



HAL
open science

Stockage géologique du CO₂ in situ en Nouvelle-Calédonie. Rapport scientifique final

Pascale Bénézeth, Marguerite Godard, Isabelle Thinon, Pierre Maurizot,
Claude Delor, Philippe Gouze, Domenik Wolff-Boenisch, Jean-Paul Laurent,
Dominique Cluzel, Pascal Audigane, et al.

► To cite this version:

Pascale Bénézeth, Marguerite Godard, Isabelle Thinon, Pierre Maurizot, Claude Delor, et al.. Stockage géologique du CO₂ in situ en Nouvelle-Calédonie. Rapport scientifique final. [Rapport de recherche] Programme Stockage du CO₂. Tome Nickel et Technologie, CNRT Nickel et son environnement. 2014, 127 p. ird-02160830

HAL Id: ird-02160830

<https://ird.hal.science/ird-02160830v1>

Submitted on 20 Jun 2019

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

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



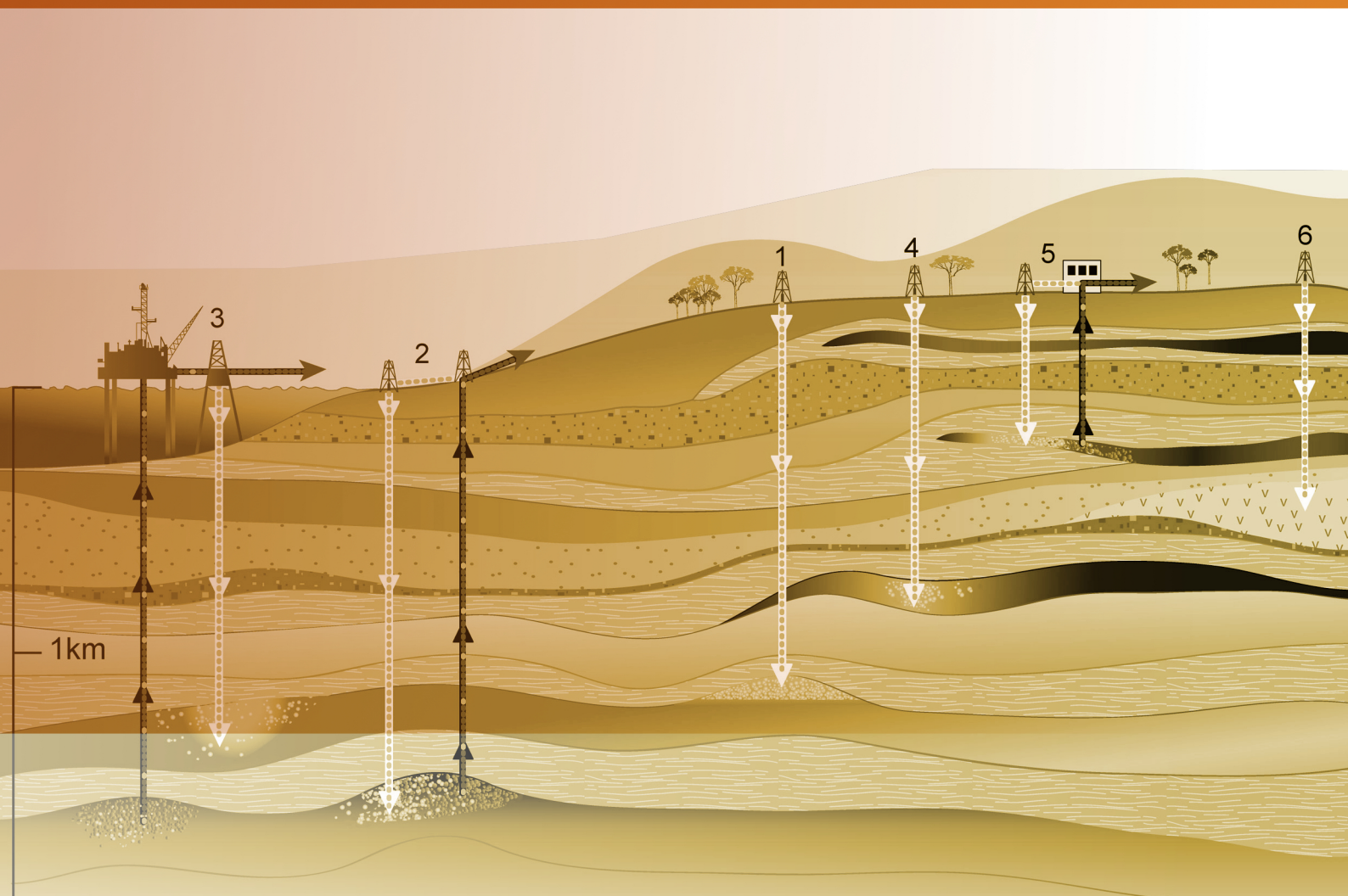
Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Rapport scientifique

Edition 2014

Stockage géologique du CO₂ en Nouvelle-Calédonie

Tome Nickel et Technologie



S Tockage Géologique du CO2 en Nouvelle-Calédonie

Etude financée par le CNRT « Nickel et son environnement

Ce programme n'a pas bénéficié de cofinancement

Programme de recherche appliquée lancé en 2012

Travaux réalisés par le CNRS, le BRGM, l'IRD, l'UNC et
le SGNC

Projet d'une durée de 12 mois

Rendu Final de 127 pages



2014

RENDU

Rapport du projet d'étude
« Stockage géologique du Co2
in situ en Nouvelle- Calédonie »

Auteur

Pascale Béné zeth, Marguerite Godard,
Isabelle Thinon, Pierre Maurizot,
Philippe Gouze, Domenik Wolff
Boenisch, Jean Laurent, Dominique
Cluzel, Pascal Audigane, Christophe
Monnin, Thierry Augé, Bénédicte
Ménez, Patrice Baby, Peter Kelemen

RAPPORT FINAL

Novembre 2014

CNRT
NICKEL
& son environnement

Rapport du projet d'étude
«Stockage Géologique du CO₂ in situ en Nouvelle-Calédonie »
Financé par le CNRT Nickel et Environnement-2013

Pascale Bénézech (responsable du projet) (GET-CNRS, Toulouse)

Marguerite Godard (GEOM-CNRS, Montpellier)

Isabelle Thinon (BRGM, France)

Pierre Maurizot/Claude Delor (BRGM, NC)

Philippe Gouze (GEOM-CNRS, Montpellier)

Domenik Wolff-Boenisch (Université de Perth, Australie)

Jean-Laurent (SGNC)

Dominique Cluzel (Université NC)

Pascal Audigane (BRGM, France)

Christophe Monnin (GET-CNRS, Toulouse)

Thierry Augé (BRGM, France)

Bénédicte Ménez (IPGP, Paris)

Patrice Baby (GET-IRD, Toulouse)

Peter Kelemen (Université de Columbia, USA)

Table des matières

INTRODUCTION	4
I) CARACTERISTIQUES DES SITES INDUSTRIELS	10
II) OPTIONS DE STOCKAGE ET POINTS CRITIQUES	11
II-1) Le CCS	11
II-2) Options de stockage	13
II-2-1) Les aquifères salins profonds	13
II-2-2) Les gisements de pétrole ou de gaz en fin d'exploitation ou épuisés	13
II-2-3) Les veines de charbon non exploitées	14
II-2-4) Les basaltes et les roches ultrabasiques	15
II-3) Points critiques du CCS	25
III) DESCRIPTION GEOLOGIQUE DES SITES-ONSHORE (GRANDE-TERRE)	26
III-1) Connaissance géologique à l'affleurement	28
III-2) Connaissance hydrogéologique de la Grande Terre	33
III-3) Connaissance géologique en profondeur	37
III-3-1) Paramètres et distribution des données de sondages et analyse géologique des trois sites d'usine métallurgique	39
• <u>Région Nord: site de Koniambo (usine KNS)</u>	41
• <u>Région Sud: site de Nouméa (usine SLN Doniambo)</u>	43
• <u>Région Sud: site de Goro (usine Vale NC)</u>	45
III-3-2) Listing des données géophysiques	47
III-3-3) Le bassin sédimentaire de Bourail	49
• <u>Sondages géologiques profonds de Bourail</u>	50
• <u>Données sismiques: géométrie du bassin de Bourail</u>	51
III-4) Synthèse	55
III-4-1) Intérêt des nappes ophiolitiques pour le stockage géologique du CO ₂	55
III-4-2) Intérêt du bassin de Bourail pour le stockage géologique du CO ₂	57
• <u>Caractéristique de réservoir potentiel</u>	57
• <u>Connaissance géologique suffisante ?</u>	58
IV) DESCRIPTION GEOLOGIQUE DES SITES-OFFSHORE	59
IV-1) Le Lagon	59
IV-1-1) Données bathymétriques	59
IV-1-2) Informations géologiques	64
IV-1-3) Synthèses cartographiques	64
IV-2) Domaine bassin océanique profond	64
IV-2-1) Description	64
IV-2-2) Données de la ZEE	66

IV-3) Intérêt du domaine offshore peu profond et occidental	72
V) RECOMMANDATIONS	73
V-1) Evaluation crédible des besoins de stockage	74
V-2) Avis sur les scénarios possibles d'injection	78
V-3) Cahier des charges	84
CONCLUSIONS	87
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	90
CARTES	105
ANNEXES	106
Annexe A – Cahier des charges	107
Annexe B – Sites Internet	123
Annexe C – Liste des Figures	124
Annexe D – Liste des Tableaux	126
Annexe E – Liste des abréviations	126
Annexe F – Personnes contactées et rencontrées au cours du projet	127

INTRODUCTION

La prise de conscience de la communauté internationale et la convergence des données scientifiques autour du réchauffement climatique rendent urgente la mise en œuvre dans le monde entier des technologies de réduction des émissions de gaz à effet de serre, notamment du CO₂ dont la concentration a augmenté de façon considérable depuis le début de l'ère industrielle (rapport IPCC, 2007).

En **Nouvelle-Calédonie** la production de CO₂ est en grande partie liée aux activités minières et métallurgiques, que ce soit l'exploration, l'exploitation et les procédés de traitement du minerai de Nickel (30% des réserves mondiales de type supergène). Cependant, cette production de CO₂ en **Nouvelle-Calédonie** n'est pas soumise jusqu'à ce jour aux contraintes liées au Protocole de Kyoto, ce qui a permis un développement industriel basé sur le charbon. Le choix de cette politique énergétique s'est imposé compte tenu des exigences des industries métallurgiques en approvisionnement énergétique (flexibilité et fiabilité) et du coût aujourd'hui relativement abordable du charbon, mais il implique une multiplication d'environ 2 (voire 3) des émissions de CO₂ déjà importantes du pays, alors que le monde se préoccupe de les diminuer. Afin de concilier l'utilisation de ces ressources énergétiques et la maîtrise des émissions contribuant au réchauffement climatique, la filière capture, séparation et stockage géologique du CO₂ (CCS) pourrait être une voie très prometteuse en **Nouvelle-Calédonie**.

Le stockage géologique du CO₂ dans les bassins sédimentaires est actuellement considéré comme l'option principale, en raison du grand volume et de la répartition des aquifères profonds à l'échelle mondiale (*cf.* Bachu et al., 1994, Holloway, 2001). Cependant, cette technologie n'est pas la seule envisagée et d'autres technologies peuvent s'avérer mieux adaptées, dans certaines conditions, pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces dernières figure, la séquestration minérale du CO₂, sous forme de minéraux carbonatés, offrant une option thermodynamiquement stable et fiable sur de très longues périodes de temps (*cf.* Matter et al., 2007). Cette option demande néanmoins des environnements spécifiques contenant des minéraux réactifs et source de cations divalents (Ca, Mg, Fe) susceptibles de conduire à la formation de carbonates secondaires relativement insolubles. Les roches basiques (basaltes) et ultrabasiques (péridotites, serpentinites) sont composées d'olivine et de pyroxènes, silicates de Mg, Fe et Ca, qui présentent de fortes teneurs en ces éléments. Dans la nature, la carbonatation des roches

basaltiques et des péridotites se produit dans des environnements variés et très bien documentés comme l'altération hydrothermale (sources volcaniques, *cf.*; Barnes and O'Neil, 1969 ; Arnorsson and Gunnlaugsson, 1985; Gudmundsson and Arnórsson, 2002); dans les systèmes océaniques profonds (événements hydrothermaux océaniques, Humphris and Tivey, 2000 ; Kelley et al., 2005) et au travers de l'altération de surface (Wolff-Boenisch et al., 2006 ; Gislason et al., 2006). Ces processus sont communément associés avec les réactions d'hydratation et aux circulations hydrothermales, que l'on observe dans les roches basiques et ultrabasiqes (serpentinisation...) en milieu marin (*e.g.*, Alt and Teagle, 1999; Bach et al., 2004) et ophiolitique (*e.g.*, Chavagnac et al., 2013a,b) (*cf.* Figure 1, en Oman). Ils peuvent être observés en **Nouvelle-Calédonie** sous la forme de nombreuses concrétions naturelles de magnésite dans les basaltes et serpentinites de l'unité de Poya (le long de la côte Ouest) ou par la carbonatation et silicification de la semelle serpentineuse de la base des massifs de péridotites par des fluides hydrothermaux.



Figure 1 : Exemples de carbonatation naturelle dans les péridotites (Ophiolite d'Oman) (photos : M. Kurz, WHOI)

La publication récente d'une étude sur la carbonatation des péridotites des montagnes d'Oman par Kelemen and Matter (2008) a généré un intérêt accru pour les capacités de stockage de CO₂ des roches basiques et ultrabasiqes. En Janvier 2011, le premier symposium international sur la séquestration géologique du CO₂ dans les roches basiques et ultrabasiqes a réuni des chercheurs, des industriels et des représentants gouvernementaux en Oman. Cette réunion a permis d'identifier les voies de recherche pour le développement des techniques de séquestration géologique de CO₂ dans ces roches, et pour évaluer la faisabilité et l'intérêt économique de ces techniques dans des conditions de sécurité environnementales et sociétales acceptables (*cf.*,

<http://ccsoman2011.gm.univ-montp2.fr/>). **La Nouvelle-Calédonie** a été reconnue comme étant une zone d'étude d'un intérêt majeur dans ce contexte et potentiellement adaptée pour le développement d'un démonstrateur.

La possibilité de former des minéraux carbonatés par injection de CO₂ dans les roches basiques est en cours d'investigation en Islande (projet CARBFIX et ANR-CO2FIX) (cf., Gislason et al., 2010 ; Matter et al., 2010; <http://www.or.is/en/projects/carbfix>) ainsi qu'aux Etats-Unis (Projet BigSky-Wallula pilot;<http://www.bigskyco2.org/research/geologic/basaltproject>). Si elle s'avère efficace, la technologie pourra s'exporter dans d'autres régions basaltiques du monde. Selon des études réalisées par l'Idaho National Laboratory, le potentiel de séquestration d'une couche de basalte de 85.000km² aux Etats-Unis pourrait permettre de stocker 100 milliards de tonnes de dioxyde de carbone (Hickey, 2009). Dans le plateau du Deccan la capacité de stockage pourrait atteindre 600 milliards de tonnes de CO₂. Cette quantité représente approximativement la quantité de dioxyde de carbone produite par les activités anthropiques durant douze années. A noter qu'en **Nouvelle-Calédonie**, une surface importante de basaltes se trouve sur la moitié nord de la côte ouest et que les infrastructures du projet KNS (Koniambo Nickel SAS) sont situées dans une région où affleurent des péridotites serpentinisées et des basaltes.

Les recherches ciblant des substrats péridotitiques sont beaucoup moins avancées que celles visant les basaltes. Il n'existe pas encore de projet pilote comme celui de Hellisheidi en Islande, mais de récentes découvertes réalisées par les chercheurs de l'Université de Columbia (partenaires du projet CARBFIX, en Islande) dans le massif de péridotites d'Oman montrent l'importance du potentiel de la séquestration minéralogique du CO₂ dans les roches ultrabasiqes (Kelemen et Matter 2008). Toutefois, même si ces roches ont des caractéristiques similaires, elles ont aussi des différences notables en terme de distribution, de porosité et perméabilité, de composition minéralogique et chimique qui ont des conséquences majeures sur les contraintes technologiques des processus à mettre en œuvre pour la minéralisation *in situ* du CO₂.

Il existe de vastes gisements de péridotites dans la région d'Oman, dans les îles de Papouasie-Nouvelle-Guinée, d'Indonésie, des Philippines et de **Nouvelle-Calédonie** ainsi que le long des côtes grecques, au sud de l'Espagne et dans l'ex-Yougoslavie. En **Nouvelle-Calédonie**, les péridotites constituent d'importants massifs qui représentent un tiers de la superficie de la Grande Terre (5500 km²) et sont répartis dans le sud et sur la côte ouest, le Massif du Sud étant l'un des plus grands massifs ultrabasiqes au monde. Cette abondance exceptionnelle de roches

ultrabasiques est non seulement à l'origine de réserves considérables de nickel et de cobalt, mais peut aussi contribuer au stockage géologique du CO₂ via la carbonatation *in situ* (voir expertise collégiale faite par l'IRD en 2010: Riedacker et al. 2010; Velut et al. 2010). Par exemple, l'épaisseur de la nappe ophiolitique, qui peut être estimée à un minimum de 1500 m sur la base de la cartographie géologique, est un paramètre clé dans l'évaluation de la taille du réservoir de stockage, mais aussi dans l'estimation des températures de ce réservoir. La température conditionne au premier ordre la stabilité des minéraux, la cinétique des réactions d'interaction eaux-roches et le domaine d'existence d'une éventuelle biosphère souterraine.

Le dimensionnement et l'estimation du coût d'une campagne de reconnaissance en vue d'un stockage géologique du CO₂ requiert une analyse fortement multidisciplinaire, capable d'appréhender les paramètres clés pour les phases d'injection et de stockage (conditions géologiques, hydro(géo)logiques, géochimiques et géo-mécaniques) en relation avec les réalités et contraintes du terrain. Ces dernières doivent intégrer certes la connaissance de la géologie de la zone d'étude, mais également les contraintes de surfaces (positionnement des émetteurs, connaissance des zones d'exclusion), et la connaissance des opérateurs locaux susceptibles de réaliser le projet.

Afin de répondre à ces objectifs, nous avons proposé au CNRT l'expertise d'un groupe de chercheurs fortement multidisciplinaire (experts en géologie, géochimie, hydrochimie, hydrogéologie, ressources minérales, stockage de CO₂) et international (France, Nouvelle-Calédonie, Islande, Etats-Unis) en partie déjà constitué auparavant et engagé depuis longtemps dans de nombreuses études liées à la problématique du stockage de CO₂. Le projet a été coordonné par Pascale Bénézech, géochimiste et directrice de recherche au CNRS au **GET** (Géosciences Environnement Toulouse). Il a réuni des (hydro-)géologues, des géophysiciens et des géochimistes calédoniens, français, et étrangers, travaillant dans le domaine de la recherche fondamentale ou appliquée, au sein d'organismes et de laboratoires fortement impliqués dans les grands programmes nationaux (ANR...) et internationaux (Europe FP7, NSF...) portant sur la capture et le stockage du CO₂, la géologie des massifs ophiolitiques, les mécanismes des interactions eaux-roches, etc. En outre, ce projet a combiné les expertises et les savoir-faire des géologues basés en Nouvelle-Calédonie au **BRGM**, à l'Université (**UNC**), et au Service Géologique (**SGNC**), dont la connaissance de la géologie et du terrain en Nouvelle-Calédonie est un atout majeur pour ce comité; des chercheurs du **GET** (processus physico-chimiques et

(bio)géochimiques dans les systèmes hydrothermaux naturels et induits), de Géosciences Montpellier (**GEOM**) (hydrogéologie, processus d'altération et carbonatation des roches ultrabasiques, relations failles/fluides/déformation, géophysique et hydrodynamique en forage), de l'**IPGP** (biogéochimie) et du **BRGM** (France) (géologie des bassins sédimentaires, géologie marine, simulations numérique couplées du comportement à long terme du CO₂ en milieu réactif). De plus, par l'intermédiaire de Jean Laurent (ingénieur de la fonction publique calédonienne, chef du service géologique de la NC (**SGNC**)), le projet a pu bénéficier de contacts multiples auprès des institutions et des sociétés privées de la Nouvelle-Calédonie.

Ce groupe a aussi bénéficié de la présence de deux experts internationaux (externes au projet): **Domenik Wolff-Boenisch** de l'Université de Perth en Australie qui, outre sa connaissance fine des processus géochimiques induits, a joué un rôle important dans la mise en place du pilote de stockage de CO₂ dans les basaltes Islandais et **Peter Kelemen** de l'Université de Columbia (USA), qui travaille depuis plusieurs années sur les processus de carbonatation des roches ultrabasiques, sur le terrain et à partir d'études en laboratoire, et qui est actuellement porteur d'un projet de forage profond dans l'ophiolite d'Oman, dont un des objectifs est de définir le potentiel de séquestration in situ du CO₂ dans les roches ultrabasiques.

Suite au déplacement de la majorité des experts en Nouvelle-Calédonie en avril 2013 (cf. Figure 2) et de nombreux échanges par la suite, un cahier des charges a été établi, détaillé dans ce rapport permettant d'évaluer en particulier la faisabilité et la capacité du stockage géologique du CO₂ dans le sous-sol calédonien avec une première estimation des coûts d'études spécifiques à mener (par l'industriel concerné) pour l'évaluation des capacités de stockage dans le massif de péridotites du Sud de la Nouvelle-Calédonie ainsi que dans les basaltes au Nord et les études (géochimiques, hydrogéologiques, géo-mécaniques géophysiques, forages exploratoires on-shore/off-shore...) à réaliser.



Figure 2 : Groupe d'experts à Koniambo, Avril 2013 (debout de g. à d. : Jean Laurent, Dominique Cluzel, Pierre Maurizot, Bénédicte Ménez, Pascale Bénézeth, Marguerite Godard, Philippe Gouze, Christophe Monnin, Thierry Augé, Isabelle Thinon, Claude Delor (BRGM). Accroupi : Jacques Loquet (Président du Comité Environnemental Koniambo), Domenik Wolff-Boenisch, Pierre Mercier (Directeur Environnemental Koniambo).

I) CARACTERISTIQUES DES SITES INDUSTRIELS

Le rapport d'expertise collégiale piloté par l'IRD en 2010 (Riedacker et al., 2010; Velut et al., 2010) fait état d'une augmentation de 63,5% (+1,8Mt d'équivalent CO₂) entre 1990 et 2007 des émissions de CO₂ de Nouvelle-Calédonie et des Collectivités d'Outre-Mer (COM). En Nouvelle-Calédonie, la production de CO₂ est principalement liée aux activités minières et métallurgiques, que ce soit l'exploration, l'exploitation et les procédés de traitement du minerai de nickel. Les principaux centres émetteurs de CO₂ de la Nouvelle-Calédonie sont situés sur le littoral occidental et méridional de Grande-Terre. Les usines métallurgiques en activités sont en province Nord dans la région de Koné (KNS) et en province sud à Nouméa (la Société Le Nickel, SLN, Doniambo) et à Goro (Vale NC) (cf. Site internet: <http://www.georep.nc>).

On peut distinguer deux types de production de CO₂ dus à la métallurgie du nickel: le premier est lié au procédé industriel lui-même, le second qui a trait à la production d'énergie, est indirectement lié aux usines, qui en sont les principales bénéficiaires. Ainsi, au sud de la Grande Terre, une nouvelle centrale à charbon, Prony Energie, alimente l'usine hydrométallurgique Vale-NC à Prony dans la commune du Mont Dore. Cette usine, qui met en œuvre le procédé PAL (Pressure Acid Leaching) d'attaque acide des minerais, produit aussi de grandes quantités de CO₂ lors de la neutralisation des effluents acides par le calcaire et la chaux. Au nord, sur le site de KNS à Vavouto dans la commune de Voh, une autre centrale électrique est en cours de construction. Elle sera composée de deux chaudières à charbon de 135 MW et alimentera en électricité l'usine pyrometallurgique (breveté Nickel Smelting Technology de Glencore (ex-Xstrata) du projet Koniambo Nickel SAS (KNS) de l'opérateur anglo-suisse Glencore (ex-Xstrata) et de la SMSP, une entreprise minière calédonienne. Au moment de la rédaction de ce rapport l'usine de Koniambo était alimentée en énergie par deux turbogénérateurs de réacteurs d'A380 (2x46MW). Quand les usines de nickel fonctionneront à leur capacité prévue, l'augmentation de l'activité industrielle en Nouvelle-Calédonie conduira à une production de CO₂ par habitant d'environ 30 t/an, contre environ 14 t/an aujourd'hui, ce qui mettra la Nouvelle-Calédonie dans une position comparable aux Emirats du Golfe Persique, pays aux populations faibles et aux vastes installations industrielles. Par comparaison, la quantité de CO₂ émise par habitant est de 20 t/an pour les USA et 8,2 t/an pour l'Europe occidentale. A noter que l'actuelle centrale au fuel de la Société Le Nickel (SLN, groupe Eramet), à Doniambo dans la commune de Nouméa, sera remplacée également par

une unité de production au charbon, ce qui augmentera donc la prévision de production de 30 t CO₂/an/habitant.

Dans le cadre de notre expertise, et après analyse des dossiers de demande d'autorisation d'exploitation déposés par les industriels à la DIMENC (Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie) conformément à la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), le chiffrage des émissions de CO₂ prévisible en phase d'exploitation sur les différents sites est donné dans le Tableau 1.

Site	Doniambo	Prony	Vavouto	TOTAL
Emission de CO ₂ provenant des centrales électriques (en tonnes)	1 260 000	650 000	1 600 000	3 510 000
Emission de CO ₂ provenant des processus métallurgiques (en tonnes)	650 000	500 000	930 000	2 080 000
TOTAL	1 910 000	1 150 000	2 530 000	5 590 000

Tableau 1 : chiffrage des émissions de CO₂ (en tonnes par an)

Il est à noter que les dossiers ICPE ne donnent pas d'indications sur la composition exacte des émissions. On sait cependant que la combustion du charbon produit, outre du CO₂, des gaz annexes (NO_x, SO_x, CO, vapeur d'eau ...). Enfin, une activité industrielle croissante induit aussi la production de CO₂ par des sources certes annexes par rapport à la production d'énergie ou au procédé industriel, mais non négligeables, comme par exemple un accroissement de la circulation lié au déplacement des matériaux, à la fois sur la mine elle-même ou bien en dehors.

II) OPTIONS DE STOCKAGE ET POINTS CRITIQUES

II-1) le CCS

La séquestration géologique du CO₂ s'appuie sur des technologies développées depuis longtemps dans le domaine pétrolier. En effet l'injection de CO₂ est un procédé classique d'amélioration de la récupération du pétrole (Lake, 1989). Deux opérations industrielles de

stockage de CO₂ sont en cours depuis plus de 15 ans: a) l'injection de CO₂, depuis fin 1996 (1 Mt/an), dans l'aquifère salin de Sleipner Vest en mer du Nord (Norvège) (à 1000 m sous le plancher océanique, dans la formation des sables d'Utsira) et b) la récupération assistée du pétrole à Weyburn (Canada). Cette filière comprend (Figure 3) quatre segments d'activité: (1) séparation du CO₂ à la source, (2) transport et compression, (3) injection dans le sous-sol, (4) contrôle, surveillance, et réparation des dommages. Le premier segment est souvent estimé comme le plus coûteux et celui qui pose le plus de problèmes bénéficiant d'efforts de recherche substantiels.

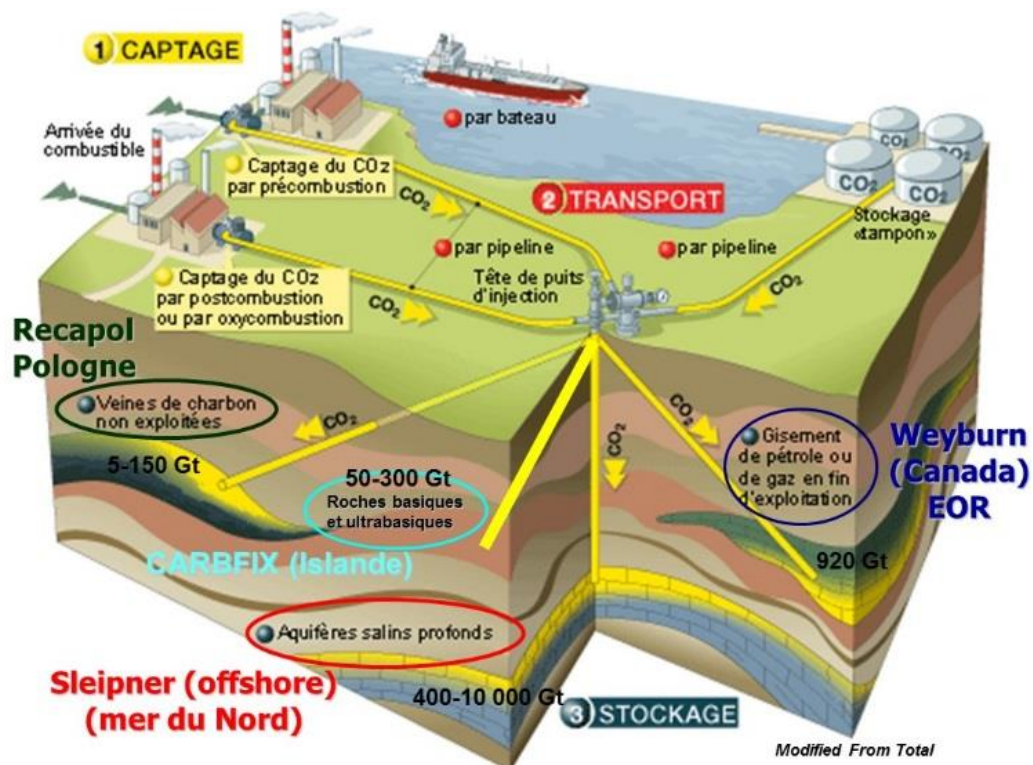


Figure 3 : les filières du CCS et options de stockage

Le second segment est bien maîtrisé, mais il dépend de l'infrastructure existante (au Texas, un réseau de *pipes* est dédié au CO₂). Les troisième et quatrième segments relèvent du comportement du sous-sol. Ils posent des questions peu abordées jusqu'ici (réactivité des roches lors de l'injection, confinement). Si la compréhension des interactions eaux-roches peut (et doit) s'appuyer sur des expériences de laboratoire, celle du confinement fait intervenir des processus in situ dont la caractérisation nécessite une connaissance géologique et géotechnique approfondie du site de stockage. L'étude des propriétés de confinement d'un site sera menée au mieux dans le cadre d'un site pilote, comme cela a été fait en Islande pour le stockage du CO₂ dans les basaltes. La

résolution de ces questions est cruciale pour rendre la filière viable. Un soutien actif à la recherche serait à même de placer les industriels français en position de leaders dans les technologies d'injection et de monitoring correspondantes. Enfin, l'acceptation sociale et la discussion avec la population et les autorités locales sont des éléments à prendre en compte.

II-2) Options de stockage

II-2-1) Les aquifères salins profonds (~400-10 000 Gt):

Ce sont des réservoirs d'eau salée non potable très bien répartis à la surface du globe, ce qui offre la possibilité de développer ces systèmes à proximité des sources d'émission, et qui représentent le plus gros potentiel en matière de capacité de stockage (400 à 10 000 Gt). Bien qu'étant mieux réparties à la surface du globe que les gisements d'hydrocarbures, leur structure et leur capacité à piéger durablement le CO₂ sont plus mal connues. En effet, le CO₂ injecté dans le réservoir reste séquestré essentiellement par piégeage hydrodynamique (sous la couverture sédimentaire du piège structural ou stratigraphique) et par solubilité dans les fluides en place, très peu par minéralisation. Un effort important de recherche doit donc être engagé pour apprécier leur potentiel de stockage géologique et leur capacité à confiner le CO₂ sur le long terme. L'expérimentation a lieu en mer du Nord par le pétrolier norvégien Statoil. Depuis octobre 1996, un million de tonnes de CO₂/an sont injecté dans un aquifère profond à 1000 m sous le plancher océanique (aquifère d'Utsira) à partir de la plate-forme offshore de gaz naturel de Sleipner (Norvège). Un autre exemple est celui du projet industriel CSC In Salah, opérationnel en Algérie depuis 2004. Plus de trois millions de tonnes de CO₂, séparés pendant la production de gaz, ont été séquestrées dans des formations salines profondes. BP, Sonatrach et Statoil, les opérateurs du projet, ont pour objectif de séquestrer un total de 17 millions de tonnes au cours des 20 prochaines années.

II-2-2) Les gisements de pétrole ou de gaz en fin d'exploitation ou épuisés (~920 Gt):

Les gisements de gaz naturel et de pétrole sont intéressants puisque ces structures ont constitué des pièges à hydrocarbures étanches pendant des millions d'années et que ce milieu géologique est relativement bien connu. L'injection de CO₂ dans des gisements pétroliers étant d'ailleurs déjà pratiquée depuis des décennies (surtout au Texas), à des fins de récupération assistée: CO₂-EOR (Enhanced Oil Recovery). Puissant solvant, le CO₂ supercritique aide à

recupérer une partie du pétrole résiduel de gisements difficiles ou en baisse de production. Par exemple, le projet Weyburn-Midale, mis en place en septembre 2000, permet actuellement de stocker 1,8 million de tonne par an de CO₂. C'est un programme de séquestration du CO₂ dans les champs pétroliers combiné à la récupération assistée de pétrole (CO₂-EOR). Le CO₂ provient d'une usine de gazéification de charbon située à Beulah (Dakota du Nord, USA), est transporté sur 320km via un gazoduc (5000 t CO₂/jour) pour être injecté dans les champs pétroliers de Weyburn (avec de l'eau) à 1500m permettant ainsi une récupération assistée de pétrole, ce qui réduit les coûts de stockage. Le pilote Total à Lacq est la première opération en France de démonstration de la chaîne complète du processus de captage du CO₂ par oxy-combustion jusqu'au stockage souterrain dans l'ancien gisement de gaz de Rousse (Jurançon, Pyrénées-Atlantiques) à une profondeur de 4500 mètres. Après trois ans d'injection et quelques 50.000 tonnes de CO₂ stockées dans le puits de Rousse, Total a mis fin à cette première phase du projet pilote de Lacq le 15 mars 2013, conformément au calendrier annoncé. Depuis, a débuté la phase de surveillance du site. De la même manière, l'Australie a démarré en 2008 le projet pilote de Otway (*CO2CRC Otway Project*) considéré alors comme un des plus démonstratifs au monde par l'AIE pour la qualité du *monitoring* mis en place (65 000 t de CO₂ ont été injectés pendant 2 ans).

