinaires. Des résultats positifs sur cet aspect seraient une avancée significative.

Le premier niveau de risque est lié au choix des méthodes géophysiques proposées, prometteuses mais encore non testées dans des conditions spécifiques rendant difficile l'utilisation des modèles d'inversion classique en géophysique: (i) matériaux et horizons peu contrastés, (ii) de fortes irrégularités des épaisseurs des horizons de dépôts souvent associées à une irrégularité de la topographie. Le second niveau de risque identifié repose sur la qualité de l'archive sédimentaire investiguée. En effet, la reconstitution de l'histoire des différents remplissages à partir d'une archive des dépôts incomplète, puisque potentiellement tronquée par des épisodes érosifs intercalés, peut s'avérer difficile. En outre, cette archive sédimentaire peut avoir été très fortement modifiée par l'activité anthropique, notamment dans le cas des fossés agricoles.

Actions proposées, méthodologies et calendrier

Le projet s'inscrit dans la compréhension du fonctionnement de la zone critique. Les sites expérimentaux du projet seront choisis au sein des versants de l'Observatoire de Recherche en Environnement OMERE (Molenat et al., 2018), qui réunit un bassin versant expérimental en France (Languedoc) et un autre en Tunisie (Cap Bon) et qui fait partie de l'IR OZCAR. Le projet bénéficiera ainsi des nombreux résultats déjà acquis en matière de processus hydro-érosifs et de suivi des activités agricoles sur ces bassins. Il s'articule aussi avec le sujet de thèse intitulé "Impact de l'érosion hydrique sur la redistribution spatio-temporelle et le devenir de la matière organique à l'échelle du paysage en contexte méditerranéen" qui sera déposé auprès de l'IRD pour 2020 et qui exploitera le suivi des flux de carbone réalisés sur les différentes stations de l'ORE depuis 2017 dans le cadre du projet ERANETMED ASSESS. Par ces choix, le montage de projets ultérieurs plus ambitieux permettant d'agréger la variété de compétences disciplinaires requises pour étudier la complexité du fonctionnement de la zone critique sera facilité. Comme toutes les données recueillies sur ce dispositif d'observation long terme, les données acquises au cours de ce projet seront documentées et bancarisées au sein d'une base de données accessible à tous via le site web d'OMERE (<https://www.obs-omere.org/fr/donnees>) par exemple.

Connaissances préliminaires acquises sur les bassins d'OMERE

De nombreux travaux basés sur les dispositifs d'observation intensifs ont permis de documenter la dynamique spatio-temporelle du fonctionnement hydro-sédimentaire des 2 bassins d'OMERE sur les dernières décennies. En étudiant les concentrations de césium 137 et de matière organique dans les sédiments piégés dans la retenue et dans des profils de sol en place sur le bassin de Kamech, Ben Slimane et al. (2013) ont par exemple montré que seuls 20 % des sédiments arrivant dans la retenue sur les 20 dernières années provenaient de l'érosion ravinatoire alors que de nombreuses ravines marquent fortement le paysage. Des travaux complémentaires à partir d'analyse de photographies récentes et anciennes (1950) ont révélé une baisse probable de l'activité ravinatoire (Ben Slimane et al, 2018) sur ce bassin. Des prospections préliminaires à l'aide de tomographie de résistivité électrique (Coulouma et al., 2018) ont confirmé l'existence de dépôts importants dans l'encaissant d'une ancienne ravine (paléo-ravine) et de produire une première visualisation de la géométrie de ces dépôts malgré un milieu très argileux et peu contrasté (Figure 1 A). Sur le bassin de Roujan, Raclot et al. (2009) ont montré que les sédiments exportés du bassin ne représentaient qu'une petite fraction des sédiments mobilisés au niveau des parcelles, montrant ainsi qu'une grosse partie des sédiments détachés étaient piégés au sein des interfaces inter-parcellaires, et notamment des fossés agricoles. Par la suite, plusieurs campagnes topographiques par DGPS du suivi de la géométrie interne des fossés ont été menées sur la quasi-totalité des fossés du bassin, et des observations pédologiques sur un fossé de la dépression ont permis de mettre en évidence une pédogénèse très spécifique dans les dépôts sédimentaires sous fossé (Figure 1 B). En 2019, des tests préliminaires ont également permis de vérifier la faisabilité de la datation OSL sur les deux bassins presentis.