Ces réservoirs présentent de nombreux avantages: bonne connaissance géologique du site, faibles coûts d'exploration, réutilisation du matériel d'extraction pour l'injection du CO₂, augmentation de la production des gisements due à l'injection de CO₂ (récupération assistée, susceptible d'augmenter de 15% la production d'un gisement). Les capacités mondiales de stockage seraient de 125 Gt de CO₂ pour les gisements de pétrole et de 800 Gt pour les gisements de gaz. Néanmoins, ces sites de stockages potentiels sont souvent très éloignés des installations industrielles et leurs capacités sont limitées.

II-2-3) Les veines de charbon non exploitées (~5-150 Gt) :

Le CO₂ est piégé dans ces mines par adsorption sur le charbon. Cette technique offre un double avantage car elle permet d'augmenter la production de méthane (récupération assistée du méthane CO₂-ECBMR). Mais les quantités de CO₂ pouvant être stockées dans ces réservoirs restent faibles par rapport aux deux autres techniques décrites ci-dessus. La capacité mondiale de stockage de CO₂ dans les mines de charbon non exploitables serait de l'ordre de 150 Gt mais elle n'est pas encore garantie. Par ailleurs, cette option est limitée par la porosité et la perméabilité qui

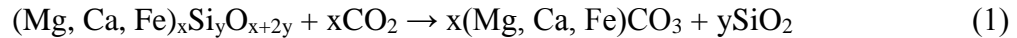
restent faibles, d'où la nécessité d'un nombre important de puits d'injection et de production. Des travaux de recherche sont en cours pour préciser la faisabilité de l'injection. Le projet RECAPOL a été le premier pilote européen d'injection de CO₂ dans des veines de charbon en 2001. Le site se trouve dans le bassin de Silésie, en Pologne. Ce projet pilote a permis de rendre compte de la faisabilité technique et financière ainsi que de la sûreté d'une telle séquestration dans le charbon. De nombreux projets dans le monde entier ont été également lancés afin d'étudier le stockage du CO₂ dans les veines de charbon : entre autres les projets américains et canadiens Coal-Seq et MGSC-ECBM, le projet français CHARCO (2006-2010) soutenu par l'ANR, le projet Qinshui Basin en Chine et le projet Yubari au Japon.

II-2-4) Les basaltes (~50-300Gt) et les roches ultrabasiqes (~100-10⁵Gt):

De gigantesques formations de roches basiques et ultrabasiqes existent en de nombreux endroits et jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone, en réagissant notamment avec le CO₂ atmosphérique et volcanique pour former des carbonates et/ou du carbone organique de manière abiotique ou en hébergeant des écosystèmes profonds chimiolithoautotrophes (e.g. Edwards et al., 2005 ; Ménez et al., 2012). Les plus grands épanchements basaltiques connus sont les Trapps de Sibérie en Russie et du Deccan en Inde, le plateau de la Columbia dans le Nord-Ouest des États-Unis ou encore les laves triasiques nord-américaines. Ces coulées ont un potentiel important pour stocker des milliers d'années d'émission de CO₂. La consommation de CO₂ par les basaltes est estimée entre 30 et 35 % du flux lié à l'altération des silicates, alors que les roches basaltiques ne constituent que 5% de la surface continentale (Dessert et al., 2003). L'extension de ces formations et leurs propriétés physico-chimiques en font donc un candidat sérieux pour le stockage du CO₂ à long terme. En effet, la plupart des sites d'injection dans les roches sédimentaires ont une minéralogie qui est, en dehors des minéraux carbonatés, dominée par le quartz et les aluminosilicates, pauvres en éléments alcalins, induisant dès lors un faible potentiel pour le stockage minéral (Gilfillan et al., 2009). A l'inverse, les roches basiques (basaltes) et ultrabasiqes (péridotites, serpentines,...), très réactives, sont riches en silicates de magnésium, de fer et de calcium (olivine, pyroxènes, Ca-plagioclase) avec un fort potentiel de piégeage minéral. Un basalte typique contient de 7 à 10% en masse de Ca, 5 à 6% de Mg et 7 à 10% de Fe (Oelkers et al., 2008). Sa forte réactivité assure à la fois une neutralisation du fluide, et un relargage relativement rapide de cations métalliques en solution. Dans la nature, la carbonatation des roches basaltiques et des

péridotites se produit dans des environnements variés et très bien documentés comme l'altération hydrothermale (e.g., Gudmundsson and Arnórsson, 2002), les systèmes océaniques profonds (événements hydrothermaux océaniques, Kelley et al., 2005) et au travers de l'altération de surface (Wolff-Boenisch et al., 2006 ; Gislason et al., 2006).

De nombreuses études (aussi bien expérimentales qu'en contexte naturel) ont été menées sur la carbonatation des roches basiques et ultrabasiques. Elles mettaient en particulier en œuvre des silicates magnésiens (e.g., O'Connor et al., 2001, Giammar et al., 2005, Béarat et al., 2006; Gerdemann et al., 2007, Garcia et al., 2010, Daval et al., 2011, ...) selon la réaction générale suivante :



exothermique et thermodynamiquement favorable, reproduisant l'altération naturelle des minéraux silicatés qui contribuent à la régulation atmosphérique du CO₂. Cependant de nombreux verrous restent encore à être levés. En effet la prévision des chemins réactionnels et vitesses d'évolution des systèmes vers leur état final reste encore peu fiable. Il est en général considéré dans la littérature que l'étape limitante de la réaction de carbonatation (Eq. 1) réside dans la phase de dissolution des silicates magnésiens (e.g Park et al., 2003 ; Prigione et al., 2009 ; Zevenhoven et al., 2011), mais nous avons démontré que ceci n'est pas toujours vrai surtout dans le cas de réactions de carbonatation faisant intervenir des silicates magnésiens et donc la formation, en principe, de magnésite. En effet, les travaux récents de Saldi et al. (2009, 2012) ont confirmé que la vitesse de précipitation de la magnésite est particulièrement lente, de 5 à 6 ordres de grandeur inférieure à celle de la calcite. Ceci est *principalement due au caractère très hydraté du cation Mg²⁺* (cf. Bénézeth et al., 2011, 2013a). En effet, la fréquence d'échange de molécules d'eau depuis la sphère d'hydratation du Mg²⁺ est inférieure de près de 4 ordres de grandeur à celle de Ca²⁺ (Bleuzen et al., 1997; Larentzos and Criscenti, 2008), ce qui explique la faible réactivité générale de la magnésite, et notamment son aptitude limitée à précipiter. Cette caractéristique rend toutefois le minéral attractif pour la séquestration minérale du CO₂, puisque la magnésite peut ainsi stocker du carbone sans risque de re-dissolution (Gautier, 2012). Par ailleurs, l'effet des ligands organiques sur sa solubilité et vitesse de précipitation a été également déterminé (Gautier et al., 2009, 2010, Gautier, 2012) montrant par exemple que l'addition d'oxalate ou de citrate à la solution (100-150°C) entraîne une diminution de la vitesse de précipitation de la magnésite du fait d'une part de

la complexation des cations Mg^{2+} en solution, et d'autre part de l'interaction entre ces ligands et la surface minérale (adsorption) (Figure 4). Ces résultats suggèrent que si la précipitation de la magnésite est l'étape limitante dans le processus de carbonatation de minéraux silicatés magnésiens, les acides organiques ne peuvent pas être utilisés comme "catalyseur" global de ce processus.

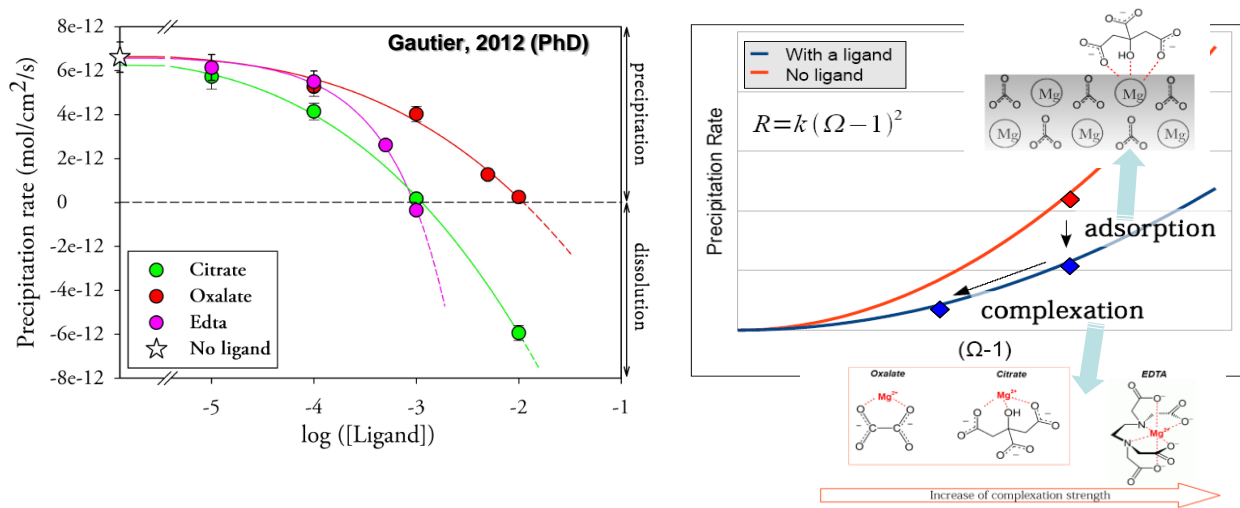


Figure 4 : Effets des ligands organiques sur la vitesse de précipitation de la magnésite (Gautier, 2012)

Nous avons démontré par nos travaux décrits ci-dessus, que l'étape limitante de la réaction globale de carbonatation (Eq. 1) n'est pas la dissolution du silicate magnésien mais bien la cinétique lente de précipitation de la magnésite (2-3 ordres de grandeur plus faible, Saldi et al., 2012). Cependant de récentes études, menées au Pacific Northwest National Laboratory (PNNL, Richland USA) (e.g., Kwak et al., 2011; Loring et al., 2011; Felmy et al., 2012; Schaef et al., 2013, Bénézeth et al., 2013b), ont montré que la précipitation de magnésite peut se produire au cours de la carbonatation d'hydroxydes (brucite) ou silicates de magnésium (forstérite) dans des expériences réalisées en présence de CO_2 supercritique (CO_{2sc}) mouillé (90 bars) et pour des températures aussi basses que $35^\circ C$ (Felmy et al., 2012), des conditions proches des puits d'injection par exemple. La minéralisation effective d'une partie du CO_2 sous la forme de carbonates de Mg-Fe-Ca après réaction de quelques mois avec un basalte a également été démontrée expérimentalement de 40 à $250^\circ C$ (e.g., Schaef et al. 2009 ; Gysi and Stefánsson, 2012 a,b, Rosenbauer et al., 2012). Par ailleurs, de nombreuses études expérimentales ont été menées sur la forsterite broyée pour examiner les mécanismes et la cinétique de sa carbonatation dans des

conditions expérimentales variées (e.g., O'Connor et al., 2004 ; Giammar et al., 2005; Béarat et al., 2006; Dufaud et al., 2009; Garcia et al., 2010; King et al., 2010 ; Sissman, 2013). La motivation derrière la plupart de ces études était d'évaluer la carbonatation ex-situ de l'olivine plutôt qu'in-situ. Il est généralement supposé que ces données peuvent être directement intégrées dans les modèles numériques de chimie-transport (e.g., TOUGHREAC : Xu et al, 2011) et permettront ainsi de prédire de façon pertinente l'évolution des réservoirs géologiques du stockage *in situ* (e.g., Xu et al. 2004). Toutefois, les travaux menés au cours des dernières années sur le stockage géologique (radionucléides, CO₂, ...) ont montré qu'il était nécessaire d'intégrer expérimentalement les effets couplés des réactions chimiques et des paramètres hydrodynamiques pour développer des modèles réalistes du devenir des produits stockés dans le sous-sol (Steefel et al., 2005 ; Kazuba et al., 2013). Ces travaux indiquent, par exemple, que les changements de minéralogie associés aux réactions chimiques modifient non seulement la porosité des roches mais aussi les lois phénoménologiques reliant porosité et perméabilité (Luquot et Gouze, 2009 ; Luquot et al, 2012, Rosenbauer et al, 2005).

Les travaux publiés sur les expériences de percolation-réactive dans les roches basiques et ultrabasiques sont peu nombreux : Andreani et al (2009) et Peuble et al (2014a,b) pour les systèmes ultrabasiques (travaux financés par l'ANR CO2FIX) et Galeczka et al (2014) pour les systèmes basaltiques. Ils ont été réalisés dans des conditions de pression-température (20-55°C & 0.1MPa pour les basaltes et 180°C & 20MPa pour les roches ultrabasiques), de flux (300 mL/h pour les basaltes et 0.1-10 mL/h pour les roches ultrabasiques) et de composition des fluides injectés (pCO₂, ajout ou non de NaHCO₃) très variables et restent donc encore difficilement comparables entre eux et généralisables pour tous les réservoirs ultrabasiques dans le cadre d'une injection à basse température (<80°C). Toutefois, un résultat commun à l'ensemble de ces études est la différence entre les taux de carbonatation et de dissolution des silicates et l'évolution des propriétés physiques et hydrodynamiques des roches mesurées pendant les expériences et ceux prédits par la modélisation numérique (e.g., Galeczka et al, 2014). Les premières études réalisées sur les roches ultrabasiques (Andreani et al, 2009 ; Peuble et al, 2014a,b) montrent que:

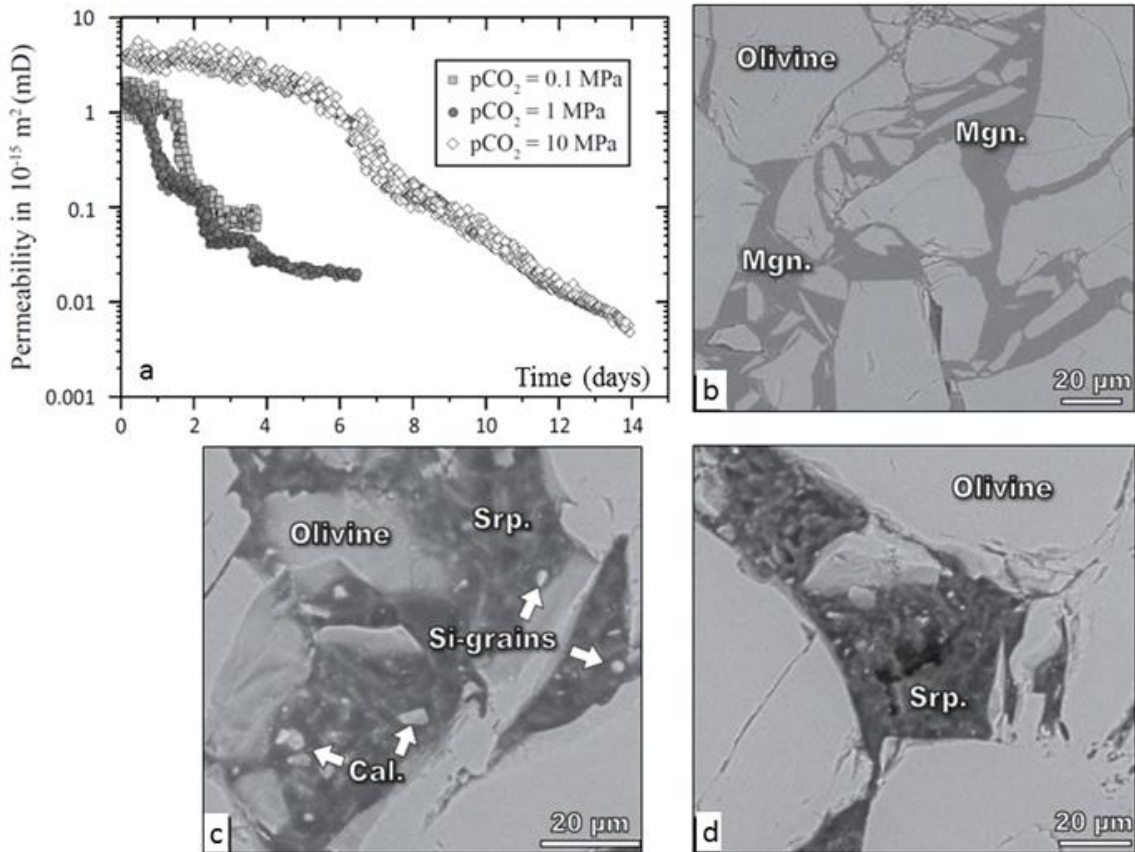


Figure 5: Expériences de percolation réactive : dunite synthétique percolée par une eau à l'équilibre avec un réservoir basaltique enrichie en CO_2 à $T=185^\circ\text{C}$; (a) variations de perméabilité (10^{-15}m^2) en fonction du temps (jours); images MEB des échantillons percolés après les expériences réalisées avec $p\text{CO}_2 =$ (b) 10MPa, (c) 1MPa and (d) 0.1MPa (T 190°C ; P 20MPa, d'après Peuble et al, subm.); Abbr.: Mgn : Magnesite, Cal : Calcite, Srp : Proto-serpentine.

* les variations de perméabilité des roches ultrabasiques lors de la carbonatation sont contrôlées par la co-précipitation localisée de minéraux hydratés (Figure 5), et non pas des variations de porosité liées à la précipitation des carbonates comme prédit initialement (e.g., Xu et al, 2004) ;

* les taux de réactions sont plus faibles de 2-3 ordres de grandeurs que ceux déduits des expériences en réacteurs réalisées dans les mêmes conditions de pression et température et ils varient en fonction des flux injectés mais de façon non-linéaire, ce qui suggère un contrôle par plusieurs paramètres évoluant à des échelles de temps et d'espace différentes;

* les variations locales de Peclet contrôlent en partie la réactivité des systèmes percolés : les conditions de fort flux favorisent le développement de phases passivantes à l'interface eau-

olivine alors que la précipitation de carbonates et de phases hydratées sera localisée préférentiellement dans les zones de flux plus diffus.

Ces travaux préliminaires montrent la nécessité d'initier un véritable effort de recherche pour améliorer les connaissances sur les processus contrôlant la carbonatation des basaltes et roches ultrabasiques depuis les conditions hydrothermales jusqu'à celles pertinentes pour le stockage du CO₂ dans les ophiolites (conditions qui restent à déterminer en fonction des cibles de stockage potentielles : on shore ou offshore), pour mesurer les paramètres permettant de les décrire et pour les intégrer dans les modèles de chimie-transport.

La plupart des décrites dans cette section ont été réalisées dans le cadre du projet ANR CO2FIX (GET, GEOM, IPGP, ICMCB) dont l'objectif principal a été de développer, grâce à un programme expérimental et numérique soigneusement planifié, les bases scientifiques fondamentales pour la généralisation des méthodes de séquestration dans des roches basaltiques. Pour ce faire, CO2FIX a bénéficié des données qui ont été obtenues sur le site pilote basaltique de stockage de CO₂ associé à la centrale géothermique de Hellisheidi (Islande, CarbFix project : Gislason et al., 2010 ; Matter et al., 2011; Ragnheidardottir et al., 2011 ; Gislason and Oelkers, 2014 ; <http://www.or.is/en/projects/carbfix>). Ce site pilote visait à évaluer la faisabilité de stocker de manière permanente en profondeur du CO₂ minéralisé dans des roches mafiques. Le projet CO2FIX a permis une meilleure quantification de la distribution de phases minérales secondaires dans les fractures et leurs effets sur la perméabilité dans de nombreux réservoirs géologiques. Il a apporté également des données uniques sur la réactivité des écosystèmes profonds associés aux roches basaltiques et ultrabasiques, leur rôle dans l'altération des basaltes et la précipitation des carbonates.

En effet, l'existence désormais reconnue d'écosystèmes profonds dans ces environnements amène à se poser la question de leur réponse aux injections et de leur implication dans les réactions de séquestration à toutes les échelles de temps (e.g., Ménez et al., 2007 ; Guyot et al., 2011). Le CO₂ injecté constitue à la fois une source de carbone pouvant permettre le développement ou la stimulation d'une vie microbienne en profondeur, mais également une perturbation importante pour ces communautés (i.e. stress acidifiant et oxydant). Les microorganismes étant toutefois capables de s'adapter très rapidement à des conditions environnementales changeantes, les interactions avec le CO₂ injecté peuvent s'avérer très rapides. L'importance, en termes de volumes

impliqués, des processus bio-induits ou bio-contrôlés reste encore aujourd'hui mal contrainte et l'on ne sait actuellement s'ils restent marginaux par rapport aux réactions inorganiques ou s'il participent-ils activement au système en accélérant notamment certaines cinétiques réactionnelles. Ils ont notamment la capacité d'amener in fine à un blocage voire à une inversion des processus visés en déplaçant les équilibres chimiques, en bravant des barrières thermodynamiques ou en amenant localement à un changement local des conditions physico-chimiques du milieu. Les effets peuvent être à double sens et il est donc important d'en avoir la mesure car les assemblages de colonies microbiennes enfermées dans les biofilms qui se développent aux interfaces entre minéraux et fluides, peuvent soit servir de drain et accélérer la mobilisation des ions ou au contraire empêcher tout échange entre roche et fluide. Idéalement il serait bénéfique dans une optique de stockage minéral in situ ou ex situ de mettre à profit les capacités minéralisantes de cette biosphère pour optimiser les rendements de minéralisation du CO₂ en carbonates solides. En fonction des métabolismes mis en jeu, l'activité microbienne peut induire une acidification ou une alcalinisation du milieu et avoir ainsi des conséquences respectivement sur la dissolution des roches ou la carbonatation du CO₂. Dans ces interactions doit également être considéré le rôle des biofilms, mode privilégié de colonisation des roches par ces communautés microbiennes ou celui des impuretés co-injectées avec le CO₂ qui n'auront vraisemblablement que peu d'influence sur les réactions abiotiques mais peuvent constituer des substrats métaboliques biodisponibles.

Si peu de choses sont actuellement connues sur la nature et le comportement de ces écosystèmes tant au travers d'approches naturalistes que sur le plan expérimental (Morozova et al., 2011 ; Wandrey et al., 2011 ; West et al., 2011 ; Dupraz et al., 2014), le retour d'expérience sur le site pilote islandais montre que ces aspects avaient été négligés (car pas connus) au moment de l'implémentation de ce pilote. Dans le cadre du projet CARBIFIX et du Centre de recherches sur le stockage du CO₂ (IPGP/TOTAL/SCHLUMBERGER/ADEME) a été réalisé depuis octobre 2008 un suivi de la diversité microbienne sur ce site pilote d'injection de CO₂. Lors de la phase de démonstration, au niveau du premier pilote d'injection (dénommé CARBIFIX-1), du CO₂ pur (commercial) ou mélangé à de l'H₂S et de l'H₂ issu de la centrale thermique Hellisheidi a été mélangé à l'eau souterraine du site et injecté durant l'année 2012 dans la nappe phréatique située entre 400 et 1000 mètres de profondeur. Ont été collectées et filtrées stérilement les eaux souterraines de six puits d'observation se trouvant jusqu'à 2,5 km en amont du site d'injection, et ceci pendant 4 ans avant l'injection puis à 4 reprises durant les 7 mois d'injection. L'ADN des

microorganismes retenus sur les filtres a été extrait pour caractériser les gènes codant pour les ARN 16S par clonage et séquençage Sanger ainsi que par pyroséquençage, afin d'identifier par analyse phylogénétique les différentes bactéries et archées présentes et inférer leurs métabolismes putatifs. Des gènes d'identité et de métabolisme ont également été quantifiés par PCR quantitative (en lien avec la fixation du carbone, de l'azote, les cycles du fer, du soufre, de l'azote ou la méthanogenèse/méthanotrophie). Cette analyse de la diversité microbienne suite à une injection de CO₂ et CO₂/H₂S/H₂ dans un aquifère situé au cœur de roches mafiques a montré (Le Campion et al., 2014 ; Trias et al., 2014a,b):

1) Une biosphère souterraine riche et abondante est présente au niveau du site de stockage. L'écologie est toutefois difficile à décrire car un grand nombre d'espèces sont totalement inconnues.

2) Cette communauté microbienne réagit très rapidement à l'injection de CO₂ en s'adaptant et le CO₂ favorise la croissance d'organismes autotrophes qui le consomment et le développement de biofilm. Certains métabolismes semblent favorables à la carbonatation. Un contrôle microbien du potentiel redox de l'aquifère semble toutefois favoriser la formation d'argile au dépend des carbonates, notamment au travers de la bio-oxydation du fer.

3) La co-injection d'H₂S avec le CO₂ perturbe moins la communauté microbienne de l'aquifère car le stress oxydatif est moins important (communauté similaires à la période préinjection). Ceci conduit toutefois à une augmentation de la biomasse dans l'aquifère mais également à une perte d'injectivité d'un facteur 10 autour du puits d'injection et à un bouchage des puits. C'est la raison pour laquelle l'injection sur le pilote CARBFIX-1 a été arrêtée.

4) Une fraction du carbone injecté est donc immobilisée sous forme réduite (*i.e.* biomasse) dans l'aquifère, voie de stockage qui n'est à ce jour pas prise en compte dans les modèles prédictifs géochimiques. Du plus les métabolismes microbiens jouent un rôle sur la géochimie de l'aquifère et la minéralisation (Figure 6).

Ces écosystèmes profonds ne peuvent toutefois être actifs que pour des températures compatibles avec le développement de la vie (*i.e.* inférieures à 120°C). Ainsi depuis que l'injection se poursuit dans le cadre du programme CARBFIX-2 (<https://www.or.is/en/projects/carbfix>) à plus

haute température (i.e. 200°C) aucun problème de clogging n'a été reporté pour des quantités injectées qui sont de l'ordre d'un démonstrateur industriel.

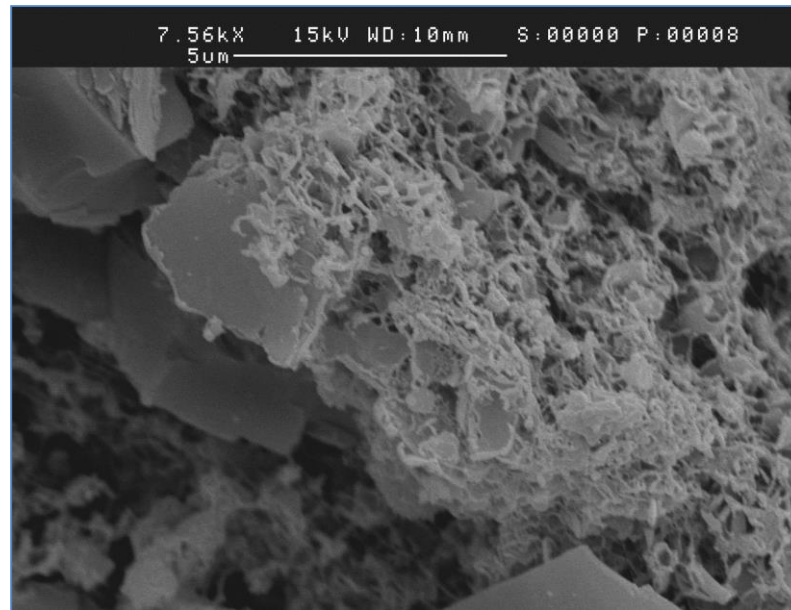


Figure 6: Cliché de cryomicroscopie électronique à balayage mettant en évidence sur les grains de basaltes de l'aquifère d'Hellisheidi, la présence de microorganismes adhérant à la roche au sein d'un biofilm. Lors des injections de CO₂ et de CO₂/H₂S/H₂, ces microorganismes ont joué un rôle sur le devenir du CO₂ en l'assimilant sous forme de biomasse ou en affectant la physico-chimie de l'aquifère et notamment son état redox (Le Campion et al., Trias et al., soumis).

En parallèle, les premiers résultats issus de l'analyse des traceurs co-injectés avec le CO₂ (¹⁴C et fluorochromes) lors de l'injection de 170 tonnes de CO₂ en Islande, au préalable dissous à mi-profondeur, montreraient **qu'environ 80% du CO₂ injecté ne se retrouvent pas dans les puits d'observation et pourrait avoir ainsi été converti en carbonates** (Gislason and Oelkers, 2014) **en seulement un an, entre 20 et 50°C et à entre 500 et 800 mètres de profondeur.**

L'injection de CO₂ dans les basaltes a été réalisée avec succès dans les deux sites pilotes (Islande et USA) Cependant cette méthode nécessite beaucoup d'eau, seulement 5 % de la masse injectée est du CO₂. Des basaltes poreux près des marges continentales ont des capacités de stockage énormes adjacentes aux provisions presque illimitées d'eau de mer. Sur les continents, le fluide présent dans la formation cible pourrait être pompé et utilisé pour dissoudre le CO₂ pendant l'injection mais cela engendrera des coûts supplémentaires. Le coût évalué de stockage et le transport d'une tonne de CO₂ sur le site CarbFix via l'injection dissoute d'eau est d'environ 17\$

(Ragnheidardottir et al., 2011), deux fois plus qu'une injection directe de CO₂ pour le projet Big-sky ou les projets d'injections dans les bassins sédimentaires (Ragnheidardottir et al., 2011 ; McGrail et al., 2011). Toutefois, la dissolution de CO₂ avant son injection définitive dans le réservoir élimine 1) une trop forte réactivité des roches proches du puits d'injection, 2) les effets gravitaires et donc 3) réduit considérablement les risques de fuite et 4) accélère la séquestration minérale.

L'ensemble de ces résultats pourra être utilisé pour optimiser et généraliser un protocole d'injection assurant à la fois le succès de l'étude du site pilote et la capacité à piéger le CO₂ dans d'autres réservoirs mafiques et ultramafiques (Oman, Nouvelle Calédonie, ...). En effet ces formations ultrabasiqes sont abondantes et largement distribuées on shore (complexes ophiolitiques) et offshore (fond océanique). Les analogues naturels de stockage de CO₂ dans des roches ultramafiques sont répandus (e.g., Hansen et al., 2005; Nasir et al., 2007; Boschi et al., 2009; Beinlich et al., 2010; Beinlich and Austrheim, 2012) et enregistrent souvent une carbonatation massive (100-10⁵ Gt, > 10,000 ans) (Kelemen and Matter, 2009 ; Matter and Kelemen, 2010 ; Kelemen et al., 2011) démontrant qu'il est possible de stocker de grandes quantités de CO₂ dans ces formations via la carbonatation minérale *in situ*. Cependant, les recherches ciblant des substrats péridotitiques sont beaucoup moins avancées que celles visant les basaltes. Il n'existe pas encore de projet pilote comme celui de Hellisheidi en Islande, mais de récentes découvertes réalisées par les chercheurs de l'Université de Columbia (partenaires du projet CARBFIK, en Islande) dans le massif de péridotites d'Oman montrent l'importance du potentiel de la séquestration minéralogique du CO₂ dans les roches ultrabasiqes (Kelemen et Matter 2008 ; Kelemen et al., 2011). Toutefois, même si ces roches ont des caractéristiques similaires, elles ont aussi des différences notables en terme de distribution, de porosité et perméabilité, de composition minéralogique et chimique qui ont des conséquences majeures sur les contraintes technologiques des processus à mettre en œuvre pour la minéralisation *in situ* du CO₂.

Un projet de forage de recherche ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) portant sur l'ophiolite d'Oman est actuellement en cours de financement ; les forages de l'Oman Drilling Project (ODP ; Porteur : P. Kelemen) devraient commencer fin 2015-début 2016. Un des objectifs de ce projet est la caractérisation des processus de serpentinisation et de

carbonatation qui ont lieu actuellement dans les péridotites ophiolitiques d'Oman, à partir de mesures en forage et sur échantillons forés. Ces travaux apporteront les premiers éléments d'information nécessaires (perméabilité, fracturation naturelle in situ...) au dimensionnement d'un éventuel puits pilote pour l'étude du stockage du CO₂ dans les péridotites et ce, en complément des études expérimentales menées jusqu'à aujourd'hui.

A noter que pour les effets bio induits (i.e. assimilation du carbone par la biomasse, biocarbonatation ou biodissolution), ceux-ci sont à l'heure actuelle encore trop peu souvent contraints par manque de connaissance même si les écosystèmes présents dans les basaltes ont fait l'objet d'un effort d'exploration conséquent à l'échelle internationale ces 5 dernières années, notamment outre Atlantique avec le soutien financier de la NSF à l'ambitieux Center for Dark Energy Biosphere Investigations (C-DEBI) ou les campagnes IODP dédiées. Pour les basaltes il a ainsi été estimé que 1×10^{12} g C de biomasse primaire peut s'accumuler annuellement dans la croûte océanique et ceci sur la base du volume de matériel crustal accessible, la quantité d'eau recyclée par la circulation hydrothermale, en prenant notamment en compte les métabolismes liés à l'hydrogène, au fer et au soufre sur lesquels reposent ces écosystèmes profonds. Pour les péridotites, le panorama reste vague car la communauté scientifique commence à peine à y recenser des microorganismes et à caractériser leurs métabolismes. Toutefois les bilans thermodynamiques montrent que les roches ultramafiques sont capables de fournir deux fois plus d'énergie métabolique que les basaltes (McCollom & Bach, 2009, Amend et al., 2011), laissant ainsi supposer que les interactions et effets bioinduits y seront plus importants qu'en Islande pour des zones de températures compatibles avec le développement de la vie.