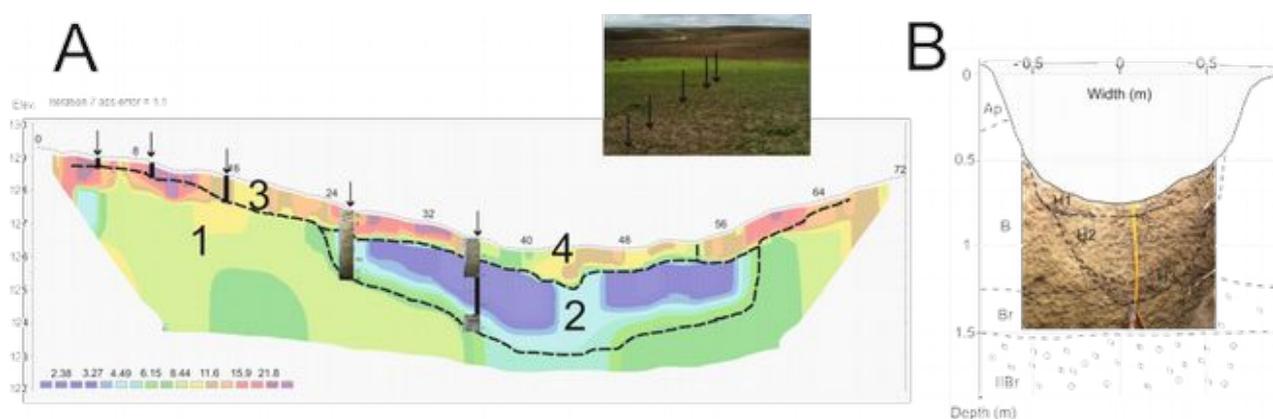


Figure 1 : Inspections préliminaires réalisées par résistivité électrique d'une section transversale d'une paléo-ravine de Kamech, Tunisie (A), et par ouverture de fosse sur un fossé de Roujan, France (B).

Action 1. Sélection d'un échantillon de ravines et fossés

Sur chaque site, deux éléments (deux fossés pour Roujan ou deux ravines pour Kamech) seront identifiés. Le choix de ces éléments sera établi à partir des critères suivants : éléments dominés par les processus de dépôt avec une longueur minimum (100 à 200 m), mais avec des surfaces drainées et une nature géopédologique des versants contrastés. Pour identifier les ravines en cours de comblement à Kamech, l'analyse de photographies historiques et l'expertise de terrain issue de l'observation depuis 25 ans de ce bassin seront également mobilisées. à Roujan, les fossés présents de longue date seront identifiés en recourant aux cadastres romains (cadastre B/A du réseau centurié de Béziers), à la carte de Cassini et aux cartes d'état-major du 19ème siècle. Les photos aériennes disponibles de 1948 seront également analysées.

Action 2. Caractérisation géophysique des ravines et fossés

Une prospection géophysique sera menée sur des sections transversales et longitudinales (environ 5 sections transversales par élément) qui recouperont les zones apparentes de dépôts de chaque élément identifié dans l'action 1. Une première résolution de l'ordre de 50 cm en vertical sera d'abord appliquée pour circonscrire les dépôts sur des sections de longueur de 70 mètres environ. Une prospection avec une résolution plus fine sera déployée au centre des ravines ou fossés. Il est envisagé une mise en œuvre croisées d'ERT/ MASW /sismique réfraction classique à deux dates (mesures diachroniques) choisies pour couvrir des conditions contrastées d'humectation du milieu. Cette spécificité nécessitera d'avoir de façon conjointe une information précise sur la température et l'humidité du sol, information fournie par les nombreux capteurs disponibles sur les sites instrumentés de l'ORE.

Action 3. Descriptions morphologiques de sections et prélèvements pour analyse et datation

Une fois les mesures géophysique achevées, des inspections visuelles seront menées précisément au droit des levés géophysiques. Cette inspection sera menée à l'aide de l'ouverture de tranchées couvrant toute la section transversale ou à l'aide d'une série de fosses localisées à des endroits stratégiques si la largeur des dépôts est trop importante. Une description fine des structures pédologiques et sédimentaires sera réalisée selon le protocole DONESOL (en lien avec le « Guidelines for soil description », FAO, 2006) sur l'ensemble des tranchées et fosses. Des photos haute-résolution seront prises pour documenter suffisamment les coupes en vue d'une réutilisation en cas de collaboration ultérieure avec des archéologues. Des prélèvements destinés aux analyses physico-chimiques (y compris des analyses fines de minéralogie des différentes phases granulométriques) ainsi que des prélèvements spécifiques destinés aux éventuelles datations seront récupérés sur chaque horizon de sol. Les analyses seront réalisées sur deux sections de chaque élément investigué et un stockage des échantillons des autres sections sera assuré en pédothèque.

Action 4. Reconstitution des géométries et proposition d'une histoire du remplissage des ravines /fossés

Le jeu de données constitué dans l'action 3 sera confronté aux mesures géophysiques inversées selon les règles de l'art propres à chaque méthode. Le premier objectif de cette action est de calibrer les méthodes pour imager la forme la plus ancienne de l'élément (encaissant maximal), ainsi que les profondeurs des horizons importants. La géométrie fine et les caractéristiques pédologiques des horizons de dépôts seront également confrontées aux marqueurs temporels qui auront pu être analysés dans les meilleures conditions. Les bases de données existantes sur les deux sites, notamment les informations pédologiques et géologiques à très haute résolution, seront également mobilisées pour construire un modèle conceptuel de mise en place des sols au droit des ravines et fossés en lien avec les matériaux arrachés plus haut dans le versant. Une confrontation avec les connaissances acquises sur l'érosion au cours des dernières 25 années, les occupations et pratiques agricoles actuelles, récentes et anciennes sera menée. La genericité du modèle conceptuel ainsi établi sur deux ravines et deux fossés sera testée sur un ou plusieurs éléments indépendants pour chaque site. Plusieurs sections géophysiques transversales seront réalisées sur ces éléments de validation en utilisant le même protocole d'acquisition. Des levés simplifiés de nature et discontinuité d'horizons seront effectués par carottage simple sur quelques points significatifs au regard des résultats des levés géophysiques inversés.

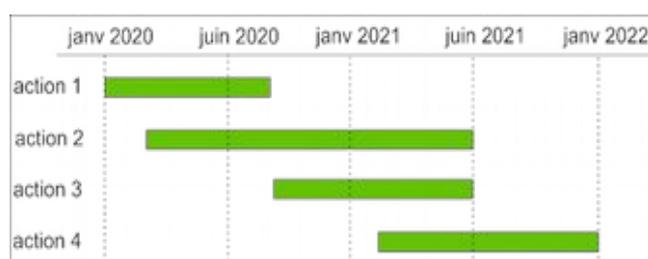


Figure 2 : diagramme temporel de répartition des actions du projet

Résultats attendus

Des avancées directes sont attendues sur le plan cognitif et méthodologique :

Sur le plan cognitif

Comprendre et caractériser les déterminants de l'évolution passée des linéaires sur les deux bassins versants étudiés est un résultat attendu dans un double objectif. D'une part cette connaissance doit permettre de mieux caractériser ces éléments dans l'espace. D'autre part, la connaissance de l'évolution de ces dépôts est une première étape pour la reconstruction de l'érosion sur du long terme par modélisation. Par ailleurs, l'utilisation de méthodes de datation largement éprouvées dans des contextes plus simples comme les zones endoréiques et dépressions fermées doit faire l'objet en cas de succès d'une communication spécifique.

Sur le plan méthodologique

Un résultat est également attendu sur une nouvelle méthodologie d'imagerie des caractéristiques des dépôts dans les fossés agricoles et ravines (propriétés spécifiques, étendue des zones spécifiques, présence/absence de dépôt, volume de dépôt). De façon indirecte à plus long terme, la connaissance attendue des déterminants de mise en place et de caractéristiques spécifiques de ces zones de dépôt (fossés agricoles et ravines) permettra de proposer des perspectives sur la variabilité latérale de ces éléments au sein des bassins versant et d'envisager d'étudier plus spécifiquement les fonctions associées.

Participation effective, prévue ou envisageable à d'autres programmes de recherche régionaux, nationaux et européens sur les mêmes problématiques

Ce projet s'appuie sur des travaux exploratoires menés dans le cadre de l'infrastructure de recherche OMERE et du Laboratoire Mixte International NAILA en Tunisie (dispositif IRD). Il n'a pas à ce jour d'autres financements acquis ou prévus autres que les actions auto-financées depuis 2 ans. En revanche, ce projet est conçu comme une première étape vers la construction d'un projet plus ambitieux de type ANR centré sur l'étude des fonctions rendues par le réseau hydrographique des bassins versants méditerranéens, avec une volonté d'apporter un regard pluridisciplinaire via le croisement des regards d'hydrologues, de pédologues, de géophysiciens, d'écologues et probablement aussi des archéologues.