II-3) Points critiques du CCS

A l'heure actuelle plusieurs questions subsistent sur les limitations au déploiement du CCS. D'une part le facteur économique reste un frein essentiel, en effet les droits d'émission en Europe imposé par un marché de droits d'émission de CO₂ ont chuté à des valeurs historiquement basses (2\$/tonnes de CO₂) alors que le coût de stockage + captage de CO₂ est évalué entre 30 et 100\$ par tonne de CO₂.

Les risques associés au stockage demeurent également une préoccupation systématique, l'exemple de fuites par les puits injecteurs, ou des accumulations de CO₂ dans des aquifères d'eau potables sont toujours à l'étude. En conséquence, l'acceptation sociale et la confiance dans cette nouvelle technologie est encore largement discutée, pouvant aller même jusqu'à provoquer l'arrêt du déploiement; par exemple en Hollande, le stockage on-shore est désormais interdit.

Enfin, le manque de retour d'expérience de sites démonstrateurs fonctionnant à l'échelle commerciale (stockage de plusieurs millions de tonnes) ne permet pas d'apporter suffisamment d'éléments sur la faisabilité d'une telle technologie dans des systèmes géologiques pouvant varier fortement d'un pays à l'autre. La création de nouveaux projets de stockage de CO₂ massif reste donc une plus-value essentielle à la contribution de réduction de gaz à effets de serres dans le contexte proposé par les protocoles de Kyoto et les feuilles de route proposées par l'Agence International de l'Energie (IEA) pour atteindre des objectifs de réductions de 20% d'ici 2050.

III) DESCRIPTION GEOLOGIQUE DES SITES – ONSHORE (GRANDE-TERRE)

Cette synthèse a bénéficié de la connaissance géologique au SGNC (Service Géologique de Nouvelle-Calédonie) et de P. Maurizot du BRGM, ainsi que des bases de données au SGNC/DIMENC et a fait l'objet d'un rapport intermédiaire (Thinon, et al., 2014, BRGM/RP-63135-FR).

La Grande Terre de Nouvelle-Calédonie, terminaison nord de la ride de Norfolk, montre à l'affleurement une grande hétérogénéité et complexité géologique (cf. Figure 7).

Les usines métallurgiques en activité (voir Figure 8) sont implantées sur la côte ouest de l'île sur des formations géologiques différentes :

- L'usine SLN située à Nouméa (Doniambo) est implantée sur les formations sédimentaires d'âge crétacé supérieur à éocène. Elles ont été plus particulièrement étudiées dans la région de Bourail ;

- L'usine Vale NC située dans la région Sud à Goro est implantée sur la nappe des péridotites, obductée à la fin de l'Eocène supérieur ;
- L'usine KNS située dans la région de Koné est implantée dans la région de l'unité de Poya (basaltes), obductée à la fin de l'Eocène supérieur.

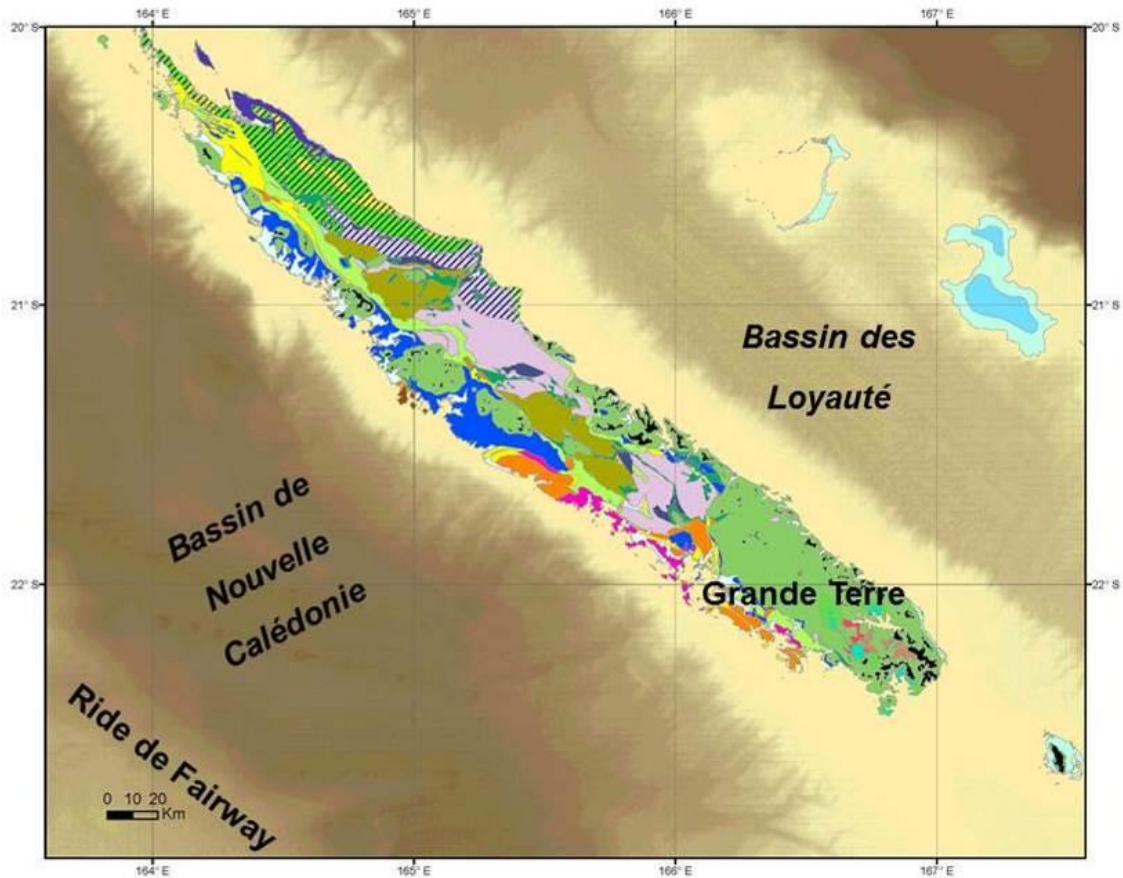


Figure 7 : Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie au 1/500 000 (Maurizot et al., 2009) et morphologie du domaine offshore (Atlas bathymétrique de la Nouvelle-Calédonie DTSI & Zonéco ; système de coordonnées WGS84 projection Mercator parallèle standard 21.5°S et méridien standard 165°E). Les zones de faible profondeur d'eau, le plateau, sont représentées dans les teintes beiges. Le domaine offshore profond est dans les teintes marrons. Vert : nappe des péridotites ; bleu : unité basaltique de Poya, orange à jaune : couverture sédimentaire du Crétacé/Oligocène (cf. légende de la carte géologique à 1/500000).

Les formations géologiques ne sont généralement connues que par les affleurements de surface et quelques sondages peu profonds. Seul le secteur de Bourail a fait l'objet d'un forage pour recherche d'hydrocarbure de 2000 m de profondeur.

Les sites d'activité du nickel en Nouvelle-Calédonie
2012

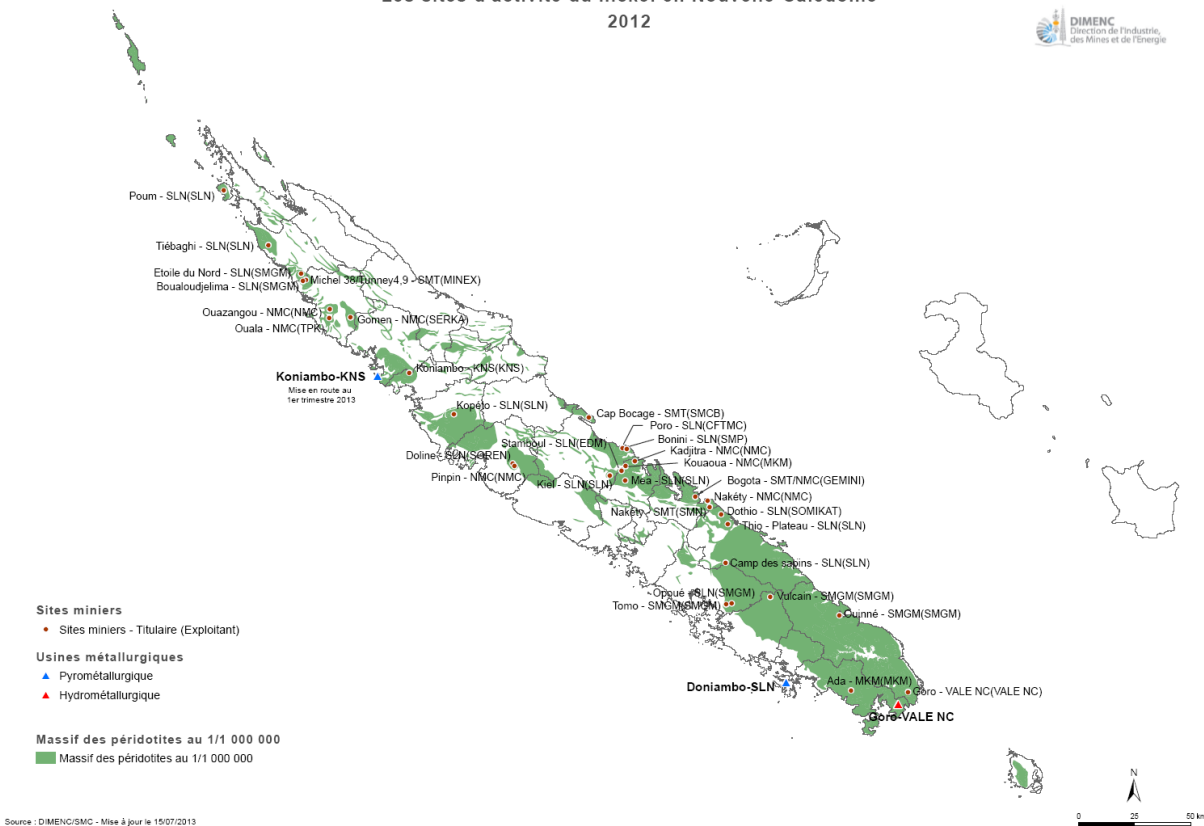
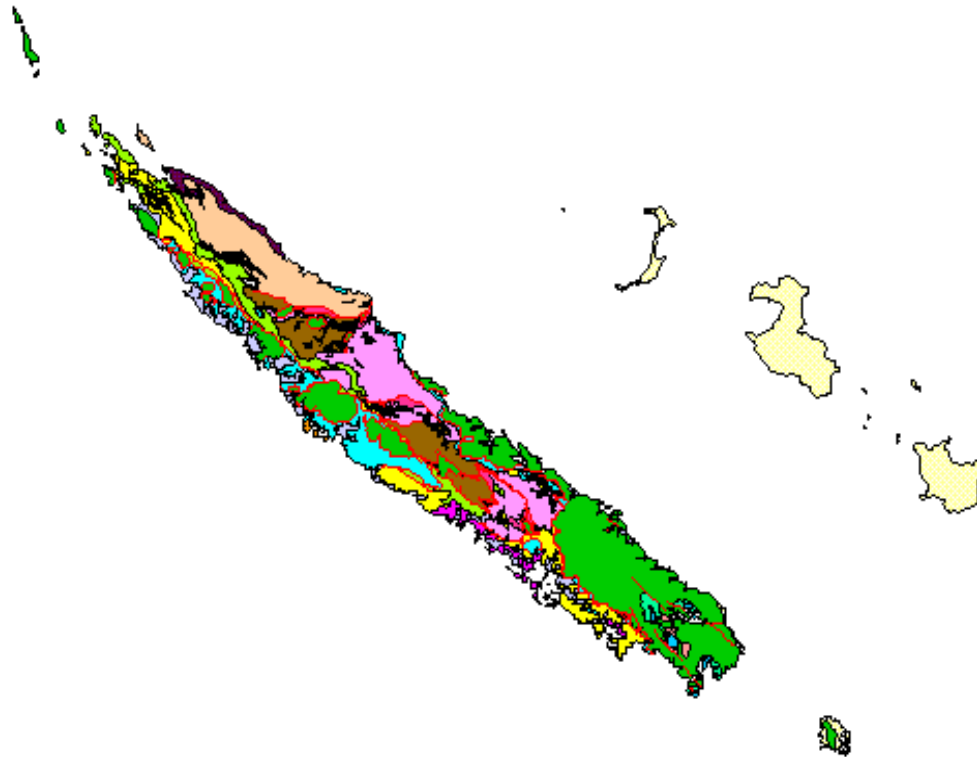


Figure 8 : Sites liés à l'exploitation du Nickel en Nouvelle-Calédonie

III-1) Connaissance géologique à l’affleurement

Les cartes actuellement disponibles fournissent une synthèse de la connaissance géologique des formations et des structures à l’affleurement. Plusieurs cartes géologiques sont à disposition, dont certaines ont été publiées récemment:

- La carte géologique générale de la Nouvelle-Calédonie à l’échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009). Elle présente les principales unités du substratum (Figure 9).
- Les cartes géologiques à l’échelle 1/50000 de qualité inégale et généralement anciennes (< 1986) existent sur toute la Nouvelle-Calédonie. Des cartes plus détaillées (1/20 000 à 1/25 000) existent pour les régions de Nouméa (Maurizot, 1986), de Koniambo (Maurizot et al., 2002 ; Maurizot, 2007), et de Goro. Cette dernière inclus une cartographie détaillée du régolithe (Sévin et al., 2012).



LEGEND			
Quaternary		alluvial	
		uplifted reefs	
Tertiary and post-tectonic units		Miocene Nepoui limestone	
		granite post nappe	
Poya nappe		basalts	
Peridotites nappe		gabbros	
		dunites	
		harzburgites and serpentinites	
Metamorphic units		Diahot metamorphic unit	
		Pouebo metamorphic unit	
Cretaceous-Eocene cover units		flysh, phthanites (cherts) and limestones (Paleocene-Eocene)	
		"formation à charbon" and volcanics (Cretaceous)	
Permo-Mesozoic ante-Cretaceous units		volcanoclastiques mésozoïc of the central ranges	
		polymétamorphic unit of Boghen	
		Téremba unit	
		Koh ophiolites	
Unconformities		main structural unconformities	

Figure 9 : Extrait de la carte géologique à 1/500 000 (Maurizot et al., 2009)

Les principales formations géologiques observées sur la côte ouest de la Grande-Terre sont, des plus anciennes aux plus récentes (Figure 10, Maurizot et al., 2009) :

- 1) des formations composites assemblées pendant une période de convergence allant du Carbonifère supérieur au Crétacé inférieur (cycle ante-sénonien, 300 - 100 Ma);
- 2) des unités mises en place à partir du Sénonien et avant le Miocène (cycle néo-calédonien, 100 - 24 Ma) dans lesquelles on distingue :
 - une couverture sédimentaire d'âge Crétacé supérieur à Eocène qui affleure dans la région de Nouméa ainsi qu'au niveau de l'anticlinal de Bourail (Montagnes Blanches). Elle s'est déposée en contexte extensif de rift, puis en contexte de convergence à partir de l'Eocène;
 - des unités ophiolitiques obductées à la fin de l'Eocène supérieur dont l'unité de Poya, constituée principalement de basaltes, et la nappe des péridotites qui constitue les principaux massifs (Koniambo, Kopéto, Massif du Sud).
- 3) des formations marines et continentales du cycle post-obduction miocène à actuel.

D'une manière générale, la géologie de la Nouvelle-Calédonie est complexe et la prévisibilité de l'extension des unités qui la constituent est de faible à très faible portée. La Ride de Norfolk qui porte la Grande-Terre, sa partie émergée, correspond à une ancienne zone de frontière interplaque, entre le domaine océanique Pacifique et le continent Australien. Elle a joué à plusieurs reprises entre 300 Ma et 34 Ma. Même si actuellement la zone d'affrontement de plaques se place plus à l'Est, au niveau du Vanuatu, l'évolution géodynamique ancienne a laissé un héritage complexe avec notamment la mise en place de plusieurs unités allochtones en provenance du domaine Pacifique.

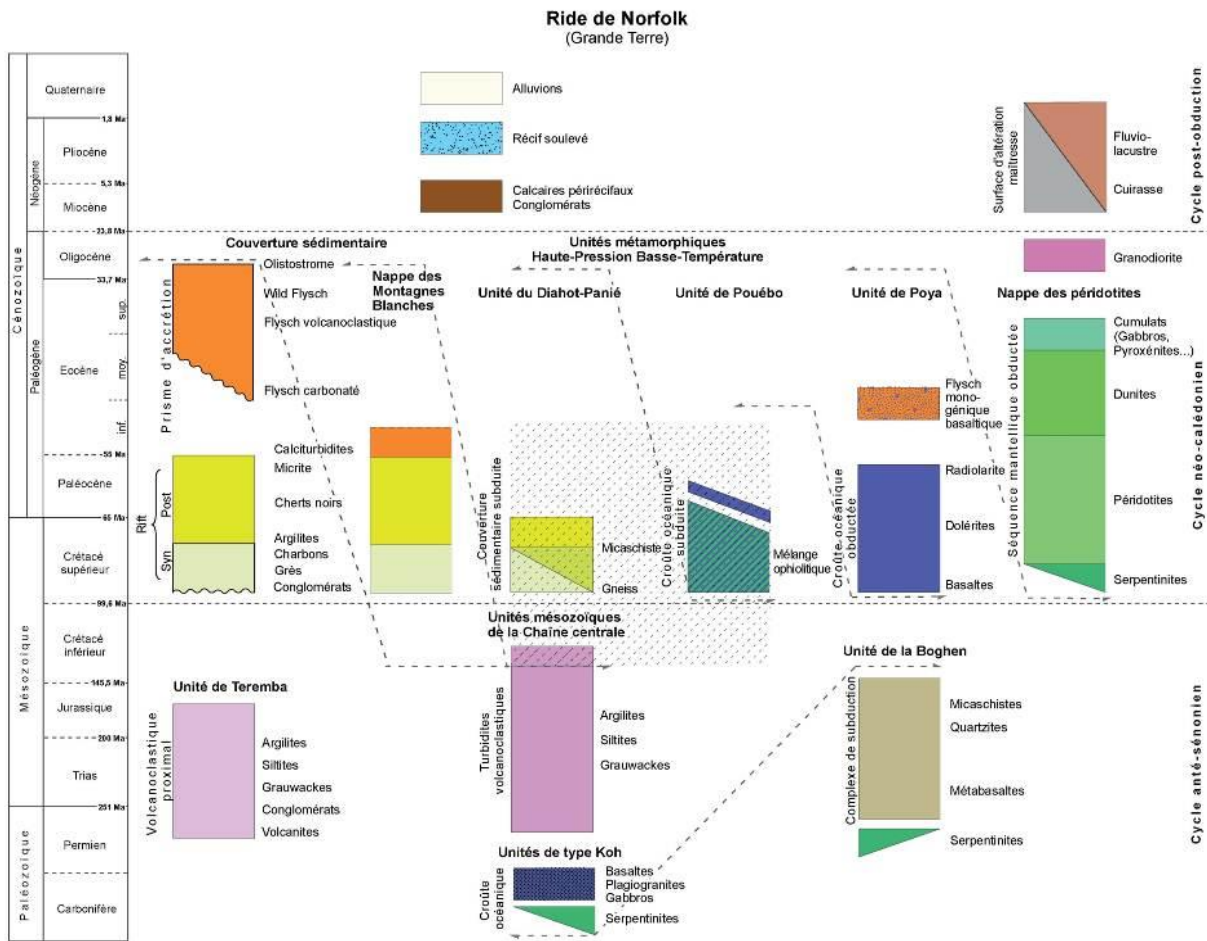


Figure 10 : Unités géologiques de Nouvelle-Calédonie (extrait de la carte 1/500000 de Maurizot et al., 2009)

On peut résumer succinctement la géologie de la Nouvelle-Calédonie ainsi (Cluzel et al. 2012):

- Un socle formé à la marge est du Gondwana entre 300 et 100 Ma, résultant de l'accrétion de plusieurs unités tectono-stratigraphiques ("terranes" au sens de Monger and Price, 1979 par exemple). Ces unités sont constituées par des éléments d'ophiolites (lithosphère océanique) et des empilements sédimentaires monotones formés à la périphérie d'arcs volcaniques (sédiments volcanoclastiques ou grauwackes).
- Une couverture sédimentaire de 100 à 34 Ma, qui peut atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur, discordante sur les unités de socle. Elle est contemporaine d'une expansion de 100 à 55 Ma et d'un amincissement généralisé de la marge Est gondwanienne à l'origine de

l'isolement de lanières continentales dont la ride de Norfolk. Puis entre 55 et 34 Ma, une convergence, prélude à l'obduction de plusieurs unités allochtones dont l'unité de Poya (croûte océanique) puis la nappe des péridotites (manteau supérieur). Cette dernière est un constituant majeur du paysage géologique calédonien et structurellement le plus élevé, car l'un des derniers à avoir été mis en place, au sommet du bâti de l'île.

- Les événements post-obduction ont pour principal effet l'altération et l'érosion de l'ensemble des structures précédentes en contexte tropical (qui a produit les gisements de nickel à partir des péridotites), et le jeu de failles affectant l'ensemble du bâti, qui a abouti à sa morphologie actuelle.

La lithologie des formations géologiques à l'affleurement servant de soubassement aux usines métallurgiques, comme la nappe de péridotites (Figures 11-12), les basaltes de l'unité de Poya et les formations sédimentaires tertiaires, est relativement bien connue. Les unités ultrabasiques sont intensément altérées en surface ; cette altération essentiellement météorique est à l'origine des fortes concentrations en Ni et autres métaux associés (Co...) actuellement exploitées par l'industrie minière en Nouvelle-Calédonie.

Les unités géologiques observées à l'affleurement sur la Grande Terre sont fracturées à toutes les échelles. Elles sont recoupées par une série de failles (Maurizot et al, 2009), dont certaines sont normales (e.g. Lagabrielle et al, 2005 ; Lagabrielle et Chauvet, 2008); cette dernière structuration est liée à la tectonique régionale post-obduction. A l'échelle des affleurements, la nappe de péridotites est intensément fracturée (Figure 12). L'extension en profondeur de cette fracturation ainsi que l'impact des processus tectoniques (déformations syn- et post-obduction) dans sa structuration restent inconnus.



Figure 11 : Exemples de formations à l'affleurement dans la région Sud Goro (a) Gabbro, (b) filon de granodiorite (55 Ma).

L'état de fracturation des roches ophiolitiques est un paramètre crucial dans l'estimation des capacités de stockage des unités géologiques de la Grande Terre et dans l'évaluation des propriétés de confinement du stockage.



Figure 12 : Exemple d'affleurement de la nappe de péridotites présentant une fracturation intense du sommet à la base (commune de Yaté, Col Paillard).

III-2) Connaissance hydrogéologique de la Grande Terre

Pour l'étude du potentiel de stockage de CO₂ in-situ, la connaissance des systèmes hydrogéologiques superficiels et profonds est importante. Selon Jeanpert (2013), il existe 2 grands types d'aquifères sur la Grande Terre (Figure 13): les nappes alluviales en milieu poreux, l'hydrosystème multicouche des massifs miniers en milieu poreux et fracturé.

Si le fonctionnement hydrogéologique de la partie superficielle des formations géologiques est globalement compris, le réseau profond reste encore quasi-inconnu. Dans le massif du Sud, dans les péridotites, des tests par traçage ont montré une circulation complexe entre versants (comm. pers. Jeanpert, 2013). Si les réseaux karstiques ont bien été identifiés dans la couche saprolitique des massifs de péridotites (dolines), ils pourraient aussi exister en profondeur (comm. pers. Maurizot, 2013). Des études ont aussi été effectuées sur le système karstique pour l'usine métallurgique de Goro (Vale NC, 2009). On pourra aussi se reporter au rapport de la contre-expertise du site de stockage des résidus épais de l'usine Vale NC, situé dans le bassin versant de la Kwé Ouest (Ledoux et al., 2007).

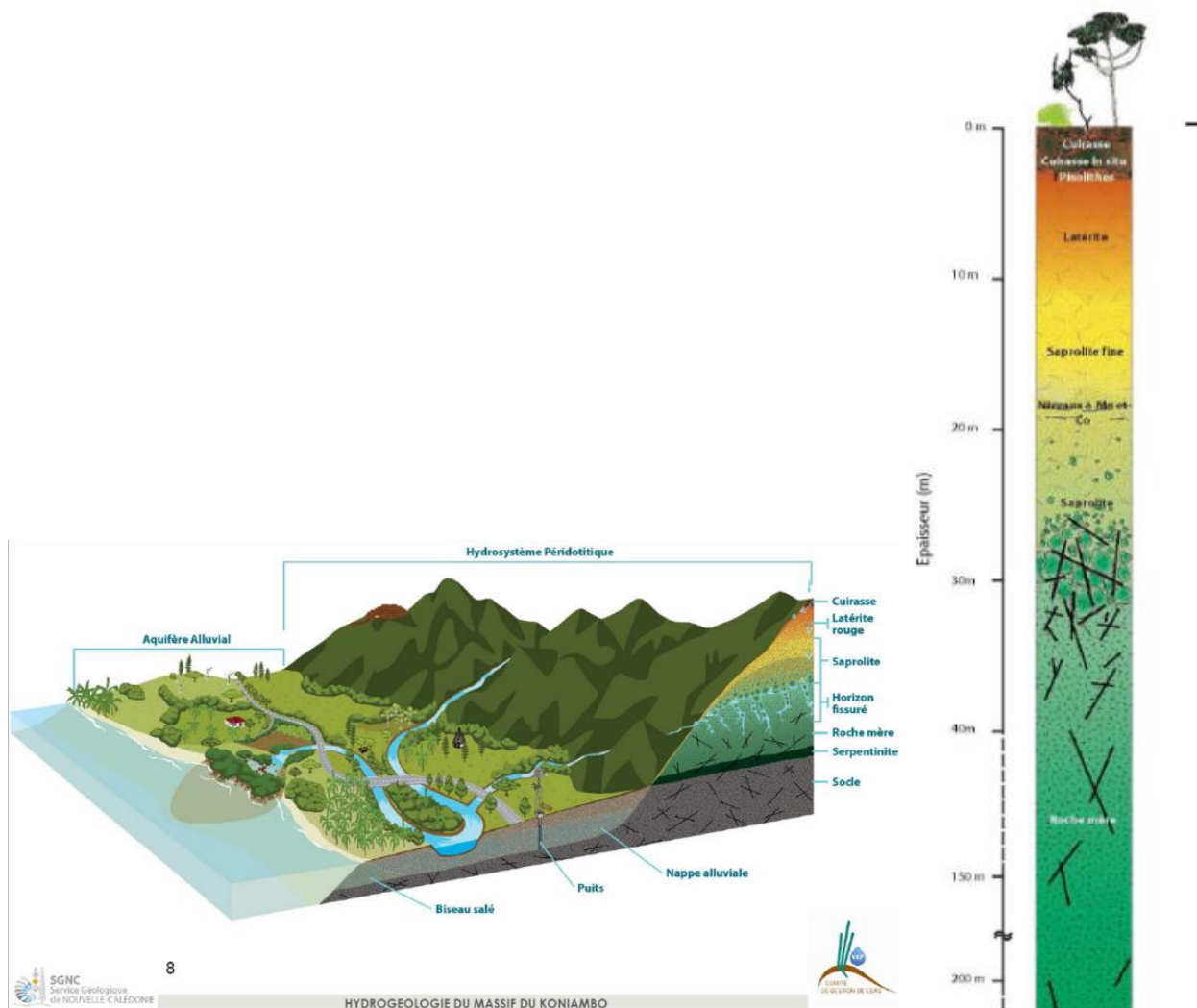


Figure 13 : Schéma des écoulements souterrains dans le massif minier du Koniambo et log schématique de la nappe des péridotites (travaux de J. Jeanpert, 2013b)

Les experts de l'Ecole des Mines de Paris, qui ont mené à bien cette étude, proposent une discussion approfondie de la structure pseudo-karstique de la partie sud-est de la Grande Terre et des conséquences sur l'hydrologie que l'on peut en déduire.

Le CNRT-Ni soutient le projet HYPERK (HYdrogéologie des PERidotites Karstifiées de Nouvelle-Calédonie) qui a démarré en 2011 et qui a pour but une meilleure connaissance des propriétés hydrologiques des faciès d'altération des péridotites. Le rapport d'avancement de Décembre 2013 peut être consulté sur le site web du CNRT <http://www.cnrt.nc/index.php?page=breves&onattr=1&brev=3&year=2013>.

Les périmètres de protection des eaux présentés en Figure 14 sont fournis par DAVAR (Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales en NC). Il existe des zones de périmètres de protection des eaux éloignées à proximité du site de Goro et de Nouméa et quelques zones de petites extensions pour le site du Nord.

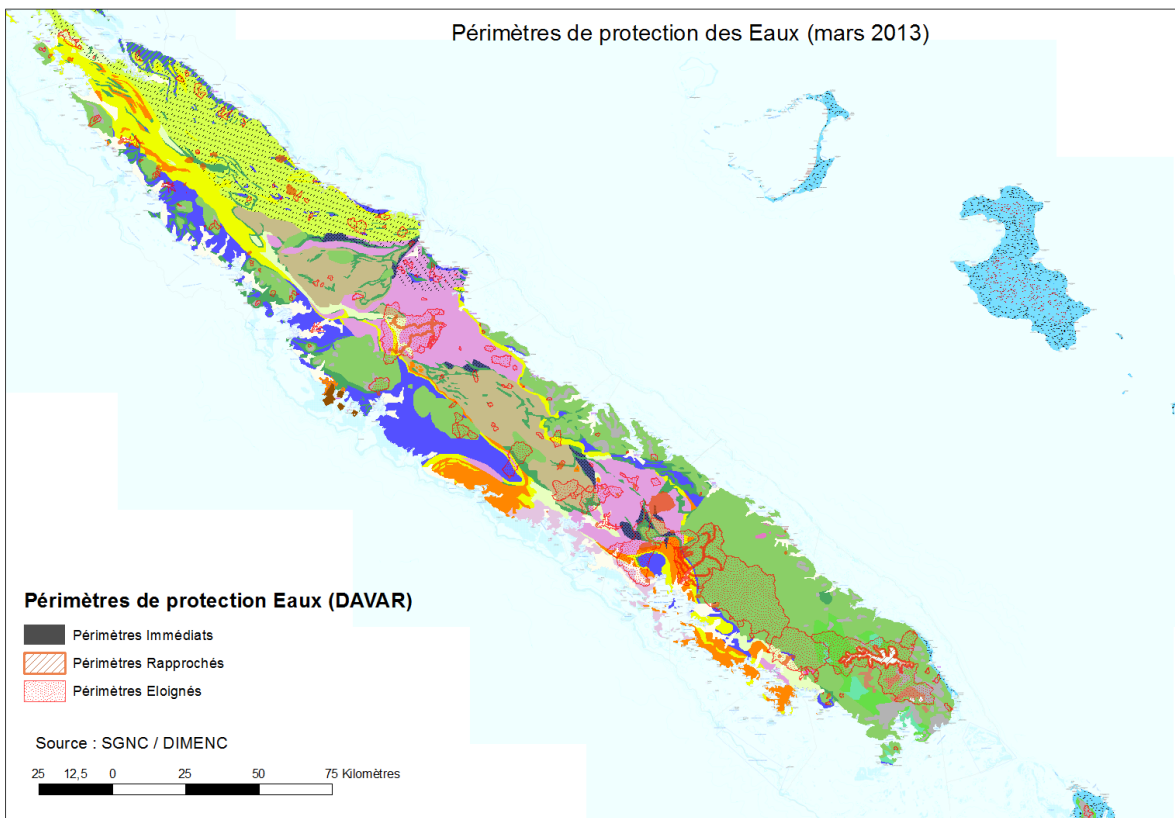


Figure 14 : Localisation des périmètres de protection des eaux (mars 2013) établi par la DAVAR sur fond de carte géologique à l'échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009).

Les systèmes hydrothermaux de la Grande Terre

Les systèmes hydrothermaux naturels de la Grande Terre peuvent apporter des éléments d'information importants sur la circulation des fluides en profondeur et le comportement d'éléments chimiques concernés. On trouve sur la Grande Terre des sources chaudes dans la région de Thio-Canala et dans la Baie de Prony (Cox et al., 1982). Les sources de la Baie de Prony sont connues depuis fort longtemps puisque Jules Garnier lui-même les a signalées dès 1873 (Launay et Fontes, 1985). Des campagnes récentes de levés bathymétriques du lagon sud (Pelletier and Chevillon, 2006; Pelletier et al., 2006) ont permis d'évaluer l'extension du système hydrothermal de Prony par la découverte de formations hydrothermales semblables à l'Aiguille de Prony. Les fluides (eaux et gaz) et concrétions de ces formations ont été échantillonnés au cours de la campagne HYDROPRONY (28 Octobre-13 Novembre 2011). Les eaux, qui sourdent à des températures jusqu'à 38°C, sont produites par la serpentinisation du substrat ultrabasique. Elles présentent des compositions chimiques très particulières, avec des pH autour de 11. Le calcium est le cation dominant. Elles sont très appauvries en magnésium et en carbone inorganique. Les gaz contiennent de l'hydrogène et du méthane. Ces sources hébergent une biosphère adaptée à l'environnement hyperalcalin. Les résultats de la campagne HYDROPRONY sont en cours de publication (Monnin et al., 2014; Quéméneur et al., submitted; Postec et al., submitted).

Le mélange des eaux formées par la serpentinisation et celles du lagon conduit à la formation d'un assemblage de minéraux secondaires (brucite et carbonates de calcium) que l'on retrouve dans des environnements similaires, comme par exemple dans les cheminées du site hydrothermal de Lost City sur la ride médio-atlantique (Kelley et al., 2001 ; Ludwig et al., 2006) ou bien dans les sources alcalines de l'Oman et de la Ligurie (Chavagnac et al., 2013a, b). A Prony on peut mettre en évidence des processus de biominéralisation et d'organominéralisation très actifs (Pisapia et al., 2013). La caractérisation du pôle hydrothermal montre que les eaux météoriques circulant dans les péridotites perdent leur carbone dissous en subsurface, ce qui indique que les formations ultrabasiques sont en effet un piège naturel pour le carbone. C'est un processus qui a aussi été mis en évidence dans les kimberlites de l'Ontario (Sader et al., 2007).

Les eaux thermales de Thio-Canala ont été très peu étudiées. Même si leur température est semblable à celles des eaux hydrothermales de la baie de Prony, leur composition chimique est très différente (Cox et al., 1982), avec un pH plus bas, autour de 8, et le sodium comme cation majeur. Cox et al., (1982) y rapportent une odeur de H₂S qui n'est pas décrite par ailleurs. Il est

probable que le système hydrothermal de Thio-Canala percole dans un substrat différent des péridotites du sud.

Les compositions chimiques des eaux des sources hydrothermales portent la signature des milieux traversés et renseignent sur les conditions des interactions eaux-roches en subsurface, ainsi que sur les paramètres hydrologiques (vitesse de circulation versus cinétique des réactions chimiques, contrainte des circuits de circulation). Elles fournissent aussi les conditions d'un "état zéro" qu'il est nécessaire de caractériser avant d'envisager le stockage de CO₂.

Une des questions récurrentes dans l'étude de la circulation hydrothermale en général est celle de la profondeur maximum de circulation des fluides. Ceci revêt un caractère particulier dans le cas des ophiolites, couches géologiques généralement relativement minces. Par exemple, Chavagnac et al. (2013b) concluent leur étude des sources alcalines du sultanat d'Oman en posant la question de la profondeur maximale atteinte par les fluides qui circulent dans les péridotites. En effet une salinité anormale de certaines sources pourrait indiquer que ces fluides auraient pu percoler jusqu'à la base de la nappe ophiolitique et auraient ainsi interagi avec les méta-sédiments sous-jacents de la plaque arabique. Ceci a bien sûr des conséquences importantes sur la composition de ces fluides et sur leur réactivité, dans le contexte naturel ou bien dans le cadre d'une pression élevée de CO₂.

III-3) Connaissance géologique en profondeur

La connaissance géologique en profondeur est fournie principalement par deux types de données: les sondages géologiques (forages) et les données géophysiques (sismique réflexion, sismique réfraction, magnétisme et gravimétrie).

Les données de forage et de géophysique qui peuvent fournir des informations sur la géologie profonde sont peu nombreuses sur la Grande Terre. Les forages ont été réalisés essentiellement dans le bassin sédimentaire de Bourail, sensiblement analogue d'un point de vue lithologique au bassin sédimentaire de Nouméa. L'agencement des formations géologiques et des structures en profondeur est donc encore incertain et fortement discuté, faute de données suffisantes. Il est bien établi que les formations allochtones que sont les nappes de basaltes et de péridotites chevaucheraient des formations sédimentaires d'âge crétacé à paléocène (Figure 15 ; Vially et Mascle, 1994 ; Gonord, 1977, Figure 16, Lagabrielle et al., 2005).

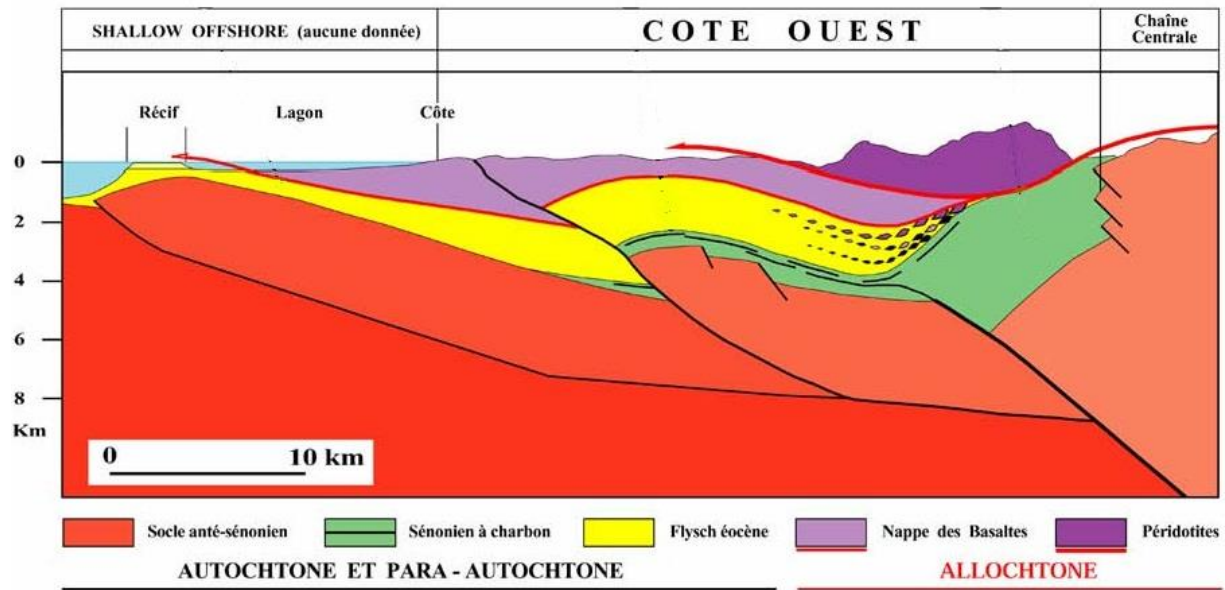


Figure 15 : Coupe géologique simplifiée de la partie ouest de la Grande-Terre modifié d'après Vialy et Mascle (1994)

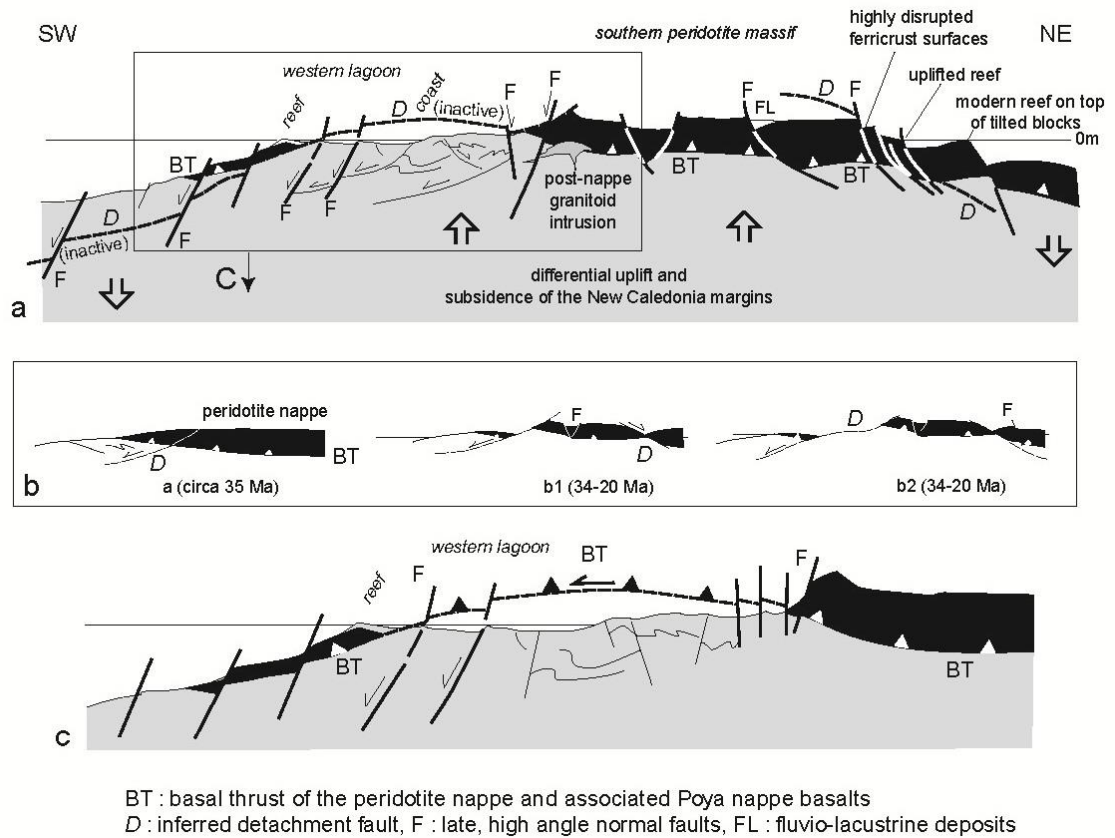


Figure 16: Différentes interprétations de la structure profonde de la Grande Terre, tirées de Lagabrielle et al. 2005 (Fig.21).

D'après ces auteurs, les indices d'hydrocarbures (mine d'Huile de Koumac), observés à la base de la nappe des péridotites qui chevauche la nappe basaltique de Poya, pourraient suggérer la présence de bassins sédimentaires sous ces unités allochtones.

III-3-1) Paramètres et distribution des données de sondages et analyse géologique des trois sites d'usine métallurgique

Les sondages effectués sur le territoire sont généralement déclarés et répertoriés dans la base de données du Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie. Les sondages enregistrés dans cette base de données sont localisés principalement sur le littoral occidental (Figure 17). Les sondages de la base de données du sous-sol de Nouvelle-Calédonie de SGNC/DIMENC (avril 2013) sont tous inférieurs à 200m de profondeur, exceptés dans la région de Bourail où des forages pétroliers ont été effectués (cf. chapitre III-3-3). La connaissance géologique du sous-sol est donc très limitée dans le périmètre des usines métallurgiques.

Des paramètres pétrophysiques sont sauvegardés dans la base de données de la SGNC comme la perméabilité et la porosité, la conductivité électrique et le débit d'eau d'exploitation préconisé pour chacun des forages. A partir de la consultation de ces bases de données (avril 2013), nous avons pu établir des cartes de perméabilité, de conductivité et de débit d'eau préconisé au niveau des sondages géologiques (Figures 17-19) Ces cartes montrent que la base de données ne contient pas de valeurs de perméabilité, de conductivité et de débit d'eau sur le secteur de Goro. Pour la région de Nouméa, l'information existe. Elle est moins dense pour la région de Koniambo.

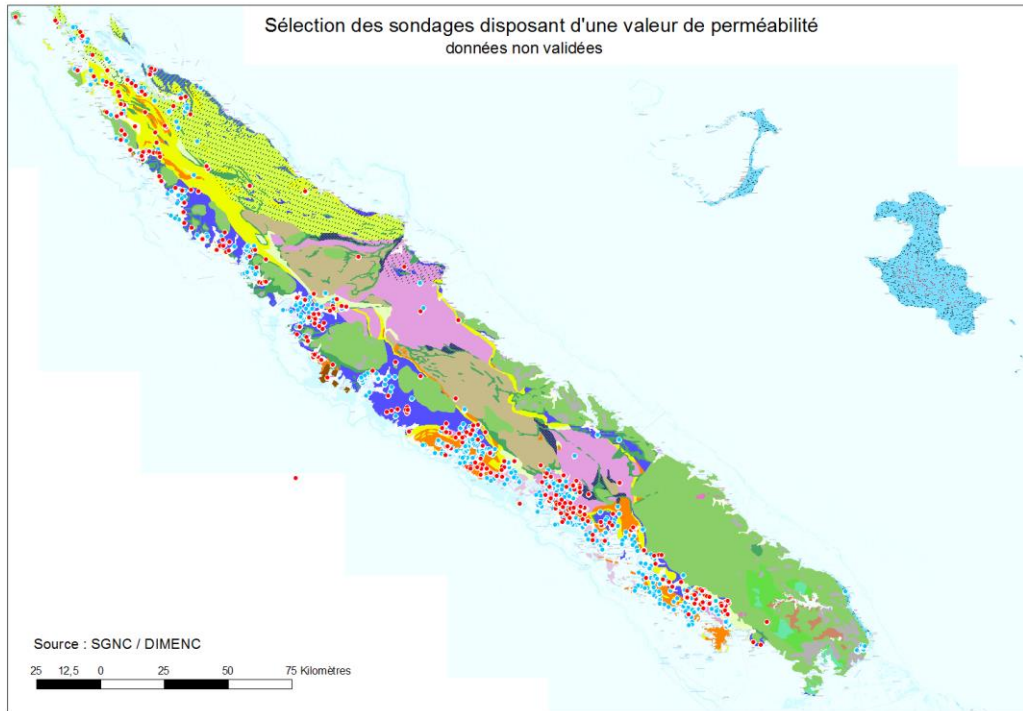


Figure 17: Localisation des sondages (points bleu et rouge) de la base de donnée du sous-sol de Nouvelle-Calédonie de SGNC/DIMENC (Export avril 2013). Les sondages rouges sont ceux disposant d'une valeur de perméabilité. Fond de carte géologique à l'échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009).

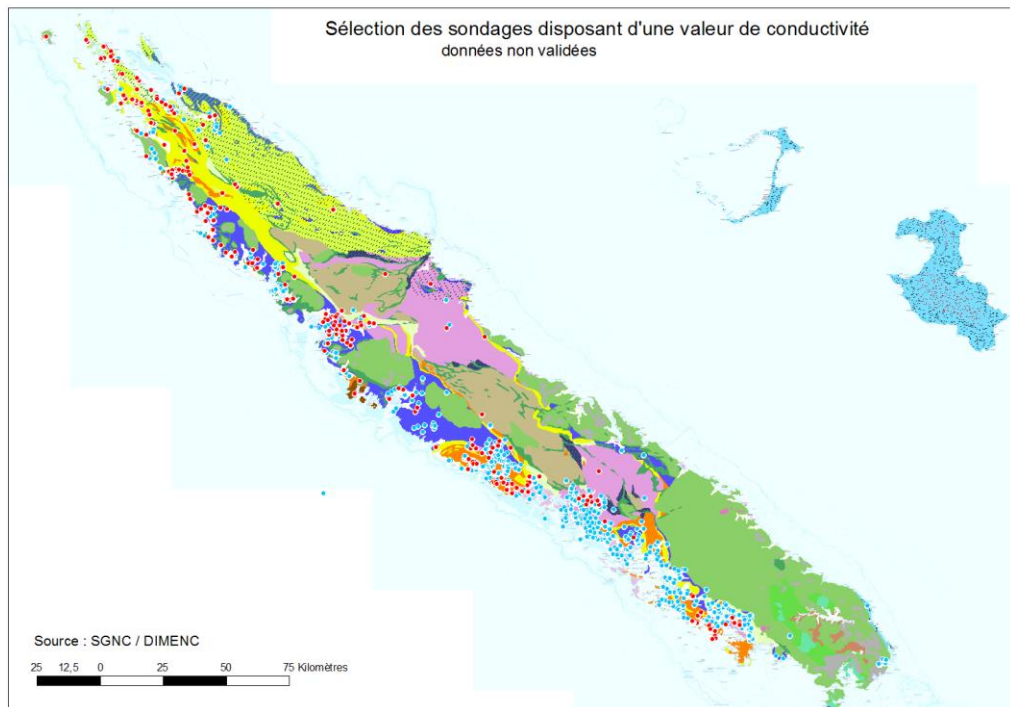


Figure 18: Localisation des sondages (en bleu) disposant d'une valeur de conductivité (en rouge). Source base de données du sous-sol de Nouvelle-Calédonie de SGNC/DIMENC (export Avril 2013). Fond de carte géologique à l'échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009).

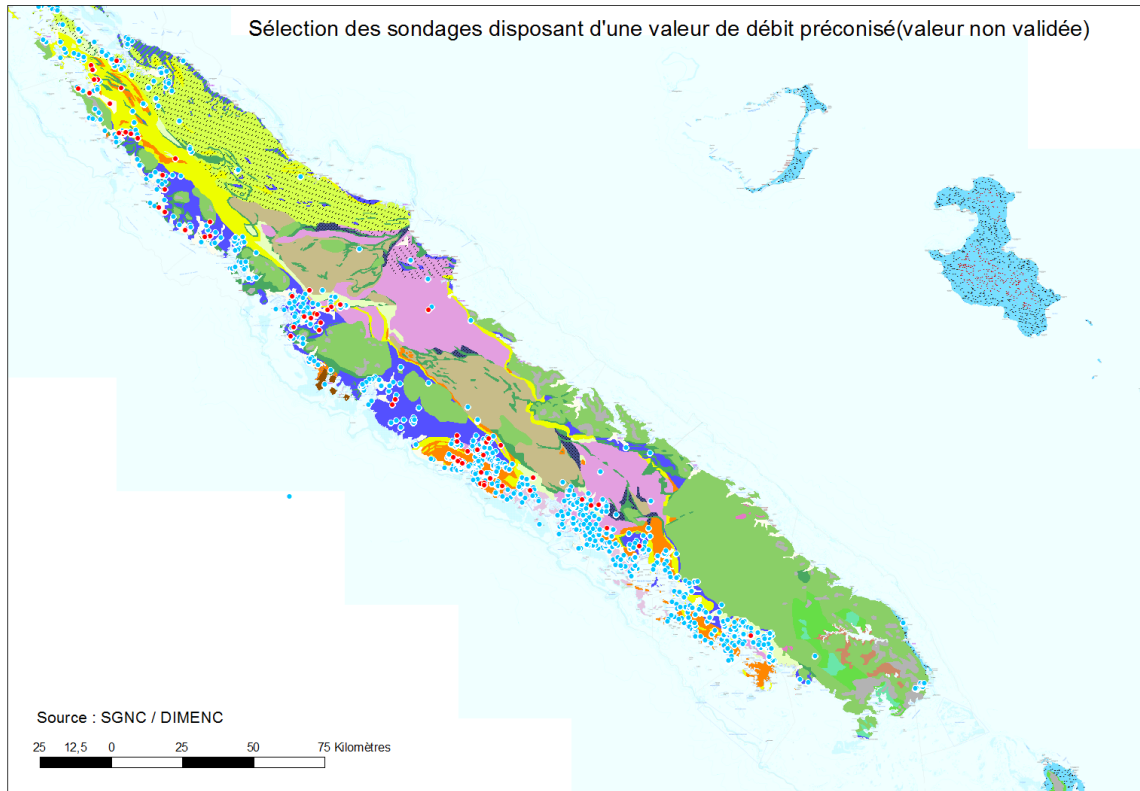


Figure 19 : Localisation des sondages (en bleu) disposant d'une valeur de débit d'eau préconisé (en rouge). Source : base de données du sous-sol de Nouvelle-Calédonie (export Avril 2013), SGNC/DINEMC. Fond de carte géologique à l'échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009).

- **Région Nord : site de KNS (Vavouto)**

Le site de Vavouto est implanté sur la limite entre l'unité de Poya et la nappe des péridotites (Figures 20 et 21). Il repose plus précisément sur l'unité de Poya. Le site est à quelques mètres au-dessus du niveau de la mer et à proximité du littoral. L'unité de Poya est un complexe d'éléments de croûte océanique écaillé dans un contexte de bourrelet d'accrétion. Il s'agit de basalte, sous forme de coulées massives ou en pillow lavas, et parfois d'intrusions doléritiques. Les intercalations mineures de sédiments océaniques, cherts et argilites, le plus souvent verticales, constituent le seul repère structural de cet ensemble. En général il est impossible de suivre un repère quelconque, sédiments ou lave, sur plus de 10 m. Les basaltes sont affectés par un métamorphisme hydrothermal de type "plancher océanique" (faciès zéolite ou schiste vert de bas degré) qui a modifié la minéralogie primaire de façon hétérogène. Des lentilles de serpentinite peuvent jaloner certains accidents. Cette lithologie peut s'observer dans la carrière dite "pied de

mine". Les discontinuités sont nombreuses et la fracturation dense, certaines fractures ouvertes sont emplies de minéraux hydrothermaux (quartz, zéolites). Cependant ce système de fracturation très mal exposé naturellement, n'est visible que dans quelques rares carrières et n'a pas été étudié.

Selon Espirat (1967) l'unité est altérée sur une dizaine de mètres en général. Ce niveau d'altération peut contenir une ressource en eau et présente donc une certaine perméabilité. Au-delà, en roche dure, cette ressource semble disparaître ce qui signifierait que la perméabilité fait de même. La zone de transition serait quant à elle perméable mais peu épaisse. Les résultats de pompages d'essai réalisés sur des ouvrages captant les basaltes montrent des transmissivités de l'ordre de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Base de Données du Sous-Sol de Nouvelle-Calédonie).

Dans la zone considérée, l'épaisseur de l'unité de Poya est probablement considérable (plusieurs milliers de mètres) mais non prévisible dans l'état des connaissances. Son substrat est très certainement le flysch éocène qui lui aussi est potentiellement épais de plusieurs milliers de mètres. Des lames de serpentinite sont à prévoir dans l'empilement.

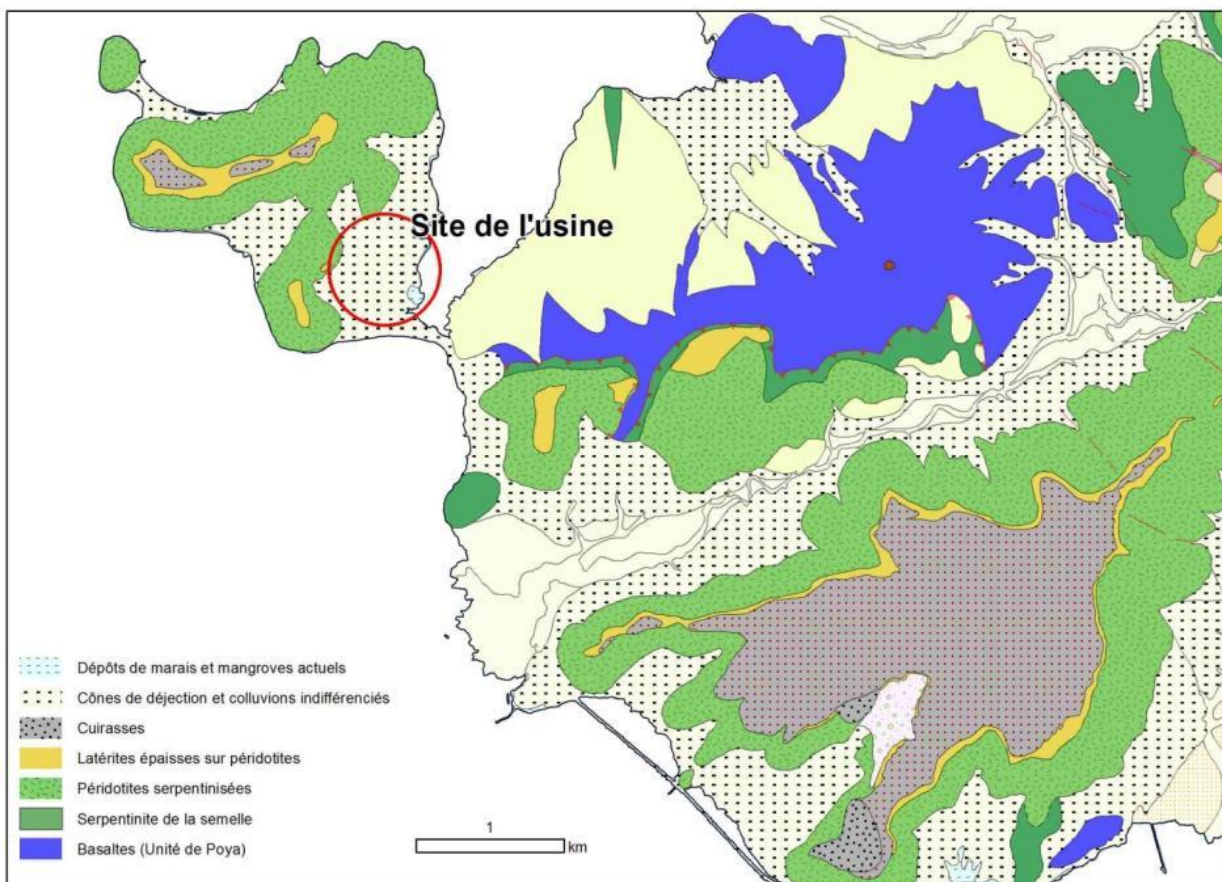


Figure 20 : Carte géologique du site de Vavouto (KNS)

Dans la région du Koniambo, les sondages se cantonnent pour la plupart aux 30 premiers mètres (Figure 21). Dans les cas où le substratum a été atteint, des basaltes plus ou moins altérés et des péridotites/serpentinites ont été échantillonnés.

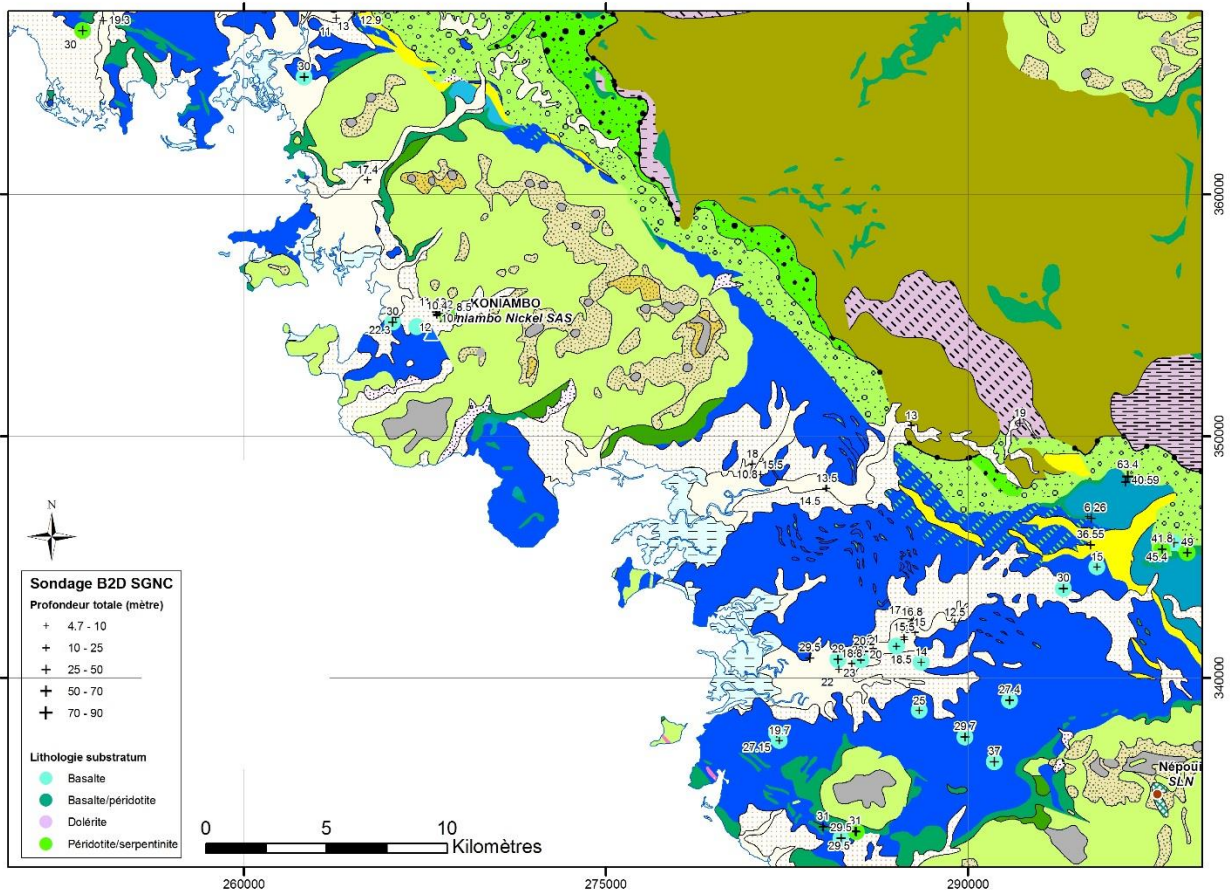


Figure 21 : Localisation des sondages dans la région de Koniambo-Népoui (Nord) sur fond de carte géologique à 1/200000. Les croix représentent les sondages existants avec indication de la profondeur atteinte. Les couleurs surignent les sondages qui ont atteint le substratum basaltique ou péridotitique. Système de projection : GCS RGNC 1991-93 (R-Reseau geodesique de Nouvelle-Calédonie)

- **Région Sud : site de Nouméa (usine SLN Doniambo)**

C'est sans doute des trois sites celui qui présente la structure la plus complexe, visible sur toute la péninsule de Nouméa (Figure 22). Les roches exposées sont toutes sédimentaires et appartiennent au Crétacé et au "Flysch Eocène" s.l. Elles ont été déposées et structurées en contexte de bourrelet ou prisme d'accrétion, zone de convergence entre deux plaques tectoniques où les sédiments sont comprimés pour former un ensemble d'écaillés complexes. Lithologiquement on trouve des argilites, des grés carbonatés, des grés et brèches volcanoclastiques des calcaires et des

cherts. Le site de l'usine est installé sur la limite géologique entre les flyschs éocènes à la structure relativement simple, et l'olistostrome qui constitue le sommet de la séquence pré-obduction, et dont la structure est par essence particulièrement complexe.

Dans la région de Nouméa, les sondages sont éloignés de l'usine SLN de Doniambo, et essentiellement situés dans la Nappe des péridotites. Ils atteignent uniquement les 30 premiers mètres (Figure 23). A l'exception de celui de l'Ouen Toro, il n'y a pas de sondage dans les terrains sédimentaires.

Un sondage de 423 m de profondeur a été foré en 1908 à l'extrémité de la péninsule de Nouméa (Ouen Toro) sur un indice d'hydrocarbures (Maurizot and Gasc, 1986). Les rapports très anciens ne sont guère utilisables mais nous apprennent que le sondage n'a pas quitté la formation de départ, restant dans le même type de formation sur toute sa hauteur.

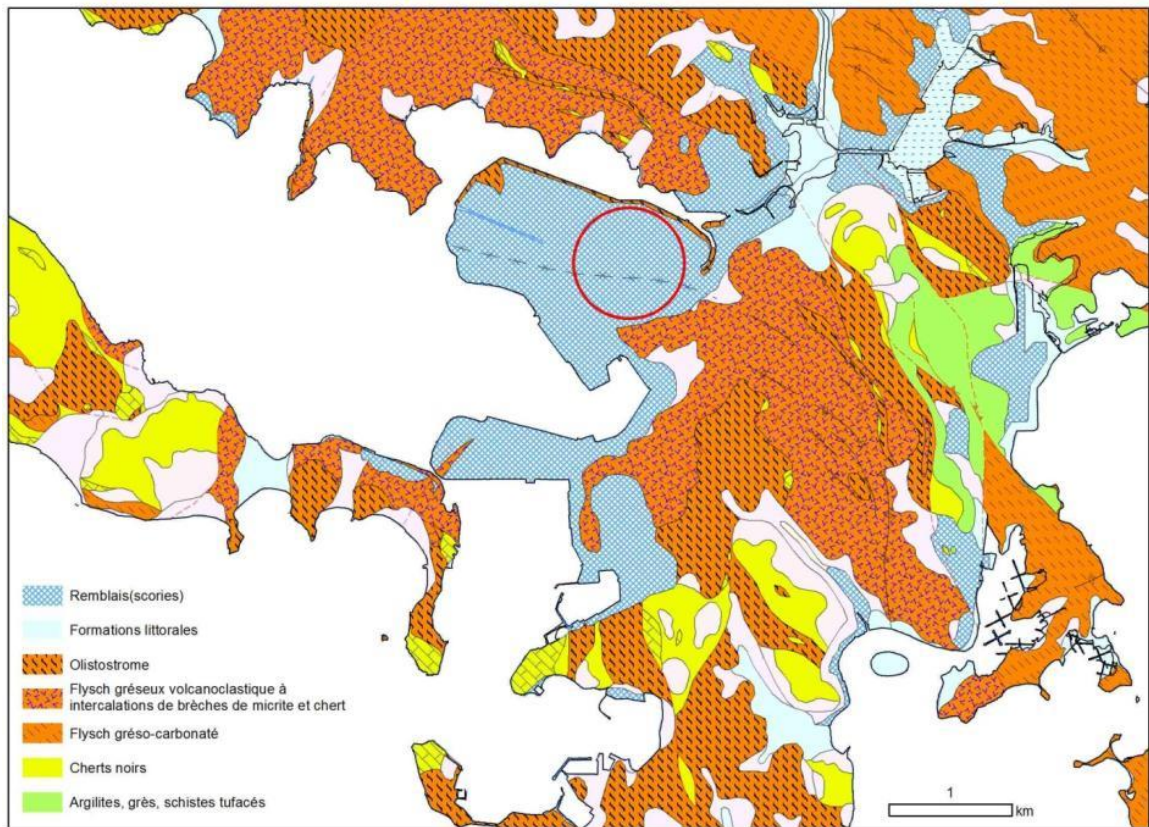


Figure 22 : Carte géologique du site de Nouméa (usine SLN Doniambo)

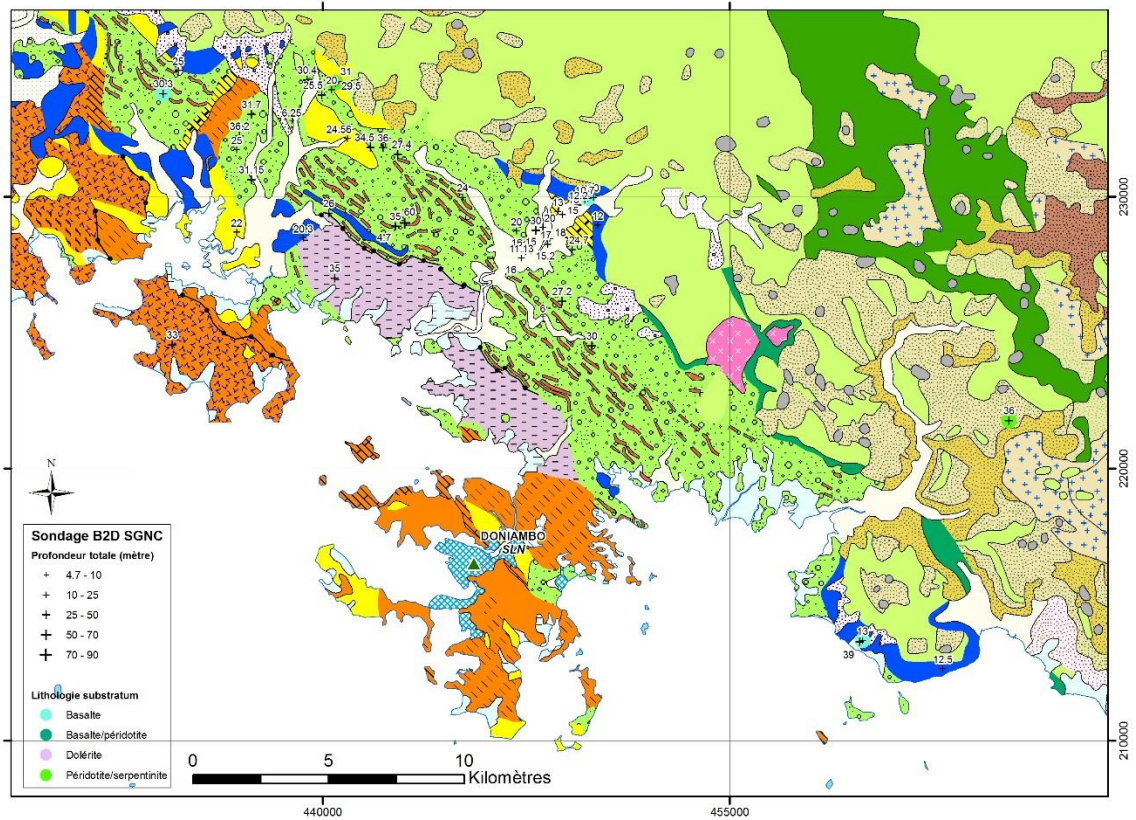


Figure 23 : Localisation des sondages dans la région de Nouméa. Les croix représentent les sondages existants avec indication de la profondeur atteinte. Les couleurs surlignent les sondages qui ont atteint le substratum basaltique ou péridotitique. Système de projection : GCS RGNC 19991-93 (R-Réseau géodésique de Nouvelle-Calédonie).