Références bibliographiques des proposant

Références des proposant citées dans le texte

- Ben Slimane A., Raclot D., Evrard O., Sanaa M., Lefèvre I., Ahmadi M., Tounsi M., Rumpel C., Ben Mammou A., Le Bissonnais Y., 2013. Fingerprinting sediment sources in hillside reservoir within a cultivated catchment of Tunisia. *Journal of Soils and Sediments*, 13: 801-815. doi: 10.1007/s11368-012-0642-6.
- Ben Slimane A., Raclot D., Rebai H., Le Bissonnais Y., Planchon O., Bouksila F., 2018. Combining field monitoring and aerial photographs to evaluate the role of gully erosion in a Mediterranean catchment (Tunisia). *Catena*, 170: 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.044>
- Coulouma, G., Samyn, K., Grandjean, G., Follain, S., Lagacherie, P., 2012. Combining seismic and electric methods for predicting bedrock depth along a Mediterranean soil toposequence. *Geoderma* 170:39-47.
- Coulouma, G., Lagacherie, P., Samyn, K., Grandjean, G., 2013. Comparisons of dry ERT, diachronic ERT and Spectral Analysis of Surface Waves for estimating bedrock depth in various Mediterranean landscapes. *Geoderma* 199:128-134.
- Coulouma, G., Raclot, D., Hamdi, R., Ciampalini, R., 2018. Reconstitution historique de la géométrie d'une paléo-ravine au Cap Bon (Tunisie) : utilisation de la tomographie de résistivité électrique en milieu argileux. 11ème colloque GEOFAN, Antony.

- Dollinger, J., Dagès, C., Samouelian, A., Coulouma, G., Lanoix, M., Blanca, Y., Voltz, M., 2018. Contrasting soil property patterns between ditch bed and neighbouring field profiles evidence the need of specific approaches when assessing water and pesticide fate in farmed landscapes. *Geoderma* 309(1):50-59.
- Molénat, J., Raclot, D., Zitouna, R., Andrieux, P., Coulouma, G., et al. 2018. OMERE: A Long-Term Observatory of Soil and Water Resources, in Interaction with Agricultural and Land Management in Mediterranean Hilly Catchments. *Vadose Zone Journal*, 17 (1) .
- Raclot D., Le Bissonnais Y., Louchart X., Andrieux P., Moussa R., Voltz M., 2009. Soil management and scale effects on erosion from fields to catchment in a Mediterranean vineyard area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 134: 201-210. doi: 10.1016/j.agee.2009.06.019