- **Région Sud : site de Goro (usine Vale NC)**

Ce site est intégralement contenu dans la nappe des péridotites dont la base n'est pas visible ici (Figure 24). Dans la région du site de Goro les sondages, localisés à l'est de l'usine métallurgique, ont traversé des péridotites/serpentinites, jusqu'à une profondeur maximale de 68 mètres (Figure 25).

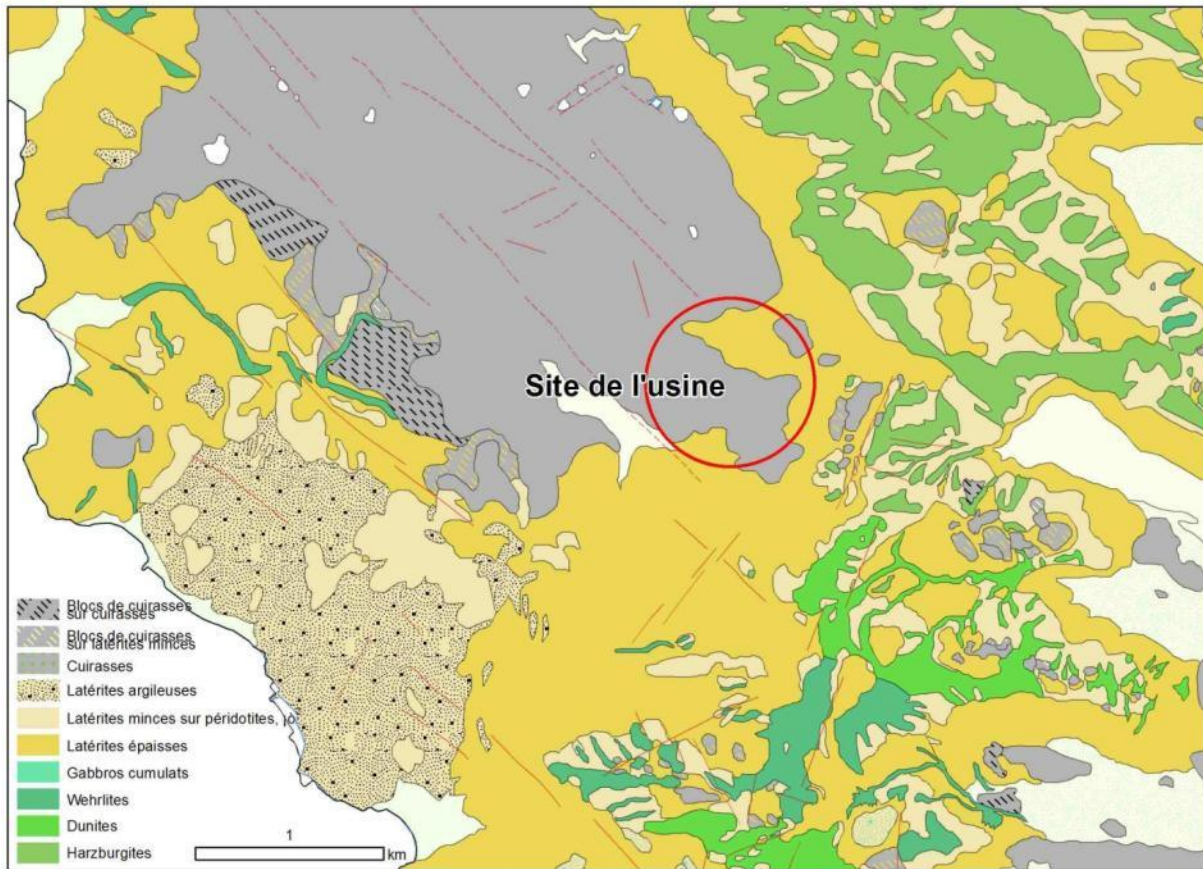


Figure 24 : Carte géologique du site de Vale NC

Les péridotites sont un milieu présentant un champ de fracturation dense sur toute leur épaisseur, résultant d'une longue histoire depuis leur évolution dans le milieu océanique en expansion, jusqu'à leur obduction sur la ride de Norfolk et leur effondrement consécutif. Une phase de fracturation accompagnée par un réseau de dykes de compositions gabbroïque à granitoïde est bien calée à 53 Ma (Cluzel et al., 2006) correspondant au début de la convergence qui s'est achevée par l'obduction. Les autres phases de structuration sont moins connues. Des études sont en cours dans le cadre du projet CNRT 1 HyperK qui porte sur l'hydrogéologie des massifs de péridotites (Jeanpert et Maurizot, 2012; Schuite, 2013). L'appel à projet CNRT 2 portant sur la structuration de l'ophiolite devrait apporter des éléments nouveaux.

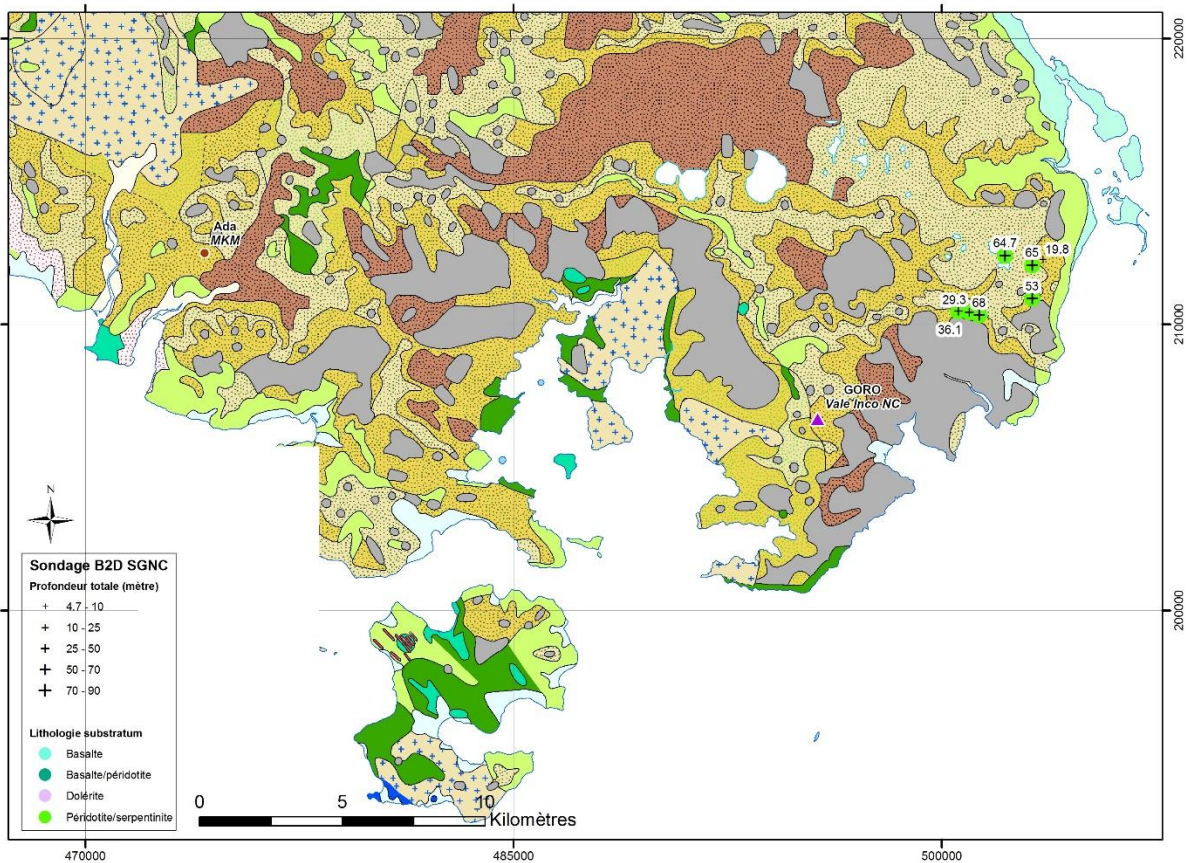


Figure 25: Localisation des sondages dans la région de Goro (Sud). Les croix représentent les sondages existants avec indication de la profondeur atteinte. Les couleurs surlignent les sondages qui ont atteint le substratum basaltique ou péridotitique. Système de projection : GCS RGNC 19991-93 (R-Reseau geodesique de Nouvelle-Calédonie).

III-3-2) Listing des données géophysiques

Le listing des données géophysiques est restreint en raison de la faible quantité de données existantes sur la Grande Terre. Aucune donnée gravimétrique ou magnétique de haute résolution sur les régions des sites métallurgiques n'a été trouvée. La Grande Terre étant située non loin d'une zone de forte sismicité (zone de subduction), la distribution des séismes et la connaissance des mécanismes au foyer peuvent être un paramètre à analyser (Figure 26). Quelques séismes importants ont eu lieu dans la région sud (Figure 27). Le peu de données géophysiques qui existe à proximité des usines métallurgiques concerne la partie superficielle des formations géologiques.

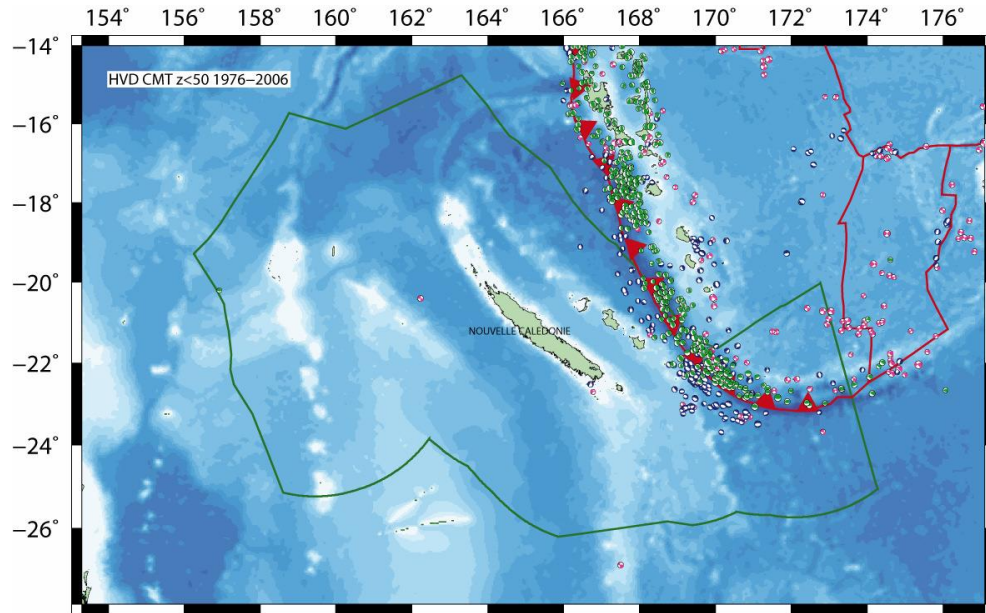


Figure 26 : Localisation des séismes de profondeur inférieure à 50 km d'après Bertil et al. (2008) à l'échelle des plaques lithosphériques.

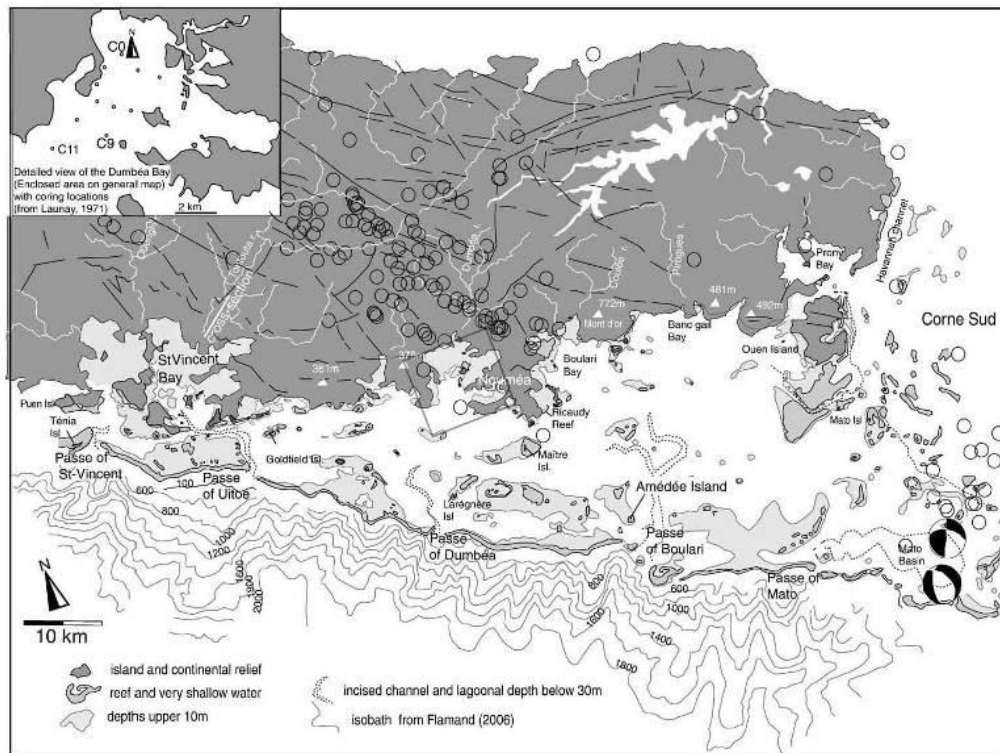


Figure 27 : Localisation des mécanismes au foyer sur la région Sud, Nouméa et Goro (Le Roy et al., 2008).

Ces dernières années, en vue de la construction de l'usine KNS de Koniambo (Koné) de la région nord, quelques données géophysiques (comme par exemple des profils de sismique réfraction) auraient été acquises sur le lagon et à terre. Ces données n'étant pas disponibles, elles n'ont donc pas pu être inventoriées, ni localisées précisément pour cette étude. Dans la région sud à proximité de l'usine de Vale NC de Goro, les travaux ont été effectués par le BRGM (Gourry et al., 2012) sur la caractérisation électromagnétique des péridotites. Cela ne concerne que la partie superficielle de la nappe de péridotites ($Z < 120\text{m}$).

III-3-3) Le bassin sédimentaire de Bourail

On trouve des bassins sédimentaires onshore sur la côte occidentale de la Nouvelle-Calédonie: les bassins sédimentaires de Nouméa-Bouloupari et de Bourail, étudiés dès les années 50 par l'industrie pétrolière (Tissot et Noesmoen, 1958). En effet, des indices d'hydrocarbures y ont été découverts et de nombreux travaux et synthèses ont été réalisés et sont disponibles dans les rapports de Vially et Mascle (1994), Blake (1995) et Maurizot (2005), entre autres.

La géologie profonde du bassin de Bourail a été étudiée par des forages pétroliers et des profils de sismique réflexion. Elle a fait l'objet d'une publication récente (Maurizot and Cluzel, in press). La structure anticlinale de Bourail (anticlinal de Gouaro; Pomeyrol, 1951) se situe sur la bordure littorale occidentale entre Nouméa et Koniambo (Figure 28). Elle s'étend sur 30 km et est orientée NW-SE. L'anticlinal est asymétrique (déversé vers le SW) et correspond à un anticlinal de rampe décollé sur un substrat Mésozoïque. La base des séries sédimentaires qui le constituent affleure vers le SE. La structure anticlinale plonge vers le NW où elle est recouverte par les unités ophiolitiques allochtones. Les sédiments qui le constituent correspondent 1) à une série sédimentaire du Crétacé supérieur syn-rift (formation à charbon) ; 2) à une série de turbidité (Flysch Eocène) épaisse de 4 000 m.

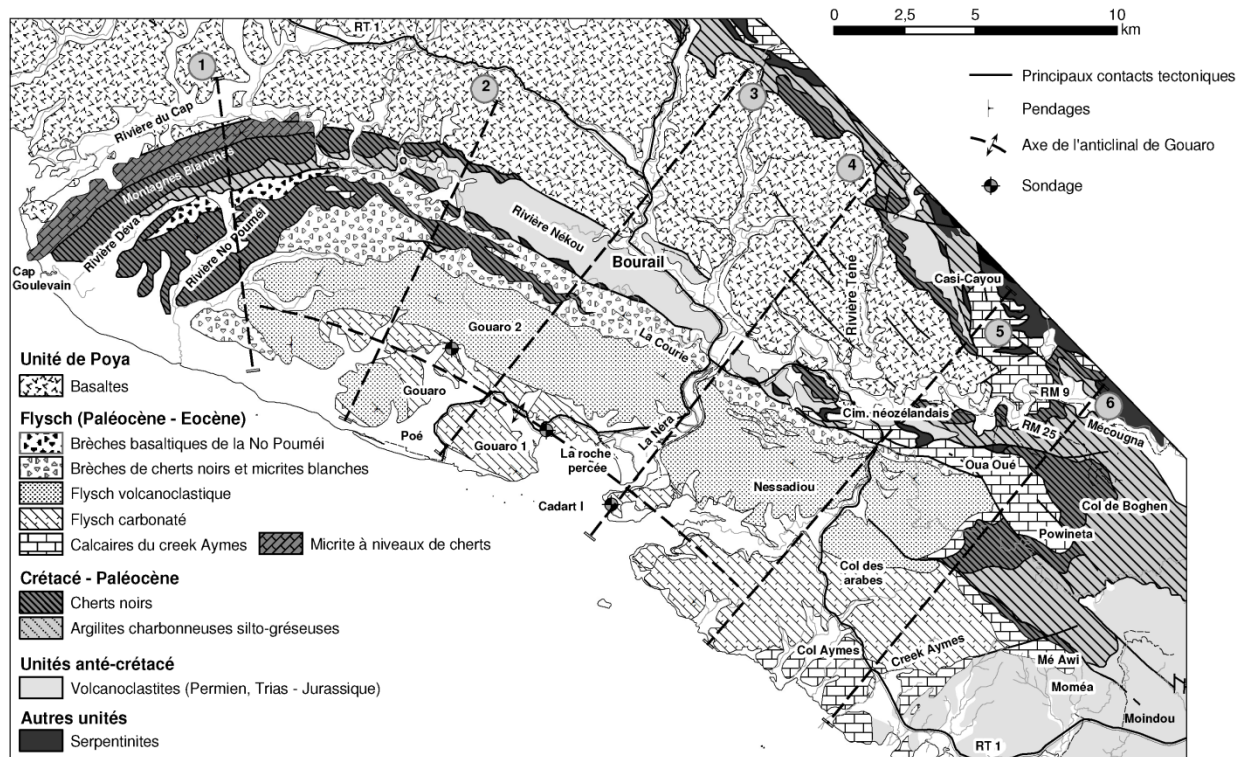


Figure 28: Carte géologique de la région de l'anticlinal de Gouaro (d'après Maurizot, 2005).

- **Sondages géologiques profonds de Bourail**

Deux forages de reconnaissance de 608m (Gouaro 1) et 441m (Gouaro 2) ont été faits sur l'axe de la structure anticlinale de Bourail (Figures 28 et 29). Réalisés en destructif de Mars 1954 à Avril 1955 par la "Société de Recherches et d'Exploitation Pétrolière en Nouvelle-Calédonie" (SREPNC), les forages Gouaro1 et Gouaro 2 ont révélé des indices d'huile et de gaz (à partir de 355 m à Gouaro 1 et de 153 m à Gouaro 2). En 1999, le sondage Cadart 1 (Figure 30) a été foré par la société New Caledonia Energy, à proximité de Bourail en rive gauche de l'embouchure de la Néra. Il a été lui-aussi implanté sur l'axe de la structure anticlinale, là où la voûte est supposée la moins épaisse. Ce sondage reste à ce jour l'ouvrage le plus profond (1930m) réalisé en Nouvelle-Calédonie. Stocké au Service Géologique de Nouvelle-Calédonie, il a fait l'objet, sur la totalité du sondage, d'une description lithologique détaillée, d'une description de microfaciès en lames minces, de datations bio-stratigraphiques, d'une étude de la composition minéralogique pour définir la provenance des sédiments (Maurizot, 2005, Maurizot and Cluzel, in press).

Sur l'ensemble du sondage Cadart 1, de nombreux paramètres ont été rapportés, comme le pourcentage de détritique, le pendage, la fracturation, la bio-stratigraphie et la minéralisation et

composition chimique des clinopyroxènes. Des diagraphies ont été réalisées entre 600 et 1700m. Les mesures de résistivité (totale, FE surface, Fe profonde), de sonique, de porosité neutronique calcaire et de densité compensée ont été réalisées et sont consultables au SGNC.

- **Données sismiques: géométrie du bassin de Bourail**

Une campagne de sismique multitraces à terre et offshore (baie de Gouaro), destinée à évaluer la structure profonde de l'anticlinal, a été réalisée par la compagnie Victoria Petroleum N.L. (Blake, 1995; Figure 31). Cette sismique a permis d'optimiser l'implantation du forage Cadart-1, de localiser en profondeur l'axe de l'anticlinal et de confirmer que toute la série sédimentaire est impliquée dans la déformation.

Le plan de position des lignes de sismique réflexion G95 ainsi que le rapport d'acquisition sont conservés dans les locaux de la SGNC. Les données brutes SEG-Y n'ont pas encore été retrouvées. Seules existent les images sismiques interprétées ci-dessous (Figure 32) provenant du rapport d'acquisition (Gouaro seismic survey PRA-436 New Caledonia – Sept/Oct. 1995, Victoria Petroleum NL.). Un retraitement sismique, bénéficiant des nouveaux algorithmes, permettrait d'améliorer grandement les images sismiques.

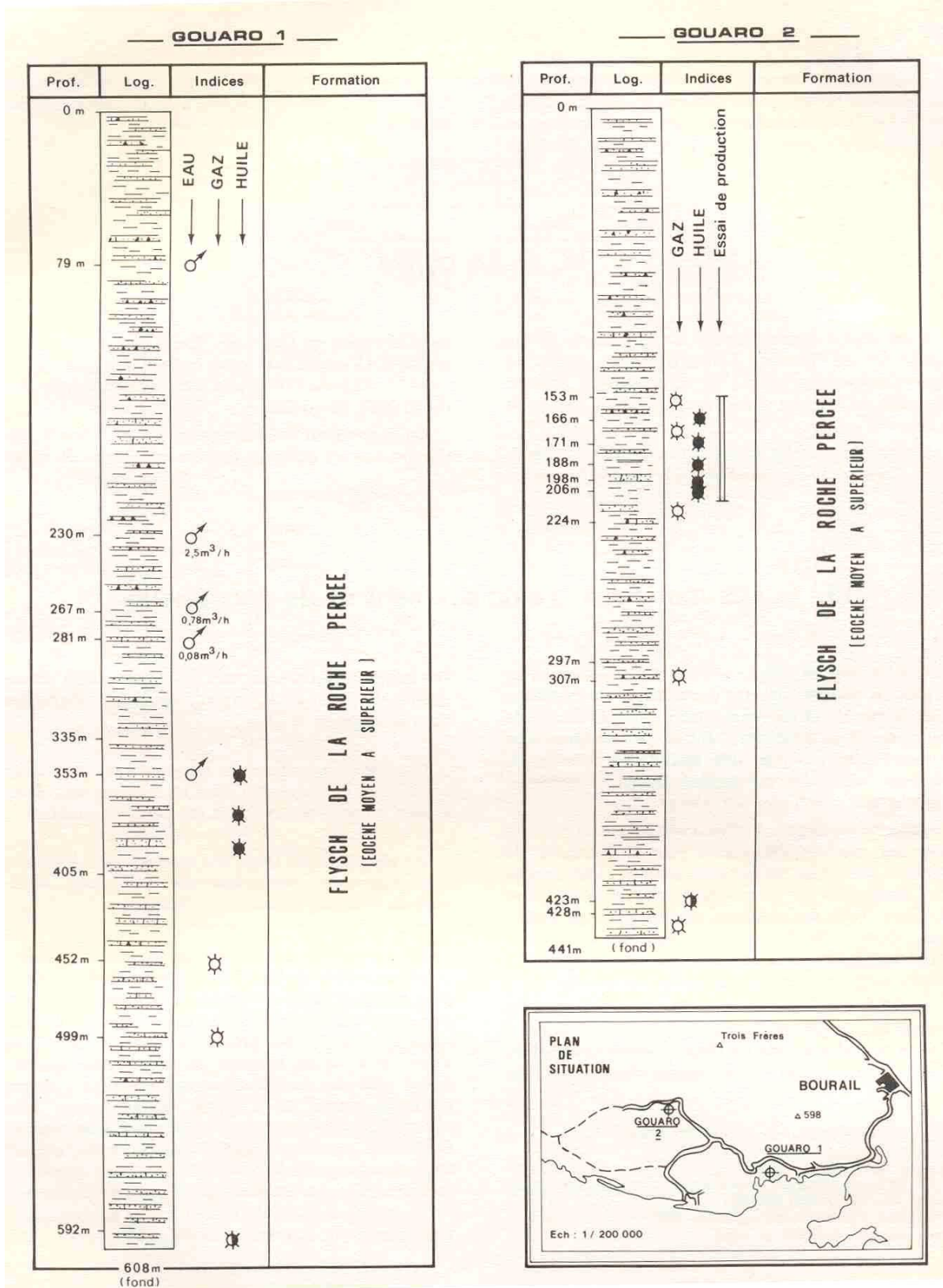


Figure 29 : Log synthétiques des sondages Gouaro 1 et 2 de la SREPNC (d'après J.P. Paris,1981 ; extrait de Maurizot, 2005). Localisation **Figure 28**.

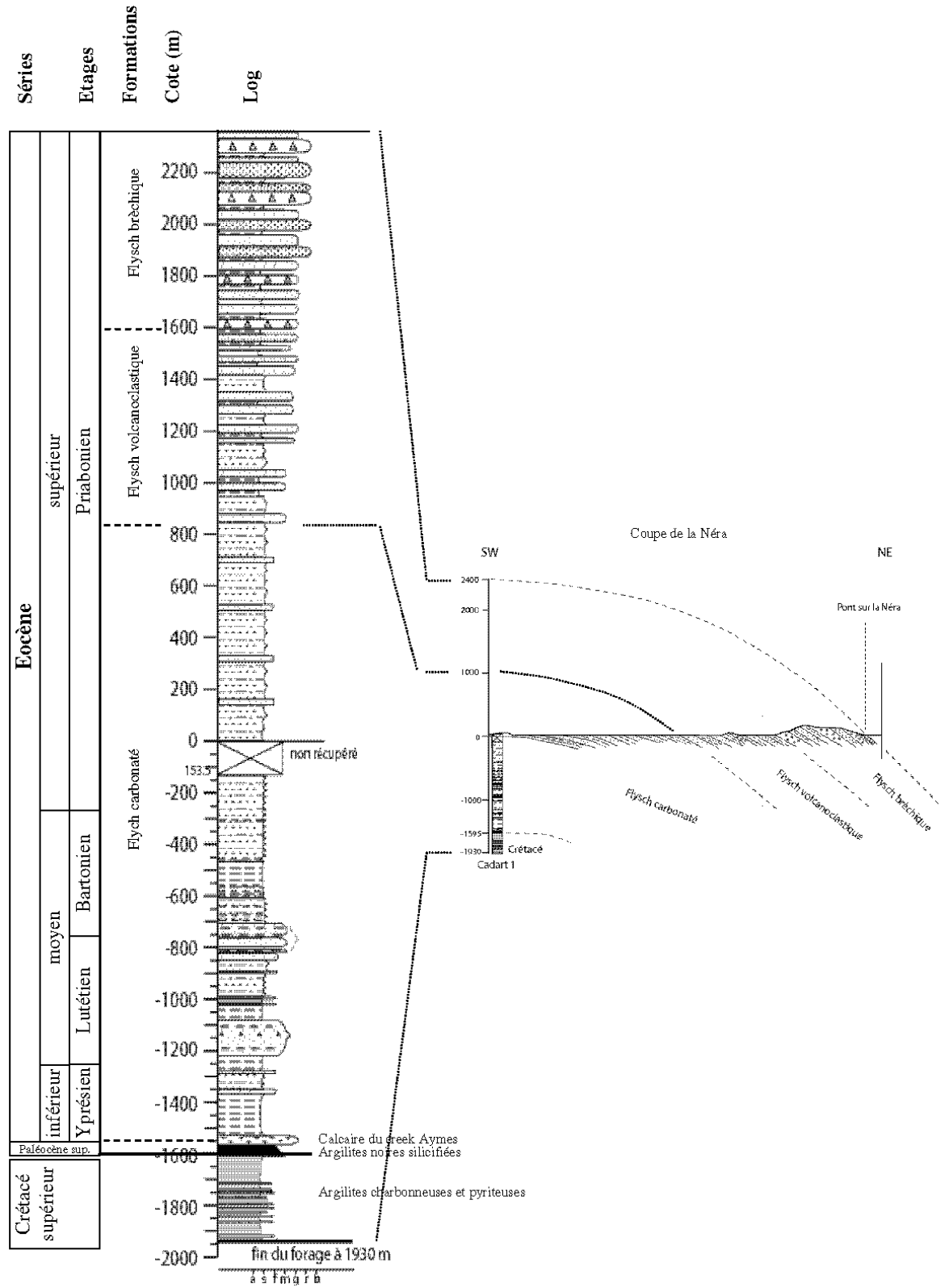


Figure 30: Reconstitution géométrique de l'épaisseur totale du flysch prenant en compte le sondage Cadart 1 et la coupe de la Néra (Maurizot, 2005). Localisation Figure 28.

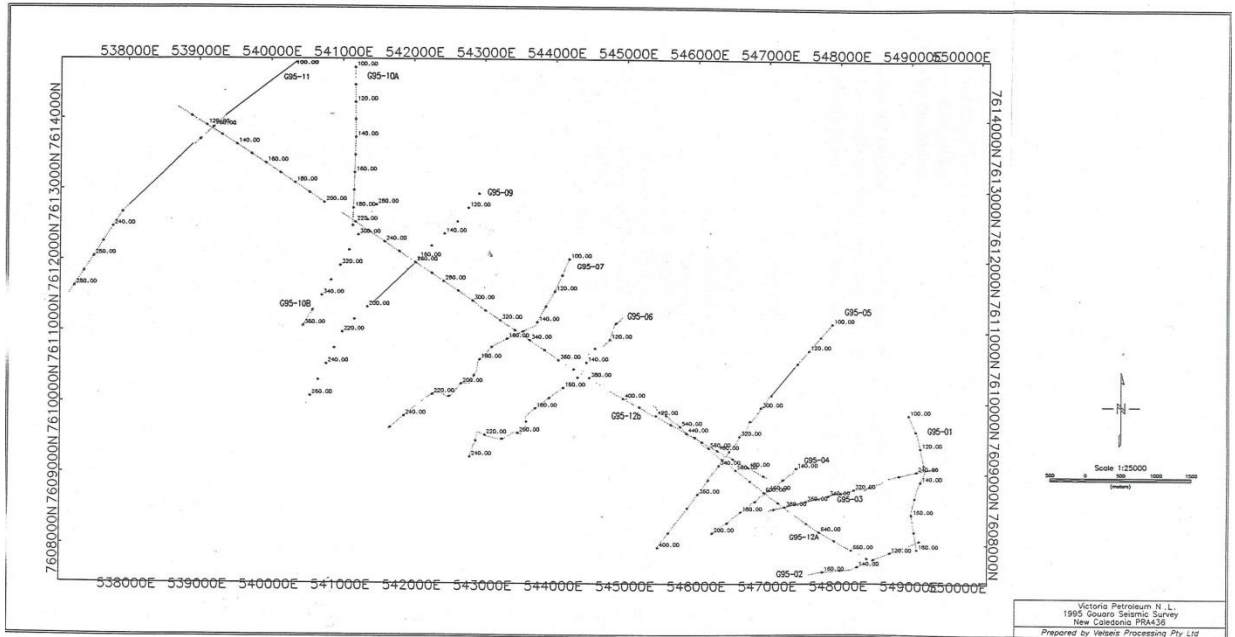


Figure 31 : Campagne de sismique réflexion multitraces pétrolière G95 d'après Vially et al (1999).

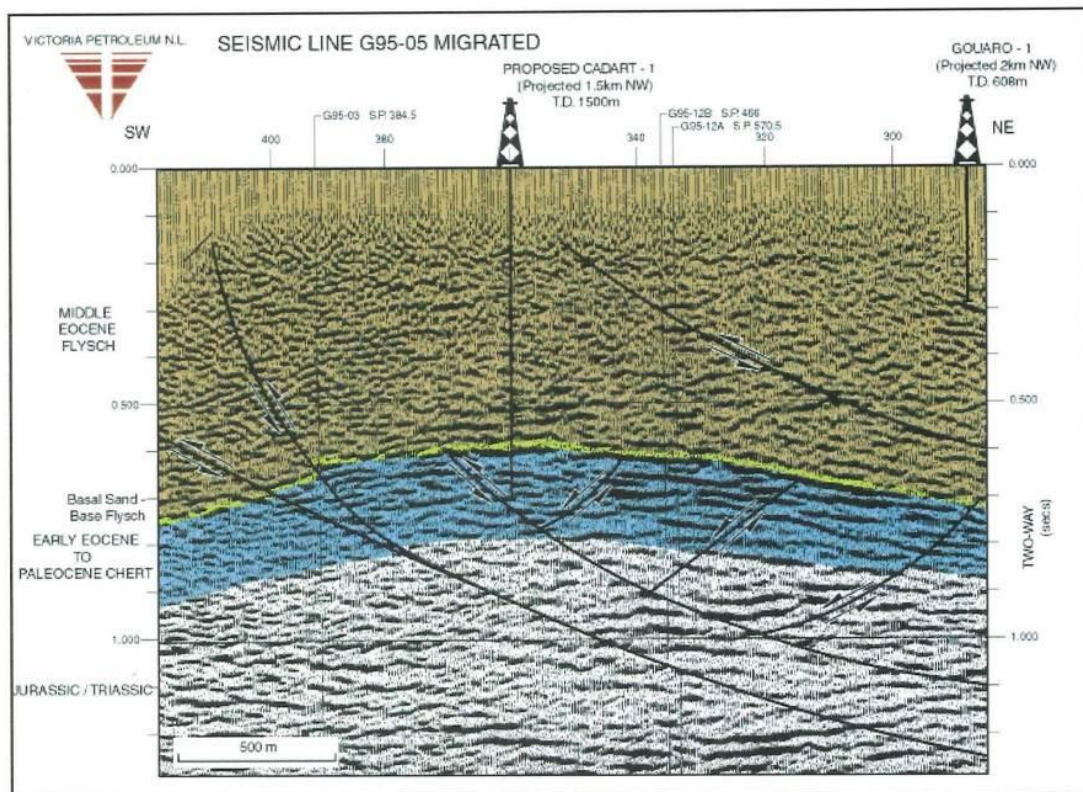


Figure 32 : Exemple de profil sismique interprété G95-05 (Vially et al., 1999). Il présente la structure anticlinal du bassin de Bourail.

III-4) Synthèse

En conclusion, les informations sur la géologie profonde déduites des données géophysiques et des sondages géologiques sont très restreintes dans le périmètre des usines métallurgiques que ce soit sur les nappes ophiolitiques (KNS et Vale NC) ou sur les formations sédimentaires (SLN Doniambo).

Il reste donc de nombreuses inconnues :

- Quelle est l'épaisseur réelle des unités allochtones (péridotites, unité basaltique de Poya) ? Quel est le contrôle de la tectonique liée à l'obduction et aux processus post-obduction (écailles, chevauchements, failles normales ...) sur l'épaisseur de ces unités ?
- Quelle est la lithologie des formations sous-jacentes aux unités allochtones? Les formations sédimentaires (SLN Doniambo) sont-elles véritablement analogues au bassin de Bourail ?
- Quelles sont la géométrie des formations géologiques en profondeur ?
- Quelles sont les structures tectoniques et la géométrie des zones de contact ?
- Quelle est la structure thermique des unités allochtones (nappes de péridotites) envisagées pour le stockage de CO₂?

III-4-1) Intérêt des nappes ophiolitiques pour le stockage géologique du CO₂

La nappe ophiolitique constitue l'essentiel du soubassement géologique de la Grande Terre. Certaines des unités lithologiques qui la composent représentent des réservoirs potentiels pour le stockage souterrain du CO₂ : il s'agit des péridotites serpentinisées présentes sur pratiquement l'ensemble du territoire, auxquelles se rajoute le long de la côte ouest, la nappe basaltique de Poya. Les roches ultrabasiques et les basaltes ont la capacité de réagir avec le CO₂, soit dissous dans l'eau soit sous forme supercritique, pour former des carbonates et elles pourraient donc constituer à long terme des zones de stockage sûr (e.g., Kelemen et al, 2011). Les études des sites hydrothermaux de la Grande Terre indiquent d'ailleurs que ces unités lithologiques représentent d'ores et déjà des pièges naturels pour le CO₂ atmosphérique (cf. chapitre III-2). De plus, des travaux expérimentaux récents indiquent des voies de valorisation des réactions connexes, telles l'hydratation des roches ultrabasiques pour la production de dihydrogène (Andreani et al, 2013), qui permettraient de réduire l'impact énergétique de ces techniques (e.g.,

lié à la séparation et l'injection du CO₂). Enfin, deux des usines métallurgiques actuellement en activité (usines Vale NC et KNS) sont implantées sur ces formations géologiques, ce qui limiterait les coûts de stockage et de transport si la solution du développement de tels sites de stockage géologique du CO₂ était choisie.

Malgré ces avantages potentiels, cette approche se heurte actuellement à deux obstacles scientifiques et techniques. Le premier est que cette méthode de stockage est non-conventionnelle. L'essentiel des connaissances sur le devenir du CO₂ dans ces systèmes géologiques est basé sur l'expérimentation en laboratoire (e.g., Hanchen et al, 2006 ; Daval et al, 2010). Ainsi, les critères de choix des sites de stockage ainsi que les protocoles d'injection et de monitoring de ces sites restent à être définis et testés en conditions réelles. S'il y a actuellement de nombreux démonstrateurs et sites d'injection de CO₂ dans les réservoirs sédimentaires, seuls deux démonstrateurs existent dans des formations basaltiques (Islande: Gislason et al., 2010 ; Etats-Unis: McGrail et al., 2006) et aucun dans des formations ultrabasiques. Or, ces dernières présentent des caractéristiques hydrodynamiques et chimiques spécifiques particulières qui les différencient des formations sédimentaires classiquement utilisées comme réservoirs. Par exemple, les roches ultrabasiques (péridotites et serpentinites) sont peu perméables (jusqu'à 10⁻²² m², Dewandel, 2002) et les protocoles d'injection pourraient éventuellement inclure des techniques de type « fracking » pour que la méthode soit efficace et pérenne. En Nouvelle-Calédonie, l'intense fracturation des péridotites pourrait donc s'avérer être un avantage pour le développement de la séquestration géologique du CO₂ dans les roches ultrabasiques en créant une « perméabilité de fracture » à méso-échelle (e.g., Dewandel et al, 2004) si cette fracturation est aussi intense en profondeur que sur les affleurements observés en surface, ce qui éviterait de faire appel à ces techniques contestées. Cette fracturation pourrait par contre limiter l'étanchéité de ces réservoirs avant que les processus de minéralisation aient piégé l'essentiel du CO₂. Les études expérimentales indiquent une forte capacité de minéralisation du CO₂ dès les premières heures des expériences mais aussi une forte dépendance de ces réactions aux paramètres (bio-)géochimiques, thermodynamiques et hydrodynamiques (température, flux, activité microbiologique...) dominants dans le système géologique (e.g., Bénézeth et al., 2011 ; Daval et al., 2011; Flaathen et al., 2010 ; Guyot et al., 2011 ; Pokrovsky et al., 2009 ; Shirokova et al., 2012 ; Stockmann et al., 2012). Cette dépendance s'accompagne de couplages complexes entre ces paramètres et les interactions liquide-gaz-roche qui affectent en retour le rendement des réactions (e.g., Andreani et al, 2009); ainsi, il serait

envisageable d'utiliser ces effets en retour pour favoriser soit la pérennité de ces processus, soit l'auto-scellement du réservoir. Enfin, les capacités de piégeage du CO₂ de la couverture latéritique et des saprolites sous-jacentes (carbonatation, ...) actuellement exploitées pour l'extraction du Nickel n'ont pas encore été étudiées, à notre connaissance. Le second obstacle pour un développement rapide du stockage géologique du CO₂ dans les nappes ophiolitiques de la Grande Terre est la faible connaissance soulignée plus haut de leur architecture et structure en profondeur ainsi que de leurs propriétés physiques et hydrodynamiques (épaisseur des nappes, discontinuités, échelle de la fracturation, perméabilité...). La mise en place d'un programme de recherche adapté et d'un démonstrateur sera donc nécessaire pour l'étude de faisabilité et le développement de ces techniques en Nouvelle-Calédonie.

III-4-2) Intérêt du bassin de Bourail pour le stockage géologique du CO₂

Le bassin sédimentaire de Bourail avec sa structure anticlinale simple, piège classique des hydrocarbures et ses 400 m d'épaisseur de sédiments est un site recevable pour le stockage du CO₂. De plus, à cause de la présence de matière organique et d'hydrocarbures, un des scénarios à étudier serait l'utilisation du stockage de CO₂ pour de la récupération assistée des hydrocarbures (EOR, cf. chapitre II). Par ailleurs, si le bassin de Nouméa présente les mêmes caractéristiques lithologiques que celui de Bourail, il présente une déformation plus importante; sa structuration reste cependant inconnue à l'heure actuelle par manque de données et n'est donc pas un site de stockage favorable. D'après Vially et Lafoy (2005), la mise en place des nappes allochtones aurait relativement épargné les unités sous-jacentes chevauchées.

- **Caractéristique de réservoir potentiel**

Deux des plus importantes formations géologiques de la Grande-Terre (le Crétacé supérieur et le flysch paléogène) ont été forées (sondage Cadart 1; Figure 30). La séquence terminale du Crétacé supérieur ou "Niveau des Mamelons Rouges", bien représentée à la base du sondage, se caractérise par la présence d'une matière organique globalement très mature. Les cherts noirs du Maastrichtien - Paléocène ne se trouvent qu'à l'état de blocs remaniés dans la base du flysch. L'épaisseur totale du flysch dans la région de Bourail peut être estimée à plus de 4000 mètres : 1614 m traversés par le sondage et 2500 mètres de sédiments supplémentaires qui se développent au-dessus. La base du flysch est attribuée au Paléocène supérieur. La totalité du flysch

carbonaté est datée à l'Eocène inférieur à moyen. Les deux tiers supérieurs de la colonne du flysch de Bourail seraient attribuables à l'Eocène supérieur.

Selon Vially et Mascle (1994), la principale roche mère potentielle des hydrocarbures est constituée par les charbons et les argiles charbonneuses du Sénonien présents dans l'ensemble des bassins crétacés affleurant sur la Côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie dans les bassins de Nouméa et de Bourail, mais aussi dans la région de Koniambo (Vially et Lafoy, 2005). Les niveaux susceptibles de présenter un potentiel pétrolier ont été échantillonnés et analysés dans l'Eocène, le Sénonien et le Trias sédimentaire des bassins de Nouméa et de Moindou (cf. rapports Vially et Mascle, 1994 ; Maurizot, 2005). Les paramètres suivants ont été analysés : teneur en carbone organique total (COT), Index d'hydrogène (IH), température maximale de pyrolyse (Tmax), Index de Production (IP) et Carbon Ratio (Rc/TOC). D'après Vially et Lafoy (2005), les réservoirs pétroliers probables sont localisés soit dans les unités sableuses (forte porosité) à la base du flysch, soit dans les calcaires du Creek Aymes intensément fracturés. Ils sont constitués soit par les alternances gréso-pélitiques du Crétacé supérieur soit par les flyschs tertiaires fracturés. Les pièges sont constitués par des structures anticlinales en relation avec l'obduction des séries allochtones durant l'Eocène terminal. La couverture est assurée par les niveaux argileux des flyschs tertiaires ainsi que par les séries allochtones de la nappe des basaltes et des péridotites.

- **Connaissance géologique suffisante?**

Même si des données de sismique et de forages de bonne qualité sont disponibles, la connaissance 3D des géométries et de la nature des formations géologiques n'est actuellement pas suffisante pour savoir si le stockage géologique de CO₂ est viable. Concernant le site de Bourail, un facteur à prendre en considération est l'éloignement des usines de production et l'obligation de construire des infrastructures pour le stockage, ce qui entrainerait un surcout conséquent. Une analyse détaillée des mesures pétro-physiques dans l'objectif de connaître le potentiel de stockage de CO₂ est à envisager. Le retraitement sismique (bénéficiant des nouveaux algorithmes) des anciennes données sismiques pétrolières permettrait d'améliorer grandement les images sismiques. Une étude plus fine du sondage carotté Cadart 1 pourrait également apporter des éléments nouveaux quant à la fracturation et la perméabilité des sédiments traversés (les carottes du sondage sont conservées par le SGNC).

IV) DESCRIPTION GEOLOGIQUE DES SITES – OFFSHORE

IV-1) Le lagon

Le Lagon de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie est bordé par une barrière récifale qui est la plus grande au monde après celle de l’Australie. La barrière est relativement continue (à l’exception de quelques passes) et peut comprendre localement deux ou trois récifs internes parallèles.

Le lagon est une zone de tranche d’eau peu épaisse (0 – 40 m) comportant de nombreux récifs et des sédiments meubles. Ce domaine offshore peu profond reste peu connu, en raison des difficultés de navigation dues aux récifs coralliens et des limites technologiques des anciens équipements de prospection. Il existe plusieurs types de données sur le lagon, mais en très faible quantité. *En vue de la construction de l’usine KNS et de son chenal d’accès, des prélèvements sédimentologiques, des levés sonar, magnétiques, ... ont été acquis récemment sur le lagon. Ces données, propriétés de la société, n’ont pas été rendues publiques et n’ont pas pu être analysées.*

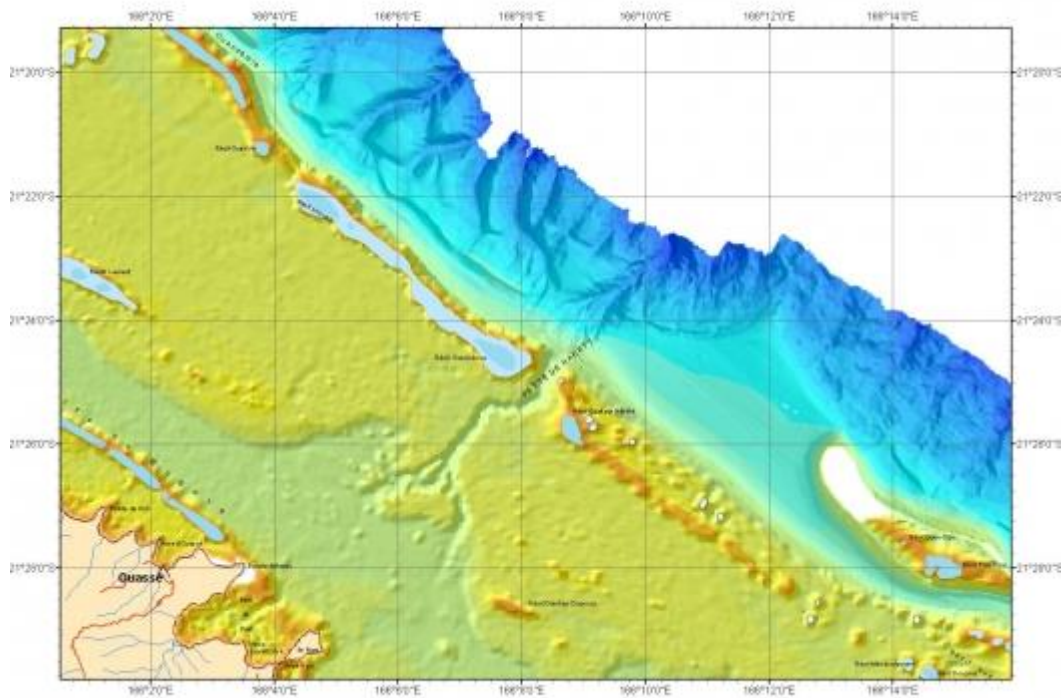
IV-1-1) Données bathymétriques

Les données bathymétriques du lagon ont pour origine les minutes du SHOM. A partir de la numérisation de ces minutes (Figure 33), un modèle numérique de terrain a été créé pour une grande partie du lagon (source: <http://www.zoneco.nc/resultats-thematiques/environnement-lagonaire/numerisation-des-minutes-bathymetriques-du-shom-dans>).

Seule la région au large de Nouméa a été cartographiée par sismique réflexion à haute résolution et à très haute résolution (Tableau 2). Ces données fournissent des informations sur la géométrie des formations superficielles.

Campagne	Type donnée	Année/référence	Disponibilité	Zone
CGG 57	Sismique mode analogique	1956-1957 (Vially et Mascle, 1994)	inexploitables	Lagon au large de Nouméa (Figure 34)
CALGON	Sismique HR mode numérique	2004 (Le Roy et al., 2008)	disponibles	Lagon au large de Nouméa (Figure 35a)
ZONECO 7	Sismique HR mode numérique	(programme ZONECO ; Lagabrielle et al., 2005)	disponibles	Lagon au large de Nouméa (Figure 35b)

Tableau 2 : Listing des données existantes sur le lagon à l’ouest de Grande-Terre



(a)



(b)

Figure 33 : a) Exemple de modèle numérique de terrain sur le lagon effectué à partir des minutes bathymétriques numérisées du SHOM b) Localisation des sondes numériques SHOM en domaine lagunaire. Données géophysiques.

(<http://www.zoneco.nc/resultats-thematiques/environnement-lagunaire/numerisation-des-minutes-bathymetriques-du-shom-dans>)

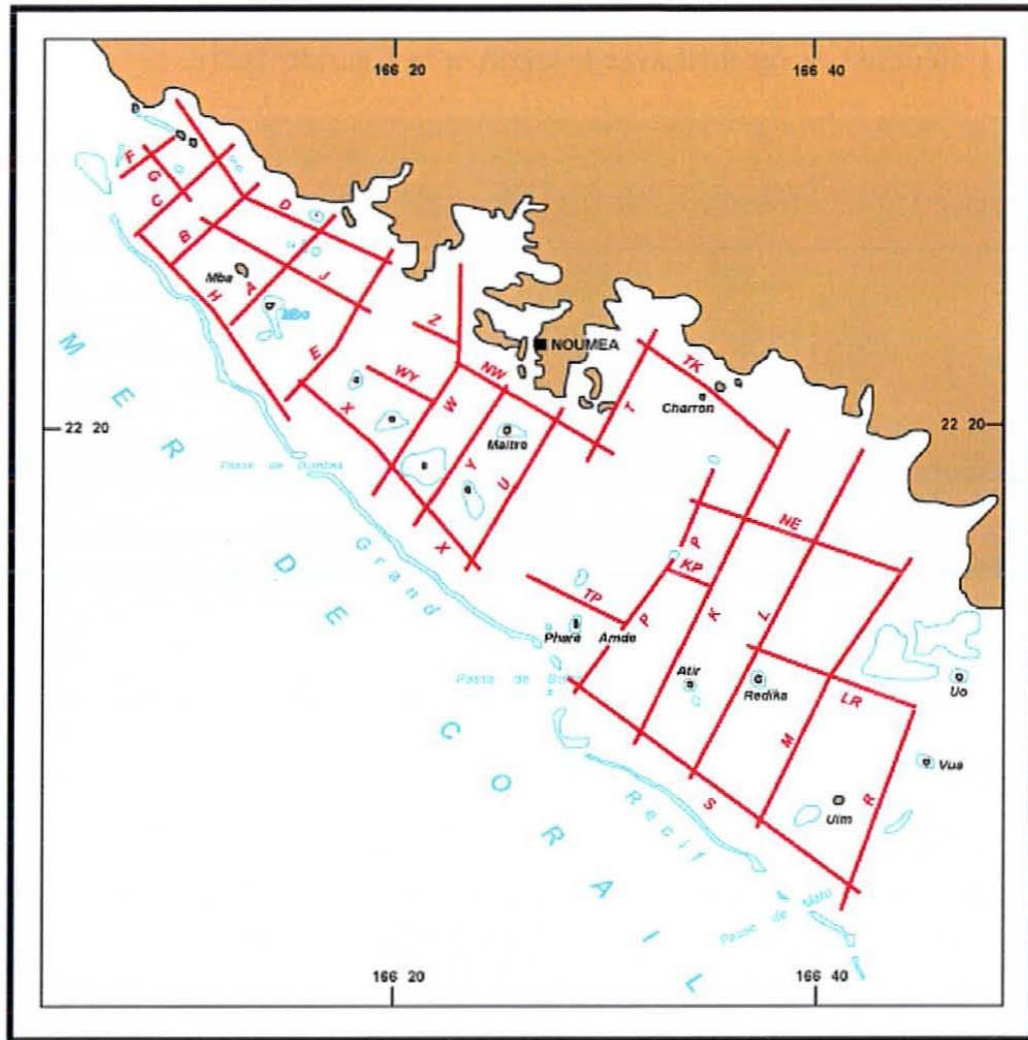
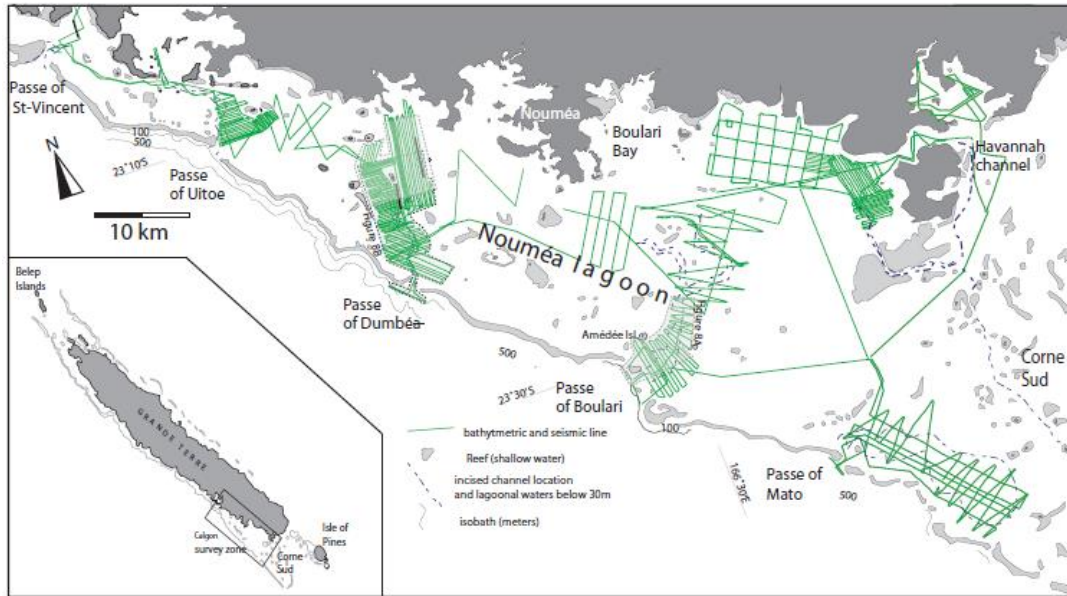
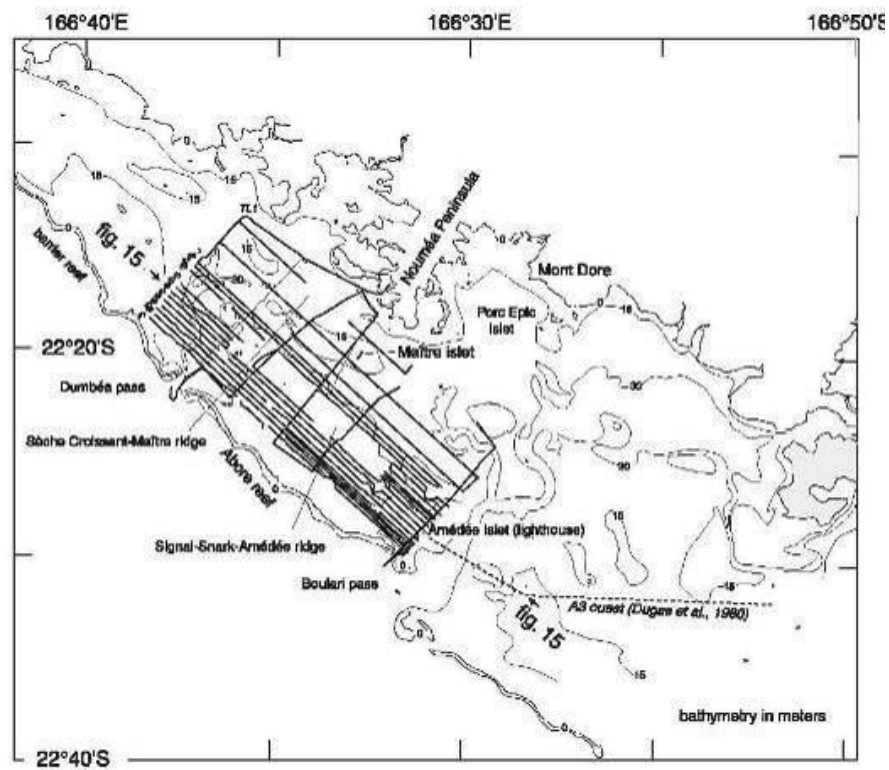


Figure 34 : Position de la campagne CGG 57 (Vially & Lafoy, 2005)

Les images sismiques du lagon existantes montrent uniquement la partie superficielle (< à 100m de profondeur sous le fond marin) du sous-sol (Figure 36). Les récifs limitent la pénétration des ondes acoustiques et jouent un rôle d'écran sismique masquant ainsi les formations et structures. D'après Le Roy et al. (2008), le socle acoustique des profils HR CALGON correspondrait à des récifs du Pléistocène et les sédiments observés reposeraient sur une surface karstifiée.



(a)



(b)

Figure 35 : Position de la campagne (a) CALGON d'après Le Roy et al. (2008) et (b) ZONECO 7 du programme ZONECO (Lagabrielle et al., 2005).

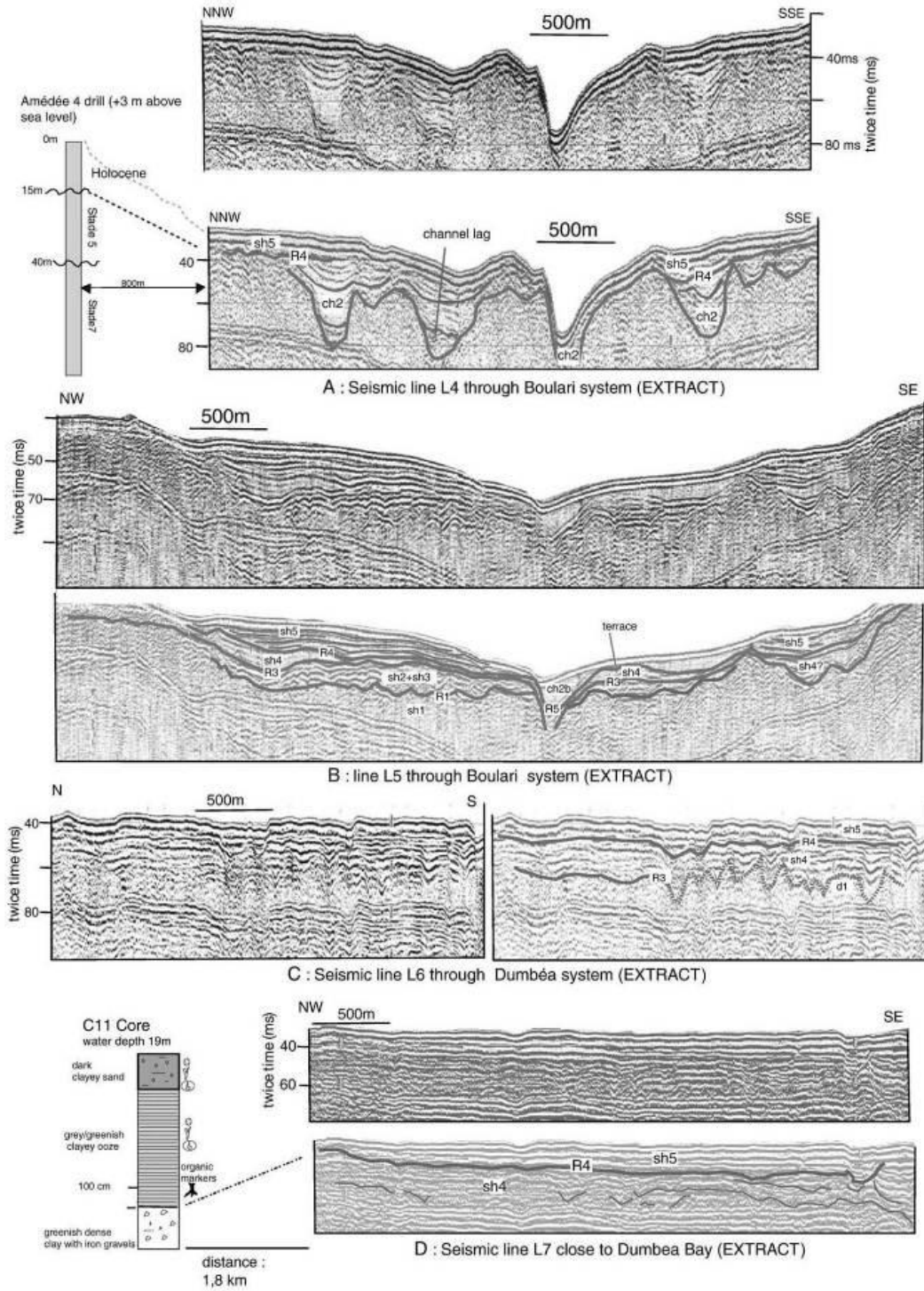


Figure 36 : Exemples de profils sismiques HR (campagne CALGON) (Le Roy et al, 2008).

IV-1-2) Information géologiques

Les sondages effectués dans le lagon sont rares et concernent la partie superficielle du fond (cf ; Base de données de SGNC et publications). La plupart des prélèvements donnent des informations sur la nature des sédiments meubles superficiels et sur les récifs (e.g. Le Roy et al., 2008, Montaggioni et al., 2011). Quelques sondages ont été réalisés sur le récif barrière (Coudray, 1971 ; Cabioch, 2008) de 100 à 250 m de profondeur et on atteint le substrat.

IV-1-3) Synthèses cartographiques

Les synthèses cartographiques du lagon de Nouvelle-Calédonie sont uniquement des cartes sédimentologiques informant sur la nature du fond-marin (Tableau 3).

Zone	auteur	Organisme	Echelle	N° carte Sphaera	année
Mont Dore	J.P. Debenay & F. Dugas	ORSTOM	1/50000	915	1978
La Tontouta	J.P. Debenay & F. Dugas	ORSTOM	1/50000	945	1979
Nouméa	J.P. Debenay & F. Dugas	ORSTOM	1/50000	1014	1980
Prony	J.P. Debenay & F. Dugas	ORSTOM	1/50000	1002	1981
SW du lagon	J.P. Debenay & F. Dugas	ORSTOM	1/200000	5638	1981

Tableau 3: listing des produits cartographiques du lagon (source : site internet de la DIMENC).

IV-2) Domaine bassin océanique profond

La Zone Economique Exclusive (ZEE) de Nouvelle-Calédonie représente 99% du territoire, avec une superficie de 1470000 km² (source site internet DIMENC). Situé au large des usines métallurgiques de Grande-Terre, le bassin de Nouvelle-Calédonie pourrait-il être un réservoir potentiel de CO₂ grâce à ses caractéristiques morphologiques et géologiques ?

De nombreuses synthèses sur le potentiel pétrolier du domaine océanique profond de la ZEE de Nouvelle-Calédonie existent, telle que la synthèse de Lafoy et al. (1996), qui souligne que les zones potentiellement pétrolifères les plus prometteuses se trouvent en mer le long de la ride de Lord Howe (Fairway).

IV-2-1) Description

Le bassin de Nouvelle-Calédonie se développe à l'ouest de l'île Grande-Terre, au pied de la marge occidentale de la ride de Norfolk. Il est le plus important de tout l'offshore calédonien. Ce bassin se caractérise par une plaine abyssale allongée de direction NW-SE à WNW-ESE. Il atteint une profondeur d'eau de 3700m. Séparant le lagon de la plaine abyssale, la pente insulaire (entre -100m et -3000m de profondeur d'eau) est étroite et entaillée de canyons. Le pied de la pente

se caractérise par des dépôts de bas de pente (géométrie et nature hétérogène/complexe des formations sédimentaires). Pour donner un ordre de grandeur, la plaine abyssale sans instabilité de bas de pente, est située à une centaine de kilomètre à l'ouest de Nouméa. Le bassin de Nouvelle-Calédonie présente d'importantes séries sédimentaires, avec à la base, des séries analogues à celles des bassins onshore de la côte ouest, détenant une roche-mère d'âge crétacé supérieur (Vially, 1999; Figures 37 et 38).