Autres Références citées dans le texte

- Curran, JC, and Hession, WC, 2013. Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system. *J. Hydrol.* 505:364-376.
- Dages, C., Voltz, M., Bsaibes, A., Prevot, L., Huttel, O., Louchart, X., Garnier, F., Negro, S., 2009. Estimating the role of a ditch network in groundwater recharge in a Mediterranean catchment using a water balance approach. *Journal of Hydrology* 375(3-4):498-512.
- Dotterweich, M., Rodzik, J., Zglobicki, W., Schmitt, A., Schmidtchen, G., Bork, H.R., 2012. High resolution gully erosion and sedimentation processes, and land use changes since the Bronze Age and future trajectories in the Kazimierz Dolny area (Naleczow Plateau, SE-Poland). *Catena* 90:50-62
- Dotterweich, M., Stankoviansky, M., Minar, J., Koco, S., Papco, P., 2013. Human induced soil erosion and gully system development in the Late Holocene and future perspectives on landscape evolution: The Myjava Hill Land, Slovakia. *Geomorphology* 201:227-245.
- Eriksson, M.G., Olley, J.R., Payton, R.W., 2000. Soil erosion history in central Tanzania based on OSL dating of colluvial and alluvial hillslope deposits. *Geomorpho.* 36(1-2)107-128.
- Fuchs, M., Fischer, M., Reverman, R., 2010. Colluvial and alluvial sediment archives temporally resolved by OSL dating: Implications for reconstructing soil erosion. *Quaternary Geochronology* 5(2-3):269-273.
- Herzon, I., and Helenius, J., 2008. Agricultural drainage ditches, their biological importance and functioning. *Biological Conservation* 141(5):1171-1183.
- Sanderson, D.C.W., Murphy, S., 2010. Using simple portable OSL measurements and laboratory characterisation to help understand complex and heterogeneous sediment sequences for luminescence dating. *Quaternary Geochronology* 5:299-305.
- Smetanova, A., Verstraeten, G., Notebaert, B., Dotterweich, M., Letal, A., 2017. Landform transformation and long-term sediment budget for a Chernozem-dominated lowland agricultural catchment. *Catena* 157:24-34.
- Stehle, S., Elsaesser, D., Gregoire, C., Imfeld, G., Niehaus, E., Passeport, E., Payraudeau, S., Schaefer, RB., Tournebize, J., Schulz, R., 2011. Pesticide Risk Mitigation by Vegetated Treatment Systems: A Meta-Analysis. *J. of Env. Qual.* 40(4):1068-1080.
- Vaughan, R.E., Needelman, B.A., Kleinman, P.J.A., Rabenhorst, M.C., 2008. Morphology and characterization of ditch soils at an atlantic coastal plain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 660.
- Veron, A., Morhange, C., Poirier, A., Angeletti, B., Bertonecello, F., 2018. Geochemical markers of human occupation in the lower Argens valley (Frejus, France): from protohistory to Roman times. *Journal of Archaeological Science - Reports* 17:242-249.

ANNEXE 3 : sélection de tirés à part

Tirés à part relatif au volet 1 :

Molénat J., Raclot D., Zitouna R., et al. OMERE, a long-term observatory of soil and water resources in interaction with agricultural and land management in Mediterranean hilly areas. *Vadose Zone Journal*. doi: 10.2136/vzj2018.04.0086.

Feurer D., Planchon O., El Maaoui M.A., *Ben Slimane A.*, Boussema M.R., Pierrot-Deseilligny M., Raclot D. (2018) Using kites for 3-D mapping of gullies at decimetric resolution over several square kilometers: a case study on the Kamech catchment, Tunisia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18: 1567-1582. doi: 10.5194/nhess-18-1567-2018

Gumiere S.J., Raclot D., Cheviron B., Davy G., Louchart X., Fabre J.C., Moussa R., Le Bissonnais Y. (2011). *MHYDAS-Erosion a distributed single-storm water erosion model for agricultural catchment*. *Hydrological Processes*, 25(11): 1717-1728. doi: 10.1002/hyp.7931.

Tirés à part relatif au volet 2 :

Inoubli N., Raclot D., Mekki I., Moussa R., Le Bissonnais Y. (2017). *A spatio-temporal multiscale analysis of runoff and erosion in a Mediterranean marly catchment*. *Vadose Zone Journal* 16. doi:10.2136/vzj2017.06.0124.

Smetanova A., Le Bissonnais Y., Raclot D., Pedro Nunes J., Licciardello F., Le Bouteiller C., Latron J., Rodríguez Caballero E., Mathys N., Klotz S., Mekki I., Gallart F., Solé Benet A., Pérez Gallego N., Andrieux P., Moussa R., Planchon O., Marisa Santos J., Alshihabi O., Chikhaoui M., Follain S. (2018). Temporal variability and time compression of sediment yield in small Mediterranean catchments. *Soil Use and Management*, doi: 10.1111/sum.12437.

Ben Slimane A., Raclot D., Evrard O., Sanaa M., Lefèvre I., Ahmadi M., *Tounsi M.*, Rumpel C., Ben Mammou A., Le Bissonnais Y. (2013). *Fingerprinting sediment sources in hillside reservoir within a cultivated catchment of Tunisia*. *Journal of Soils and Sediments*, 13: 801-815. doi: 10.1007/s11368-012-0642-6.

Tirés à part relatif au volet 3 :

Gumiere S.J., Bailly J-S., Cheviron B., Raclot D., Le Bissonnais Y., Rousseau A. (2015). Evaluating the Impact of the Spatial Distribution of Land Management Practices on Water Erosion: case study of a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*. doi: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0001076.

Paroissien J.-B., Darboux F., Couturier A., Devillers B., Mouillot F., Raclot D., Le Bissonnais Y. (2015) A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). *Journal of Environmental Management*, 150:57-68. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.10.034.