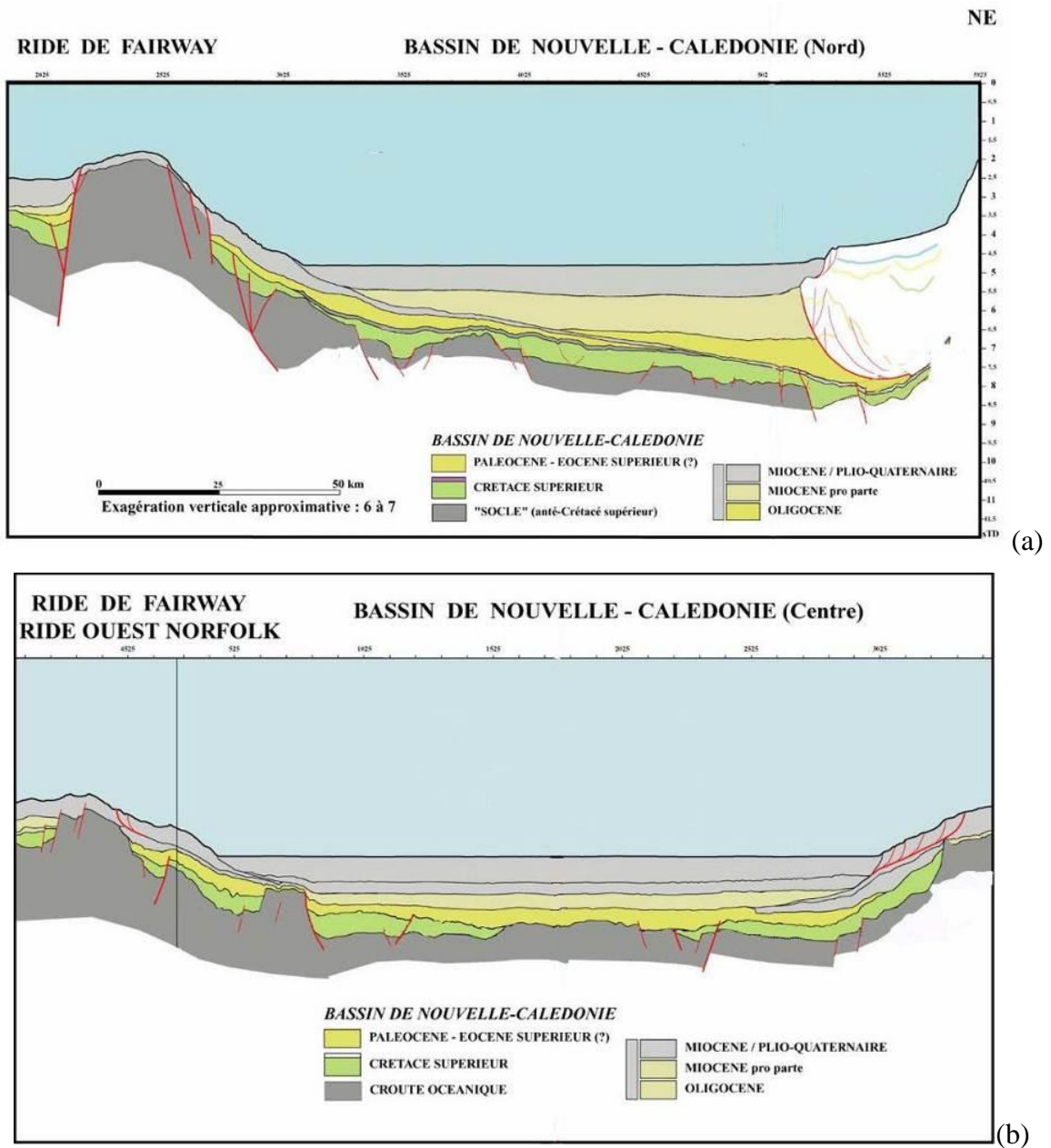


Figure 37 : Coupes à travers le bassin de Nouvelle-Calédonie (a) partie Nord et (b) partie Sud. Elles montrent le remplissage sédimentaire Crétacé-Tertiaire et les structures (d'après Vially et Lafoy, 2008).

L'épaisseur des séries sédimentaires augmente régulièrement vers l'Est pour atteindre leur maximum (environ 7000 m) au pied du tombant du récif barrière (Dubois et al., 1974; Launay et al., 1979 d'après Lafoy et al. 1996). Le puits 206 a été foré lors du Leg DSDP 21 qui a eu lieu au printemps 1973 (voir http://www.deepseadrilling.org/21/volume/dsdp21_06.pdf; (Leg DSDP 21, Burns, Andrews et al., 1973; Van der Lingen et al., 1973). Il a permis de dater la série sédimentaire du Paléocène moyen à l'actuel. L'ouverture du bassin de Nouvelle-Calédonie est datée du Crétacé au Paléocène (Mignot, 1984 ; Lafoy et al., 1996).

IV-2-2) Données de la ZEE

Les données disponibles sont essentiellement des données géophysiques (bathymétrie [Pelletier et al., 2013], gravimétrie et magnétisme [Collot et al., 1988; Sdrolias et al., 2003], réflectivité acoustique et sismique, des données géologiques (forages DSDP), mais aussi des produits cartographiques de données et de synthèses géologiques. L'atlas bathymétrique de la Nouvelle-Calédonie a été édité en 2009 et établi à partir des nombreux levés bathymétriques réalisés dans la ZEE de la Nouvelle-Calédonie au moyen de sondeurs multifaisceaux ou mono faisceaux. Il est en cours de mise à jour de manière à intégrer les derniers relevés bathymétriques effectués (programme Zoneco 2013, Figure 39).

Les données de sismique et les forages nous renseignent sur la géométrie, la nature et l'âge des formations géologiques. Les cartes de réflectivité et morpho-sédimentaire du fond marin nous renseignent sur la nature et la répartition des formations superficielles.

Le site internet de la DIMENC liste la plupart des produits cartographiques disponibles sur la ZEE de Nouvelle-Calédonie (Tableau 4). Depuis 2010, en collaboration avec *Geoscience Australia* et *GNS-Science*, le SGNC (service géologique de Nouvelle-Zélande) construit une base de données régionale (Figure 40) intitulée "*Tasman Frontier Geophysical Database*" (TFGDB). TFGDB contient des données géologiques telles que les sondages DSDP, ainsi que les profils sismiques excepté ceux des campagnes ZONECO 1, 2, 3 et 4. Les données sont inventoriées et décrites dans le rapport de Sutherland et al. (2012).

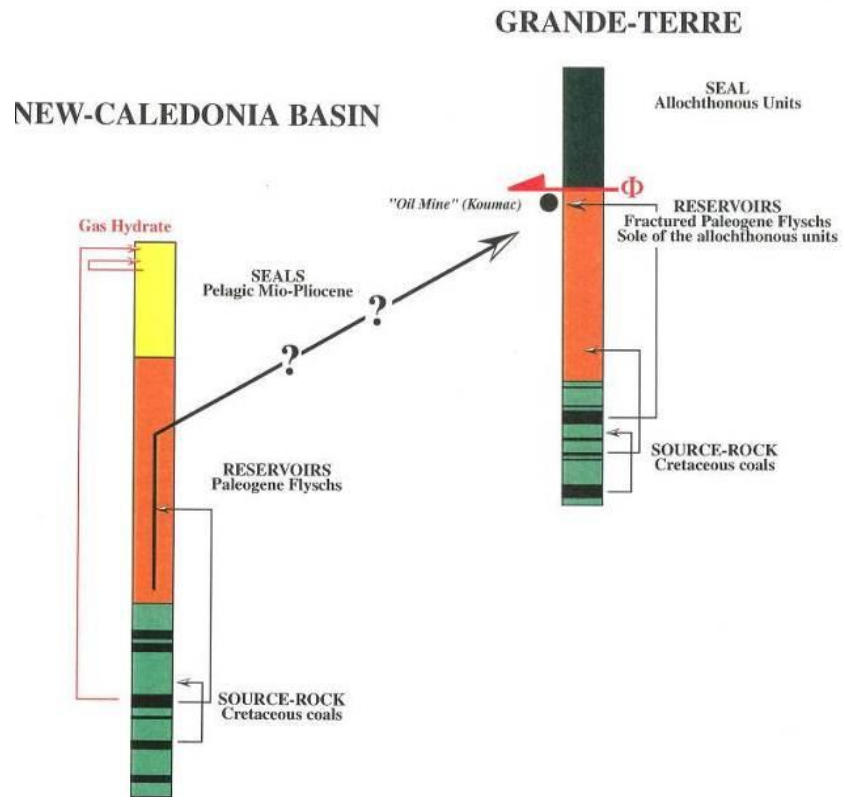


Figure 38 : Les différents systèmes pétroliers du domaine offshore profond et au domaine émergé d'après Vially (1999)

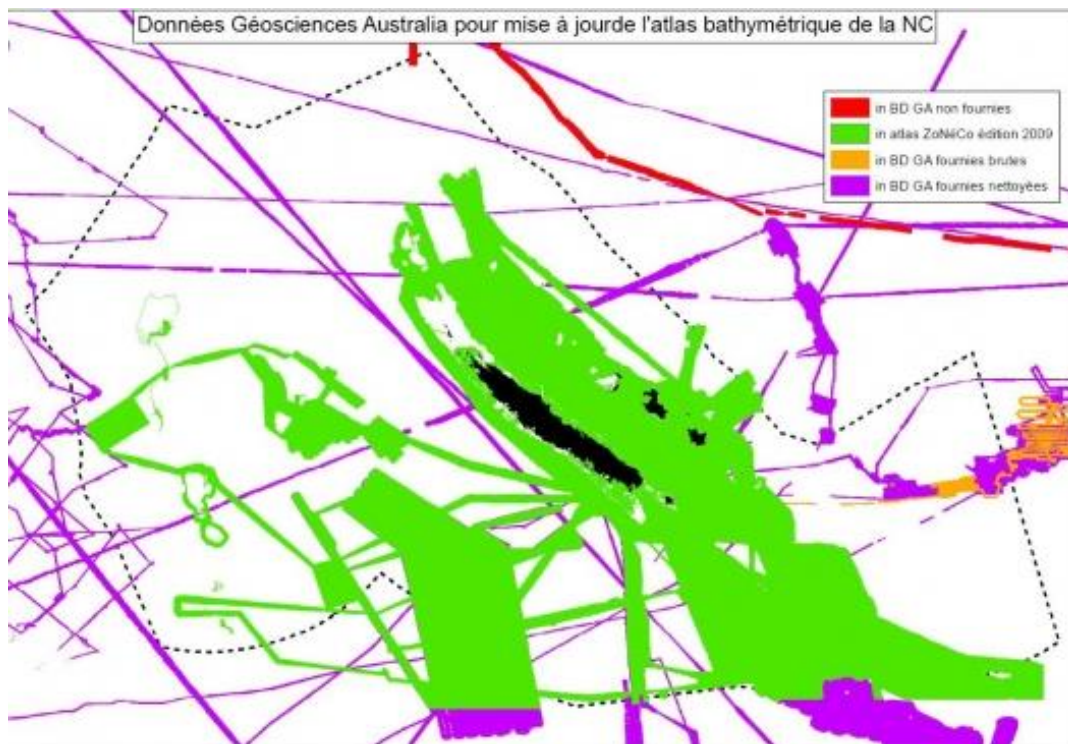
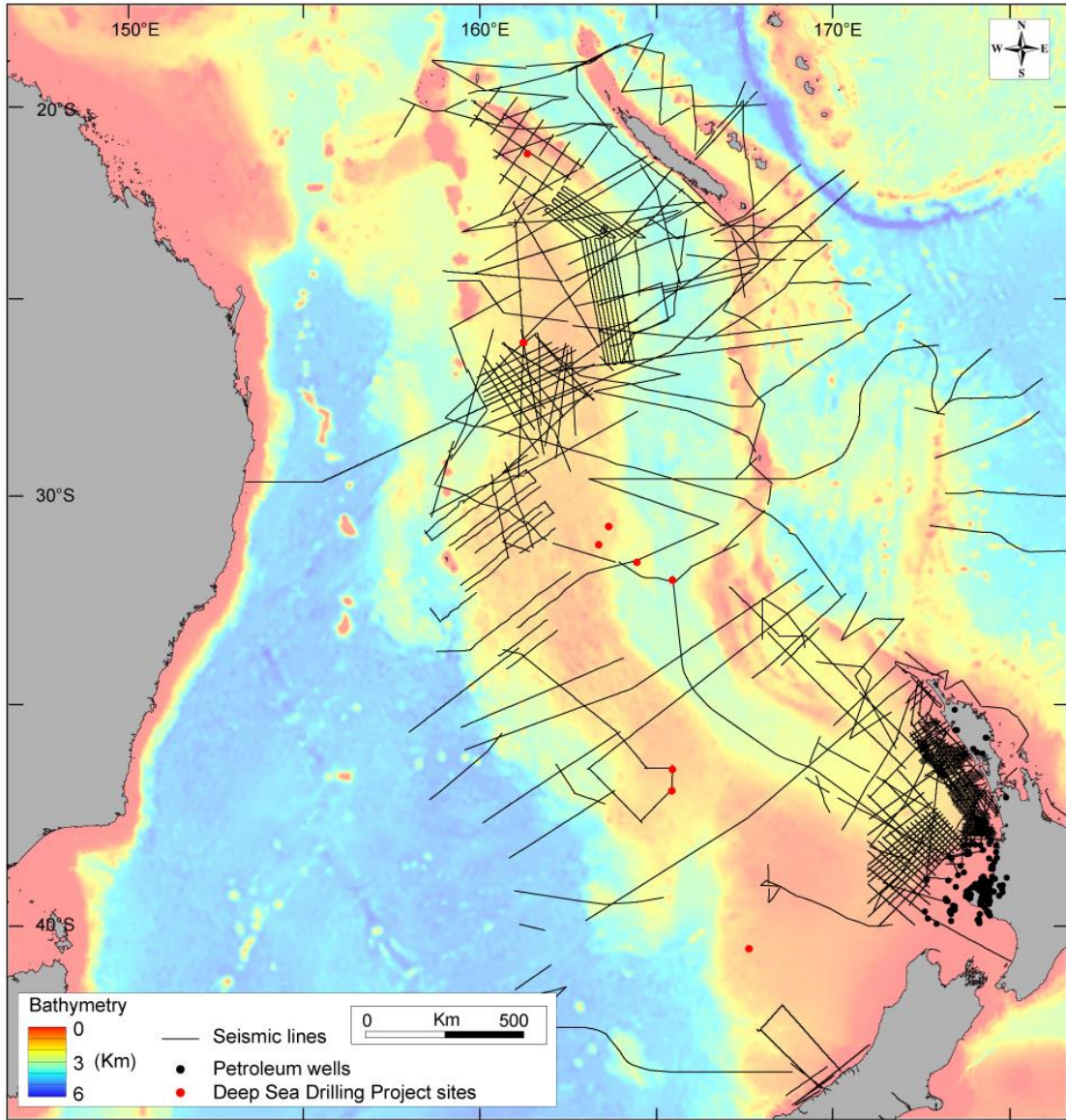
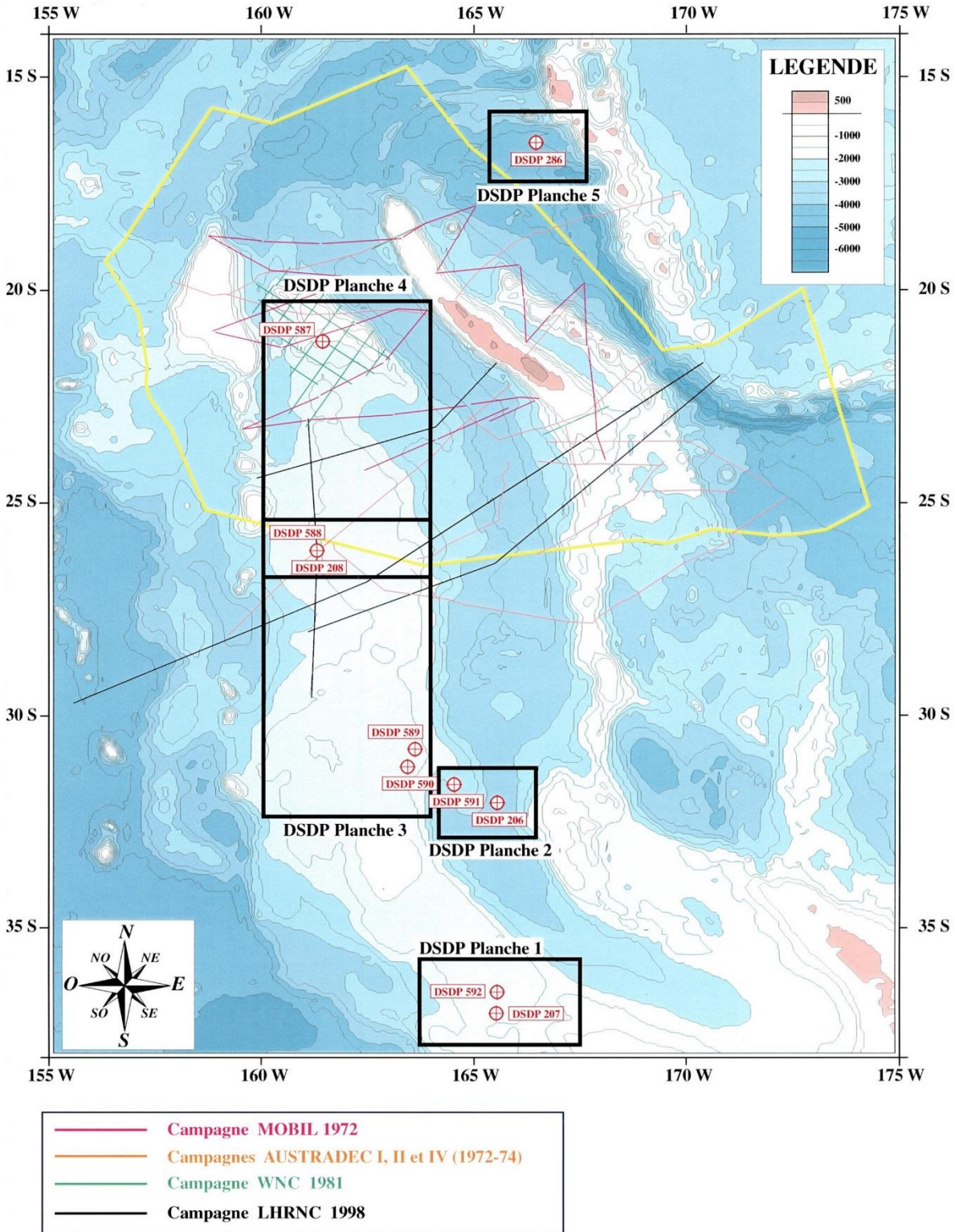


Figure 39 : Données géosciences Australia pour mise à jour de l'atlas bathymétrique de la Nouvelle-Calédonie (source : <http://www.zoneco.nc/resultats-thematiques/environnement-hauturier/mise-jour-de-latlas-bathymetrique-de-la-nouvelle>).



(a)



(b)
Figure 40 : a) Carte de localisation des profils sismiques de la Tasman Frontier Geophysical Database développée en collaboration par les services géologiques régionaux (Geoscience Australia, GNS-Science et le SGNC) ; b) Plan de position des forages DSDP autour de la Nouvelle-Calédonie. Source DIMENC (site <http://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Earth-Science/Ocean-Floor-Exploration/Oceans-Research/Tasman-Frontier>).

Un inventaire des travaux effectués et des données recueillies dans la zone économique de Nouvelle-Calédonie a été publié en 1992 ("Présentation générale du programme ZoNéCo"), dans le cadre des travaux du groupe "ZoNéCo" (Zone Economique de Nouvelle-Calédonie) dans l'objectif de faire un inventaire du potentiel de l'offshore néo-calédonien. Ce document prend en compte aussi bien les données de physique, géochimie, biologie, géologie, et géophysique marine.

Depuis les années 1970, des demandes d'Autorisation Préalable de Prospection (APP) [déposées par TEXACO (1972); COPAREX (1972); les groupements "GEOREX-Générale Exploration France (GEF)-Société Pétrolière d'Importation (SPI)-Union des Gaz Modernes (UGM)" en 1972 et "SNPA-ERAP-TOTAL" en 1973; SALEN ENERGY (1979), et Nouvelle-Calédonie Energie SARL (NCESA) en 1994], ont porté sur les zones peu profondes du plateau des Chesterfield et de la ride de Fairway.

La Figure 41 présente la répartition des données existantes sur le domaine océanique profond autour de Grande-Terre de Nouvelle-Calédonie.

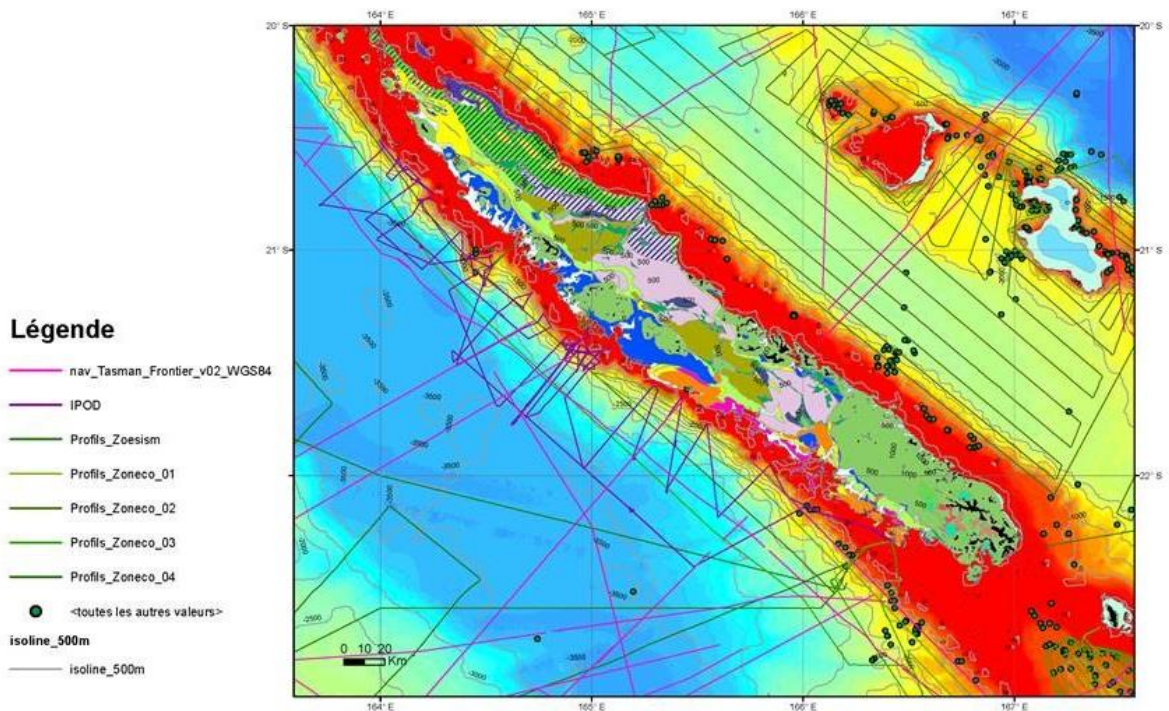


Figure 41 : Etat des lieux des données existantes sur le domaine océanique profond à proximité de Grande-Terre (Nouvelle-Calédonie) : prélèvements géologiques (forages DSDP) et l'ensemble des données de sismique réflexion numériques existantes [campagnes ZONECO (1, 2, 3, 4), IPOD, base de données TASMAN]. Source : SGNC. Fond cartographiques : Carte bathymétrique et carte géologique à 1/500000 présentées (Figure 7).

En mer, les travaux effectués au sein de la zone économique de Nouvelle-Calédonie ont essentiellement consisté en des levés de reconnaissance à grande échelle des structures sous-marines.

Type de données	Campagnes	Format	Année	Source/Disponibilité	remarques
sismique réflexion	CGG, AUSTRADDEC I et II, WNC, MOBIL OIL, GULF REX	analogique	1956 à 1981	SGNC	en cours de numérisation et de valorisation
sismique réflexion	7 campagnes ZONECO.	B2D Numérique	1991 à 2004	SGNC/ZONECO	Seules Zoneco 1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 ont des données à proximité de Grande-Terre
sismique réflexion	FAUST 1 & 2 (French Australian Seismic Transect)	B2D Numérique	1998, 2001	TFGDB	Eloignées de Grande-Terre
sismique réflexion	NOUCAPLAC 1 & 2	B2D Numérique	2004	EXTRAPLAC SGNC/Ifremer	Eloignées de Grande-Terre
sismique réflexion	IPOD	B2D Numérique	2012	SGNC	Pente insulaire occidentale de Grande-Terre
FORAGES	DSDP 587 (Ride de Fairway) ; DSDP 286 (Bassin des Loyauté)	Rapport DSDP Vol XXX et XC	1975, 1986	TFGDB/DSDP	Ride de Fairway ; Bassin des Loyauté
Gravimétrie	Collot (2009)	Données numériques/carte	2009	DIMENC	Couverture sur l'ensemble de la ZEE
Magnétisme	Collot et al. (2009)	Données numériques/carte	2009	DIMENC	Couverture sur l'ensemble de la ZEE
réflectivité acoustique des fonds marins	Laurent (2011)	Carte de synthèse	2011	DIMENC	limitée à la pente insulaire de Grande-Terre et des îles Loyauté, au bassin des Loyauté et à la Ride de Fairway.
Morpho-sédimentaire des fonds marins	Laurent et al., (2011)	Carte de synthèse	2011	DIMENC	Couverture sur l'ensemble de la ZEE. Grande échelle

Tableau 4 : Exemple de données existantes en offshore sur la ZEE de la Nouvelle-Calédonie.

Les données gravimétriques et magnétiques (Figure 42) (e.g. Collot et al., 1988 ; Sdrolia et al., 2003) proviennent de mesures effectuées principalement par satellites mais aussi par quelques levés à partir de navires océanographiques.

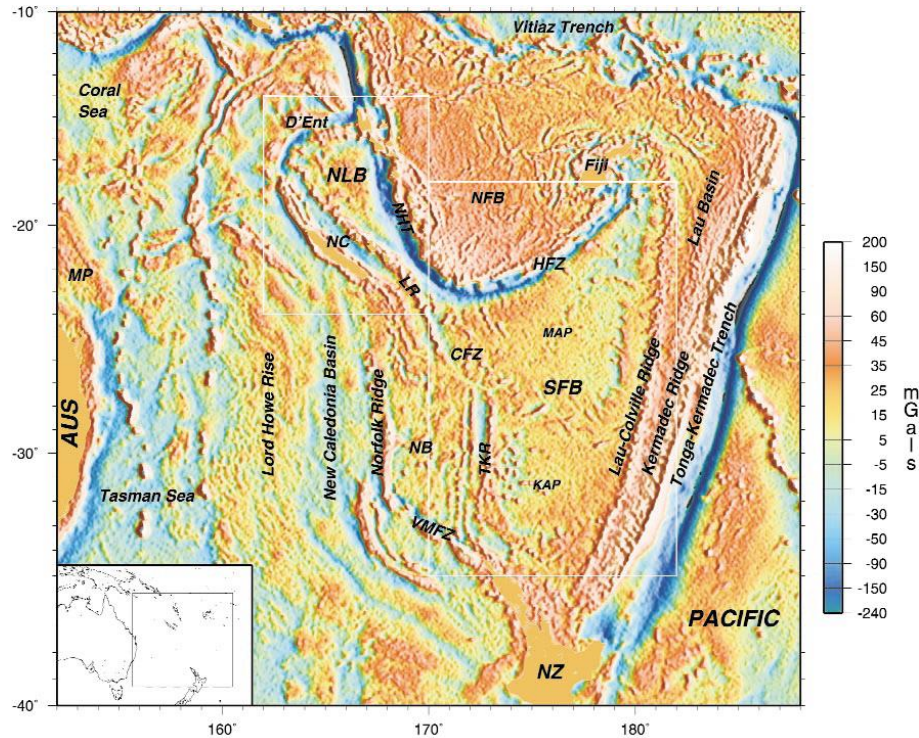


Figure 42: Carte gravimétrique (d'après Sdrolias et al., 2003). NC= Nouvelle-Calédonie.

IV-3) Intérêt du domaine offshore peu profond et occidental

Aucune donnée du lagon actuellement disponible n'est utilisable pour l'étude du stockage de CO₂. Les données et produits sont axés exclusivement sur les sédiments du fond marin ou les formations très superficielles comme les récifs. La totalité des profils de sismique multitraces recoupant le bassin profond de Nouvelle-Calédonie s'arrête au niveau du tombant du récif barrière. Le domaine "lagon" est en effet sous-exploré, bien qu'il représente la zone clé de la transition entre le domaine offshore profond et le domaine émergé de Nouvelle-Calédonie. A l'heure actuelle, on ne peut préciser ni le prolongement offshore des bassins de Nouméa-Bouloupari, de Bourail, de Koné et de Koumac, ni l'extension vers l'Ouest des unités allochtones (nappes basaltiques de Poya, nappes de péridotites) de la Grande Terre, ni leur style structural.

Bien que l'exploration du lagon soit difficile du fait de son immersion, de la présence de récifs, de sa faible tranche d'eau, une meilleure connaissance de ce domaine apporterait des informations précieuses dans le cas où un site de stockage serait proposé à terre sur les sites des usines métallurgiques, toutes situées en bordure du lagon. Néanmoins le caractère sensible lié aux

impacts environnementaux associés à la présence de récifs coralliens positionne cette option de façon plutôt défavorable.

Même si des données de sismiques et de forage de bonne qualité existent, la connaissance 3D des géométries et de la nature des formations géologiques offshore profondes du bassin occidental n'est actuellement pas suffisante pour proposer un scénario de stockage de CO₂. De plus les pressions et températures que l'on trouve dans ces formations géologiques sous-marines profondes pourraient induire la formation d'hydrate de CO₂, certes capable d'améliorer l'intégrité du stockage grâce aux phénomènes gravitaires favorables, mais pouvant également entraîner un colmatage de la porosité limitant l'injectivité. La technologie des hydrates de CO₂ reste peu connue et très incertaine. Un second facteur défavorable au stockage offshore en Nouvelle-Calédonie concerne la localisation des sites et leur éloignement des usines de production, qui entraîneraient un surcoût de transport (installation) conséquent, voire prohibitif.

Globalement, il ressort de cette étude préliminaire que les données existantes restent insuffisantes (à la fois dans leur densité géographique et dans leur nature qui est du type pétrolier) pour identifier avec pertinence le potentiel de stockage dans cette partie du territoire. En raison de la méconnaissance de la nature et de l'âge de ces séries sédimentaires, faute de forages profonds, les roches ayant un potentiel de stockage (roches-mères potentielles) demeurent inconnues.

L'acquisition de nouvelles données, notamment de forages océaniques permettant de recalibrer et de dater les réflecteurs sismiques et de définir les niveaux de roches-mères, serait indispensable si un stockage offshore était envisagé.

V) RECOMMANDATIONS

A la lumière des nouvelles données compilées à la suite de cette étude, il apparaît évident qu'un certain nombre de compléments d'information s'avère nécessaire afin de mieux comprendre et connaître la géologie et l'hydrogéologie du sous-sol calédonien, en accord avec différentes contraintes de surfaces inhérentes, avant de pouvoir s'avancer vers un diagnostic précis et assuré sur l'estimation du potentiel de stockage des formations géologiques en Calédonie, et plus notamment les massifs péridotites du Sud de l'île.

Dans cet objectif, le projet CNRT a pour but de proposer, une évaluation crédible des besoins de stockage en NC, un cahier des charges à mener pour la mise en place d'un démonstrateur, ainsi qu'un avis concerté sur les possibilités de stockage dans l'île avec un intérêt particulier pour la partie Sud de l'île.

V-1) Evaluation crédible des besoins de stockage

L'évaluation des besoins de stockage en Nouvelle Calédonie passe par une analyse des contraintes locales pouvant conduire à des prises de décisions concertées entre les industries minières les autorités locales et la population. Elles peuvent se diviser en deux groupes, d'un côté la contrainte environnementale et sociétale, d'un autre la contrainte économique.

- **La contrainte environnementale et sociétale:**

La question climatique et les émissions de gaz à effets de serre en Nouvelle Calédonie demeurent un sujet d'actualité :

- Article dans Le Monde du 23 Mars 2013 : http://www.lemonde.fr/planete/article/2013/03/23/la-nouvelle-caledonie-rejettera-en-2015-autant-de-co2-qu-un-pays-du-golfe_1853177_3244.html
- Article direct matin, 26 Mars 2013 : <http://www.directmatin.fr/environnement/2013-03-26/la-nouvelle-caledonie-championne-de-la-pollution-au-co2-430443>
- Article sur le site Europe 1 : <http://www.europe1.fr/france/la-nouvelle-caledonie-championne-du-co2-1459569>

En Nouvelle Calédonie un inventaire a été réalisé au titre de la Convention cadre des Nations Unis sur le changement climatique (CCNUCC) par le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa) mais seuls la métropole et les DOM dont les émissions de gaz à effets de serre ont diminué de 5.6% entre 1990 et 2007, entrent dans le périmètre retenu sous le protocole de Kyoto (Le Bars et al., 2010). Elles ont augmenté de 63.5% dans l'ensemble de la « Nouvelle-Calédonie + COM » avec une contribution essentiellement attribuable à l'augmentation de gaz carbonique (+1.7Mt). A noter que les émissions pour l'ensemble des communautés d'outre-mer et de la Nouvelle Calédonie représentent moins de 1% de l'ensemble

des émissions « métropole + DOM » déclarés sous le protocole de Kyoto (dont 70% provenant de la Nouvelle-Calédonie) toujours selon Le Bars et al., 2010.

Le Nickel demeure une industrie très intensive en carbone, le meilleur procédé de production de nickel émet dix fois plus de GES par tonne que pour produire 1 tonne d'acier. L'activité métallurgique constitue la principale source d'émission de CO₂ en Nouvelle-Calédonie à des niveaux équivalents à ceux rencontrés dans les autres continents et n'a pas bonne presse cf.:

- Extrait de l'article d'Europe 1 : « *La Nouvelle-Calédonie émettra bientôt autant de carbone dans l'atmosphère, rapporté au nombre d'habitants, que le Qatar ou le Koweït, en raison du fort développement de l'industrie du nickel, ont averti lundi des organisations écologiques.*

Dans une lettre adressée au président du gouvernement calédonien, le Fonds mondial pour la nature (WWF) et Conservation international (CI) indiquent que "la note d'émission estimée à 13,7 tonnes par habitant et par an" va grimper "dans les prochaines années à 36,8 tonnes". "Ce qui montera la contribution de la Nouvelle-Calédonie (250.000 habitants) à 2,5% du bilan carbone national et la positionnera dans le peloton de tête mondial des populations les plus contributrices en CO₂/an/habitant, entre le Qatar, le Koweït et les Emirats Arabes Unis", poursuivent les ONG.

Cette percée s'explique par l'entrée en production cette année de deux gigantesques usines métallurgiques de nickel construites par des majors minières et qui sont alimentées par des centrales électriques au charbon. Dans leur courrier, le WWF et CI exhortent les autorités locales "à décarboner l'économie calédonienne alors que des permis d'émissions s'imposeront inéluctablement dans le futur" et que la Nouvelle-Calédonie se situe dans la région Pacifique sud "directement affectée par le réchauffement climatique". »

Il apparaît donc de manière flagrante que l'image et la notoriété de l'industrie minière implantée en Nouvelle Calédonie, ainsi que les autorités locales pâtissent de cette mauvaise presse, et qu'un effort commun pour améliorer cette notoriété est souhaitable à l'ensemble des parties prenantes « **pour une exploitation durable des ressources minières compatible avec la préservation de l'environnement naturel et humain de la Nouvelle-Calédonie** », tel que le CNRT se définit.

- **La contrainte économique**

Dans la chaîne de CCS, le coût le plus important est celui du captage du CO₂, il consiste à séparer le CO₂ des autres produits de combustion : l'azote pour des combustions à l'air, l'oxygène non consommé (combustion pauvre), l'eau, les polluants (hydrocarbures imbrûlés, les oxydes d'azote (NO_x) et de soufre (SO_x), les particules, les suies, les composés organiques volatils (COV). Sans une diminution drastique du coût de capture du carbone, l'applicabilité du procédé peut être remise en cause. Trois options de captage sont développées. La postcombustion est la plus facile à implémenter car le CO₂ est capté en sortie de fumée d'usine, il peut donc s'adapter à des installations existantes. La capture en précombustion consiste à capter le CO₂ avant la combustion de façon à effectuer la combustion à l'air d'un combustible non carboné (hydrogène) produit. Enfin les procédés d'oxy-combustion qui consiste à procéder à une combustion dans l'oxygène quasi pur au lieu de l'air ambiant pour mieux séparer le CO₂ en sortie. Le déploiement de telles technologies de capture ne peut être décidé sans une validation sur les installations industrielles.

Pour le transport de CO₂ sous forme comprimé (gaz ou liquide selon les pressions et température) deux voies sont envisageables, les gazoducs (avec quelques spécificités pour le CO₂) ou bien le transport maritimes (maîtrisé par les méthaniers) en cas de stockage off-shore. Cette étape n'est pas une contrainte technologique.

Le stockage géologique du CO₂ dans les basaltes et les péridotites est moins avancé que le stockage géologique dans les aquifères salins. Il faut donc, dans un premier temps, des compléments de recherche. Toutes ces solutions sont encore trop coûteuses et on ne sait pas aujourd'hui laquelle sera, d'ici dix ans, la plus performante. Les différences actuellement signalées ne sont pas de nature à favoriser une voie plutôt qu'une autre. Aucune de ces technologies n'est encore économiquement compétitive. Les promoteurs de la séquestration géologique de l'AIE et certains professionnel, notamment AP. Moller – Maresk Group¹, en se basant sur le rapport Mc

¹ Entreprise scandinave, spécialisée dans le transport du gaz, a des tankers à gaz de différentes tailles et s'intéresse très fortement à la récupération assistée du pétrole avec le CO₂ en mer du Nord

Kinsey paru en septembre 2008 (<http://www.mckinsey.com/>), estiment que le coût du stockage d'une tonne de CO₂ se situe actuellement entre 60 et 90 €.

Or, sur le marché de l'Union européenne le coût de l'acquisition du droit d'émissions d'une tonne de CO₂ était, en 2013, à 5 € par tonne de CO₂, bien loin de l'incitation économique nécessaire au déploiement de cette technologie (cf. Figure 43). Selon l'IEAGHG-AIE les coûts d'une installation CCS s'élève entre \$30 à \$100 par tonnes de CO₂ stocké, avec une répartition entre la capture, le transport et le stockage respectivement d'environ 20 à 80 \$ par tonne capté, 1 à 10\$ par 100km transporté, et 2 à 5\$ par tonne stocké. En prenant une marge supérieure à 100\$ la tonne de CO₂ stocké, et pour des tonnages de 500 kt par an et par installation, le stockage s'élèverait autour de 50 millions de US \$ par an.

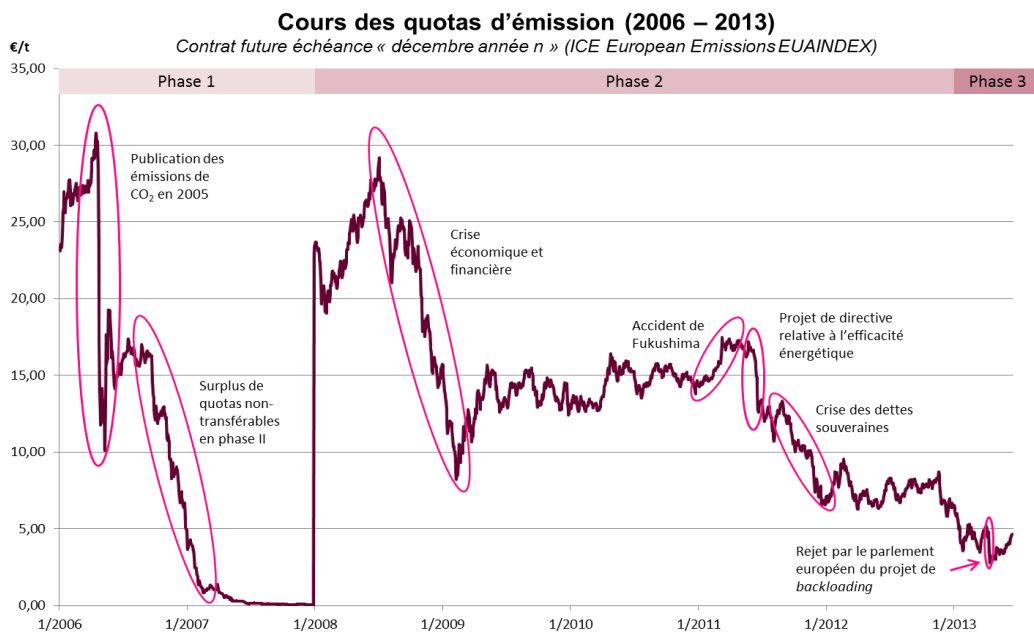


Figure 43 : Cours des quotas d'émission (2006-2013)

- **Conclusion sur les besoins de stockage**

Le besoin de stockage de CO₂ en Nouvelle-Calédonie est manifestement une nécessité au vu des émissions calculés au niveau du territoire et également ramené au nombre d'habitants. Une contribution de la réduction de ces émissions permettrait à la fois une démonstration du bon vouloir des autorités et des industries minières à implémenter des installations plus propres. La totalité des émissions ne pourra pas être stocké directement mais on peut envisager une réduction notable en comparant les chiffres de capacité d'autres sites pilotes existants qui peuvent atteindre de 1 à 3 Mt/an (contre environ 5.5 Mt/an en groupant les trois usines de NC).

La mise en place d'installation pilote permettant de démontrer la faisabilité du stockage est une première étape incontournable avant d'envisager la poursuite vers une installation de taille commerciale. Un exemple « voisin » à étudier est le projet CO₂CRC d'Otway en Australie. Depuis ces 10 dernières années le CO₂CRC contribue au déploiement des technologies CCS. Il présente aujourd'hui un programme de recherches 2015-2020 basé sur le site pilote d'Otway (injection dans des grès) pour lequel un budget de 62 millions de dollars australiens a été planifié. Le projet est divisé en deux phases, une première dédiée au stockage (84%) et une seconde phase à la capture. Le financement est réparti selon différentes parties prenantes (industries 18.5\$M, Gouvernement national 11.6\$M, Gouvernement Fédéral 25\$M, Partenaires Recherches 7.5\$M). Leur programme décrit les différentes étapes de mise en place d'un site pilote avec des budgets associés et les perspectives futures. Les avancées technologiques des programmes australiens seraient d'une grande utilité pour la mise en place d'un programme équivalent sur le sol Calédoniens.

V-2) Avis sur les scénarios possibles d'injection :

A partir des données collectées, et sur la base des discussions conduites entre les membres du consortium du projet, on se propose de discuter différents scénarios de stockage en fonction de critères liés à la capacité / Injectivité (efficacité) du site ainsi que des risques associés (cf. Tableau 5 ci-dessous). Se reporter également à la coupe schématique (non confirmée par des données géophysiques) de Vially et Masclé (1994) (Figure 15) pour avoir la vision actuelle de l'agencement des différentes formations en accord avec la carte géologique de Maurizot (Figure 9).

Dans un premier temps le potentiel de stockage selon les différents types de formations géologiques est discuté, à savoir :

- les nappes de péridotites,
- les basaltes de l'unité de Poya, et
- les formations sédimentaires tertiaires (Flyschs).

Dans un second temps un avis sur un scénario de stockage à l'aplomb de chacun des sites miniers est donné en s'appuyant sur les commentaires précédents. Enfin un scénario « marginal et innovant » est également proposé en utilisant la réactivité des péridotites du massif du Sud, de façon à proposer un maximum d'alternatives.

Formation géologique / Scénario de stockage	Capacité / Injectivité	Risques (fuite/sismique)	Commentaires
Péridotites	<p>Faible à Moyenne :</p> <p>Difficile aujourd'hui d'estimer la porosité connectée des péridotites. La fracturation peut être un avantage pour la capacité (mais un inconvénient pour la sécurité). La réactivité (et minéralisation) présente un potentiel possiblement intéressant mais à investiguer techniquement davantage (cinétique de réaction).</p> <p>Une autre piste serait la fracturation hydraulique de ces systèmes avec un degré de réussite très incertain.</p>	<p>Moyen à Elevé :</p> <p>Le risque de fuite semble élevé dans un contexte où les nappes présentent un niveau de fracturation élevé favorable à la circulation de fluides et ne sont pas recouverte d'une formation moins perméables.</p>	<p>Besoin important de caractériser :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la géométrie des nappes de péridotites, - la perméabilité en fonction des niveaux de fracturation et - la réactivité avec le CO₂, ainsi que la cinétique de minéralisation associée. <p>Des travaux de modélisations peuvent permettre de proposer quelques premières évaluations, mais un besoin d'acquisition de données via des mesures sur échantillons (banc de percolation en laboratoires) reste primordial.</p>
Basaltes	<p>Faible à Moyenne :</p> <p>La capacité de stockage des basaltes a été démontrée sur deux sites pilotes (Islande et USA). La réactivité est importante (carbonatation) et présente deux effets antagonistes : une forte dissolution qui augmente la porosité/perméabilité/ capacité du système et une forte précipitation</p>	<p>Faible à Moyen:</p> <p>La matrice poreuse des basaltes est généralement de faible perméabilité assurant une bonne intégrité. Risque de fracturation identifié.</p>	<p>La technique de stockage dans les basaltes repose sur la forte réactivité associés à l'injection de CO₂ et permettant une carbonatation (et donc un piégeage sous forme solide) rapide du CO₂. Cependant les basaltes sont des structures poreuses à perméabilité très variable dont l'hétérogénéité dépend des vitesses de dépôts de laves. Il faut donc identifier les zones à forte et faible perméabilité pour</p>

secondaire pouvant engendrer un effet inverse (clogging). On imagine des phénomènes identiques dans les péridotites.

caractériser correctement les profondeurs propices aux zones d'injection et les zones pouvant servir de scellement du système.

Flischs	Bonne De par leur nature sédimentaire, la capacité de stockage et l'injectivité est jugée à priori plus favorable que les péridotites ou les basaltes en excluant le rôle de la fracturation. Néanmoins aucune donnée sur la perméabilité-porosités de ces systèmes n'a encore été cataloguée.	Faible à Moyen: Si l'on considère l'anticline de Bourail surmonté d'une formation peu perméable le risque semble faible. De plus, la zone d'injection est éloignée des populations et usines. Pour Nouméa, la formation Flysch affleure donc présente un risque plus important si on n'identifie pas une roche couverture capable de stopper la remontée gravitaire du CO ₂ .	Le massif de Bourail a été investigué par le passé pour du pétrole, il semble une bonne piste de système de stockage situé à une distance équivalente des usines Nord et Sud. Le surcoût engendré par le transport de CO ₂ (bateau, ou conduite) est à évaluer, mais il reste en général moindre par rapport au coût de captage et stockage. L'impact d'une fuite potentiel serait également éloigné des zones urbanisées réduisant les risques associés à ce type de stockage.
A l'aplomb de l'usine de SLN Doniambo, Région Sud, Nouméa	Moyenne : Système Flysch apparemment présent en profondeur (forage sur 400 m à l'extrémité de la péninsule Ouen Toro) degré d'incertitude élevé sur la perméabilité de ces formations	Moyen à Elevé: Le Flysch étant affleurant il n'y a pas de roche couverture identifiée, le piège structural n'est pas clairement défini.	Un besoin de reconstruction du système géologique est primordial pour essayer de profiter de l'avantage d'avoir une formation sédimentaire (donc poreuse) à proximité de l'usine, mais aussi d'identifier un système piégeant (avec une roche couverture empêchant la remontée de CO ₂ à la surface).
A l'aplomb de l'usine de VALE NC, Prony, Région Sud, site de Goro	Inconnu Situé dans la nappe des péridotites, les sondages jusque 70m de profondeur indiquent une forte fracturation avec une forte conductivité hydraulique en	Inconnu : La fracturation des nappes péridotite en surface indique une forte perméabilité donc un faible piégeage. Néanmoins	Beaucoup d'inconnues pour la région envisagée. Un besoin important de caractérisation des perméabilités de péridotites et des cinétiques de réaction est nécessaire, ainsi qu'une connaissance plus approfondie de la géométrie des nappes en profondeur.

	surface (étude hydrogéologique CNRT2).	le comportement hydraulique plus profond est inconnu.	
A l'aplomb de l'usine de KNS (Koniambo), Région Nord	<p>Inconnu:</p> <p>Site situé entre l'unité de Poya (Basaltes) et la nappe des péridotites. Très peu d'information sur la répartition en profondeur de ces formations et de leur perméabilité. Degré de fracturation apparemment élevé (données carrière « Pied de mines »)</p>	<p>Inconnu :</p> <p>Idem que pour VALE au sujet des péridotites : risque fort de fuite en cas de fracturation élevé.</p> <p>Niveau d'information sur les basaltes faible : plutôt imperméable, certaines zones peuvent être plus passantes.</p>	<p>Idem que pour VALE, beaucoup d'inconnues pour caractériser l'efficacité d'un tel système et sa sécurité.</p> <p>Globalement le risque de fracturation est un contrôle de la perméabilité. L'idéal serait d'avoir un système avec une forte perméabilité et porosité en profondeur (au-delà de 800 m) et une faible perméabilité au-dessus (entre 800 m et la surface) pour assurer une bonne étanchéité.</p>
Bassin de Bourail	<p>Bonne :</p> <p>Identification d'hydrocarbure, indicateur de perméabilité (migration secondaire) et porosité (capacité de stockage).</p>	<p>Faible :</p> <p>Piège anticline confirmé, donc un système adapté au scénario de stockage géologique de CO₂. Cependant l'anticline est situé à 400 m ne permet pas de stocker le CO₂ sous forme dense (supercritique) et risque d'engendrer une extension de panache plus grande (à vérifier par modélisation).</p>	<p>Ce scénario semble le plus favorable d'un point de vue connaissance et caractérisation géologique, risques et capacité de stockage. De plus, il apporte une nouvelle opportunité d'explorer la récupération d'hydrocarbure en complétant le stockage par une récupération assistée de Pétrole, RAP (Enhanced Oil Recovery, EOR).</p> <p>Néanmoins la caractérisation des forages Gouaro 1 et 2 a été établie pour une profondeur de 655 m maximum, au-dessus des 800 m préconisé pour garder un CO₂ dense et moins volumineux.</p> <p>Il présente également l'inconvénient d'être éloigné des usines, situé à « mi-chemin » (150 km) entre les sites. Une étude complémentaire sur le transport de CO₂ via des conduites en surface (à priori pas forcément onéreuse) permettre un acheminement du CO₂ de toutes les usines vers la même cible de stockage éloigné de la population et de</p>

			tous risques d'impact en surface (off-shore).
Injection dans les péridotites entre 100 et 400 m de profondeur	<p>Moyen à Elevé :</p> <p>Bonne en considérant la perméabilité liée à la fracturation. Néanmoins, le facteur limitant reste la capacité du système à réagir, chimiquement, rapidement pour piéger le CO₂ et l'empêcher de remonter à la surface. Evaluer les vitesses de flux gravitaire versus réactivité reste essentiel pour caractériser la capacité du système.</p> <p>On peut imaginer un système à plusieurs forages horizontaux superposés.</p>	<p>Moyen à Elevé :</p> <p>La cinétique de carbonatation contrôle le piégeage.</p> <p>Sans roche couverture, les fuites en surface sont probables (dangereux ?).</p> <p>Besoin d'un système de surveillance en surface.</p>	<p>L'idée de ce scénario est de profiter de la réactivité des péridotites et de leur perméabilité de fracturation pour piéger le CO₂ en le faisant circuler et réagir pour le solidifier par carbonatation. A démontrer par modélisation dans un premier temps pour dimensionner le système.</p> <p>Ce type de stockage serait innovant et unique au monde. Sa faisabilité restant à démontrer, un ensemble de calibration par modélisation numérique semble incontournable avant d'envisager une poursuite.</p>

Tableau 5 : différents scénarios de stockage en fonction de critères liés à la capacité / Injectivité (efficacité) du site ainsi que les risques associés

De par le fort degré d'incertitude des perméabilités et des porosités des formations péridotites et basaltes, l'estimation des capacités de stockage de ces formations géologiques est encore totalement impossible à calculer à l'heure actuelle sans un complément d'information par de nouvelles acquisition de données. D'autre part, la méconnaissance de l'agencement de ces formations en profondeur rajoute également un degré d'incertitude sur la géométrie des couches et donc des possibles piégeages structuraux ainsi que la présence de roche de scellement capable d'assurer l'intégrité des sites. Là aussi, un complément d'information est nécessaire via des campagnes de mesures géophysiques adaptés aux profondeurs adéquates.

La présence de formations sédimentaires (Flyschs éocène et Sénonien à charbon) permet de considérer des alternatives à l'utilisation de roches basiques ou ultrabasiqes. L'injectivité dans ces formations a été démontré par de nombreux projets de stockages aujourd'hui opérationnels dans le monde. Le bassin de Bourail a notamment déjà été étudié pour une évaluation de son potentiel à hydrocarbures et présente donc certaines caractéristiques nécessaires à un stockage. Néanmoins, la profondeur de la roche couverture (cap-rock) identifiée serait située au-dessus des 800 m préconisé pour garder le CO₂ à l'état supercritique et donc dense. De plus le site est situé à

plus d'une centaine de km des usines Nord ou Sud. Cependant, la récupération assistée d'hydrocarbure serait une alternative au stockage qui présenterait des avantages économiques à considérer.

Les sondages existants sont tous limités à 200 m maximum de profondeur sauf pour la région de Bourail (1400 m), limitant fortement la connaissance au-delà. Dans l'état, il est encore difficile d'apporter un avis tranché sur le choix du site et sur la méthode à adopter. Plusieurs investigations s'avèrent nécessaire avant de poursuivre toute prise de décisions.

Trois types de poursuites d'études (cf. également les conclusions Le Bars et al., 2010):

- **Investiguer le potentiel des roches ultrabasiques:** péridotites (Région Sud, VALE). C'est assez novateur et demande un travail de recherches complémentaires à l'existant pour caractériser la véritable capacité des péridotites de NC à carbonater du CO₂, mais aussi à établir si l'espace poral (lié à la fracturation) est capable de contenir les quantités souhaitées. Il y a un problème fondamental de volume disponible à résoudre. La NC serait le premier site mondial a proposé une telle approche. Des collaborations internationales, notamment avec l'industrie pétrolière en Oman sont possibles pour ce type de projet très novateur.
- **Investiguer les Basaltes (Région Nord, Koniambo, KNS):** Idem que pour les péridotites, besoin de caractériser le potentiel de ces basaltes à carbonater le CO₂ tout en caractérisant la porosité/perméabilité du système. La faisabilité des basaltes à stocker du CO₂ est en cours de démonstration (cf. II-2-4). La NC pourrait être le suivant et de fortes collaborations possibles avec l'Islande et les US seraient envisageables.
- **Investiguer le potentiel des formations sédimentaires (Région Sud, SLN):** Approche plus standard et déjà démontrée techniquement. La difficulté pour ce scénario réside dans l'identification de formations géologiques adéquatement disposée pour disposer d'un réservoir et d'une roche couverture (caprock). La possibilité de mettre en place de la récupération assistée d'hydrocarbure est un plus économique. Ici aussi de nombreuses possibilités s'offrent pour des collaborations internationales (Australiennes) à développer cette technologie.

V-3) Cahier des charges

Chacune des solutions présentées précédemment engendrent un coût conséquent et aujourd'hui impossible à établir. Le cahier des charges mis à disposition en détail en **Annexe A** apporte une estimation établie pour un site pilote sur le sol français et couvre plus en détail les deux premières des quatre grandes phases nécessaires à son élaboration : **Exploration – Opération – Fermeture – Abandon**. Ce cahier des charges a pour objet d'apporter une feuille de route comme requis par le contrat avec le CNRT, accompagné d'un budget des différentes tâches préconisées et permet de visualiser à la fois à court et long terme les différentes étapes nécessaires à la mise en place d'un site pilote (indépendamment du scénario choisi).

Néanmoins, dans le cadre de ce projet, un certain nombre d'études préliminaires sont à mettre en œuvre avant de décider de la faisabilité d'une opération pilote en Nouvelle-Calédonie. Après concertation, le consortium du projet préconise:

1- Des campagnes de terrain et de mesures géophysiques : pour améliorer la compréhension de la géométrie du système géologique considéré en profondeur. Trois types de méthodes sont à envisager : (i) la gravimétrie pour produire un modèle de la nappe ophiolitique et de son substratum – sur les 3-5 premiers kilomètres du sous-sol – et/ou de tester diverses hypothèses géologiques en comparaison avec de nouveaux éléments issues de l'observation de terrain ; (ii) la sismique passive haute résolution pour identifier en profondeur la possible présence de bassin sédimentaire sous les nappes péridotites ; et (iii) les méthodes électriques ou électromagnétiques (ERT – Electrical Resistivity Tomography (Tomographie de Résistivité Electrique), CSEM – Controlled Source EM (mesures électromagnétique à source contrôlée), GPR – Ground Penetrating Radar (Radar géologique)...).

***Nota Bene:** La problématique du stockage du CO₂ dans les péridotites des ophiolites est encadrée par deux contraintes incontournables: l'épaisseur des nappes et leur structure thermique. En l'absence de toute mesure des gradients géothermiques (flux de chaleur) et de données géophysiques mettant en évidence les discontinuités géologiques, les ordres de grandeurs suivants permettent de cadrer les conditions du stockage. Pour une nappe de 5 km d'épaisseur, la température à la base de la nappe (au contact de la semelle métamorphique et de l'autochtone) est de 100°C pour un gradient thermique de 20°C/km. Ceci indique que, dans ce cas, la nappe*

entière se trouve dans le domaine de stabilité d'une biosphère profonde et que les processus de carbonatation ne sont pas uniquement inorganiques. D'un autre point de vue, les mesures des vitesses de précipitation des carbonates et de l'altération du substrat ultrabasique indiquent que des températures élevées, c'est-à-dire supérieures à 150°C, créent des conditions favorables au stockage minéral du CO₂. Or, de telles températures ne seront atteintes qu'à grande profondeur, au-delà de 5 km pour un gradient thermique de 30°C/km, valeur déjà élevée. On voit donc que l'efficacité du stockage géologique du CO₂ dans les formations de péridotites terrestres dépend de l'optimisation de paramètres concurrents: d'un côté conditions de températures élevées (supérieures à 150°C) pour favoriser les cinétiques des réactions de carbonatations, ce qui implique des forages profonds, donc coûteux, d'un autre limitation des conditions de température du stockage (en dessous de 150°C) liées à l'épaisseur des formations ultrabasiques, ce qui implique de prendre en compte le rôle d'une biosphère adaptée aux milieux hyperalcalins caractéristiques des environnements liés à la serpentinisation, biosphère encore largement inconnue à la fois dans ses caractéristiques et dans son interaction avec le monde minéral.

2- Des travaux de modélisations numériques : pour calibrer les données caractéristiques nécessaires à la mise en place d'un des scénarios proposés, à savoir principalement, la perméabilité, la porosité, les vitesses de migration verticale et horizontale, ainsi que la cinétique de réaction et de colmatage. En fonctionnant sur des géométries simples et en utilisant les données locales ou analogues à la géologie considérée à partir de la littérature scientifique, une première évaluation de la possibilité des différents scénarios pourra être proposée et discutée.

3- Des mesures des paramètres caractéristiques de transport réactif sur échantillons: en travaillant sur des carottes prélevées sur chacun des sites, un ensemble de tests sur bancs de percolation reproduisant les conditions thermodynamiques et hydrodynamiques est nécessaire pour évaluer l'évolution des propriétés du milieu pendant l'injection. Associée à un travail précis d'analyse chimique des fluides et des phases solides (ex : spectrométrie de masse, microscopie électronique), pétrographique (ex : Spectrométrie Raman) et d'imagerie des microstructures (ex : micro-tomographie à rayons X), ces mesures sont essentielles dans un premier temps pour déterminer les mécanismes (encore peu décrits) mis en jeu, puis pour fournir les données nécessaires aux modèles numériques et valider leurs résultats. En particulier il est indispensable de mesurer les propriétés qui contrôlent les vitesses de percolation (perméabilité (relative),

porosité), la redistribution des solutés (dispersivité) et la réactivité du milieu pendant la minéralisation (production de carbonates) du CO₂. De telles mesures de laboratoires permettent de quantifier les effets en retour des processus de dissolution et précipitation sur les propriétés hydrodynamiques du réservoir et ainsi de vérifier, en particulier, la capacité d'injection à long terme. Ces expériences permettent aussi de tester l'influence de la procédure d'injection (ex: injection continue versus cyclique) ainsi que des méthodes de réhabilitation mécaniques ou chimiques de la perméabilité en cas de blocage du système. Enfin, il est possible à partir de ces expériences de quantifier les effets des gaz résiduels pour minimiser les coûts de purification du CO₂ injecté et encore de tester des procédures qui devront être appliquée lors de l'abandon du stockage et de tester le comportement de traceurs qui pourraient être utilisés pour la détection de fuite. Ces travaux de laboratoires sont donc essentiels non-seulement pour analyser la faisabilité du stockage et dimensionner les opérations, mais aussi dans le cadre de l'analyse des risques. Ils peuvent réalisés sur les péridotites, les basaltes et les roches sédimentaires. Afin de reproduire au mieux les conditions, en particulier de débit, la durée d'une expérience de ce type peut-être de plusieurs dizaines de jours.

Le coût total de réalisation de ces travaux de laboratoires, dans le cadre d'une étude exhaustive permettant d'aborder les différents aspects mentionnés ci-dessus, est estimé entre 230 et 260 K€. La durée de l'étude sera de 18 à 24 mois suivant le type de réservoir ciblé. Il faut noter que très peu de laboratoires peuvent réaliser ces expériences (coût élevé des équipements et expertise spécifique), par contre il n'y a pas de verrous technologiques majeurs.

4- Des travaux d'études environnementales et sociétales: pour apporter plus d'information sur les écosystèmes marins et terrestres existants, et sur les échanges bassins – lagon, mais aussi pour évaluer la perception de la population dans la démarche de l'implantation d'un site. A partir de ces données, le besoin d'exclure certaines zones du territoire pourra être établi avec plus de précision.

Les tâches de la PHASE A – PROGRAMME 1 proposées dans le cahier des charges associé à cette étude (**Annexe A**) correspondent à la mise en œuvre de ces études avec un budget indicatif associé. A partir de ces nouveaux éléments techniques un éclairage plus important des données de terrain permettra de mieux appréhender le problème et donc de fournir un avis plus

tranché sur le scénario envisagé comme le plus adapté. Cette décision doit être prise de façon collégiale et concertée avec les autorités et bien sûr les opérateurs miniers concernés.

CONCLUSIONS

Le présent rapport a été élaboré dans le cadre du projet d'étude « Stockage géologique de CO₂ in-situ » en Nouvelle-Calédonie financé par le Centre National de Recherches Technique Nickel & son environnement. Il présente une synthèse des connaissances sur la géologie profonde et de surface des différentes formations de Nouvelle-Calédonie. Cette synthèse s'est appuyée sur les expertises du Service Géologique de la NC et du BRGM, ainsi que sur les bases de données du SGNC. Les données sur les formations géologiques à terre (Bassin de Nouméa et Bourail) et en mer (lagon et domaine profond) ont été compilées, avec une attention particulière sur la Grande Terre et sur les régions des usines métallurgiques.

Le bassin sédimentaire de Bourail pourrait contenir une structure de réservoir, de couverture et de piège, éléments favorables au stockage du CO₂. La présence de récifs coralliens et la sensibilité du public à l'installation d'équipements sous-marins rend la solution de stockage dans le domaine lagunaire peu envisageable. Concernant le domaine off-shore profond, même si des données de sismiques et de forage de bonne qualité existent, la connaissance 3D des géométries et de la nature des formations géologiques n'est actuellement pas suffisante pour proposer un scénario de stockage géologique de CO₂. D'autre part la localisation des sites et leur éloignement des usines de production entraîneraient un surcoût conséquent lié au transport.

La séquestration minérale in situ dans les basaltes et les péridotites peut être envisagée en Nouvelle-Calédonie puisque i) une importante unité de basaltes (unité de Poya ou nappe des basaltes) jalonne la moitié nord de la côte ouest de la Grande Terre, et ii) elle possède un des plus grand massif de péridotites au monde (Massif du Sud). Avec ce contexte géologique et les sites d'émission de CO₂, la Nouvelle-Calédonie réunit toutes les conditions pour mettre en place un site pilote collaboratif, comparable à celui de *Hellisheidi* en Islande. D'autre part, la séquestration minéralogique in-situ dans les péridotites est l'option de stockage la plus séduisante au niveau recherche et expérimentation. Les recherches dans ce domaine en sont à un stade de maturité, mais si ce procédé s'avère fiable et efficace, la Nouvelle-Calédonie sera par son contexte géologique au

premier rang mondial pour en bénéficier. L'opération pourrait même être très rentable vu les capacités de stockage (de l'ordre d'un Gt par an) mise en évidence par l'Université de Columbia dans les péridotites d'Oman qui sont comparables à celles de la Nouvelle-Calédonie. Un projet pilote de séquestration de CO₂ dans les péridotites de la Grande Terre serait donc une occasion unique pour valoriser une fois de plus le contexte géologique de la Nouvelle-Calédonie, mais aussi pour apporter un nouveau site expérimental (le troisième au monde en séquestration minéralogique in-situ, et le premier dans des péridotites) aux réseaux de recherche internationaux.

Un cahier des charges est proposé en annexe A pour évaluer les coûts associés pour les phases exploratoires (acquisition de données, tests à l'échelle d'un pilote, ...) et des ordres de grandeurs sur les phases industrielles (injection à l'échelle commerciale) dont les coûts dépendront fortement des options prises (lieu, profondeur et nombre de forages, pureté requise du CO₂, protocole d'injection, système de surveillance requis, etc...) après analyse des résultats de la phase exploratoire. Le financement des phases amont, qui concerne une part non négligeable de recherche fondamentale, pourrait être proposé aux programmes ANR avec un appui financier du CNRT et des groupes miniers dont les installations industrielles sont localisées à proximité d'affleurements de basaltes (KNS) ou de péridotites (Vale NC). Vu l'intérêt que porte les Provinces Nord et Sud aux problèmes environnementaux, cette solution devrait fortement intéresser la centrale de Koniambo qui pourrait intégrer captage et stockage de CO₂. A noter que le groupe Glencore (ex-Xstrata) est partenaire du CO₂CRC australien (*Otway Pilot Project*), et donc déjà impliqué dans les recherches sur le stockage de CO₂.

Cependant, de cette première synthèse il apparaît clairement un déficit global de connaissance de la géologie en profondeur, à terre comme en mer, et des systèmes hydrogéologiques de profondeur ou de la proche surface pour évaluer le potentiel de stockage de CO₂ en Nouvelle-Calédonie et les risques et impacts associés. Cette déficience est principalement due à la très faible quantité de données disponibles. Il semble donc nécessaire de mener à bien un programme de recherche focalisé sur des aspects géologiques régionaux (du type de l'appel à projet lancé par le CNRT en 2013 sur la structuration de l'ophiolite) mais aussi d'acquisition de données fondamentales, comme par exemple la réactivité des péridotites sous forte pression de CO₂. Cela concerne : i) la nature et la géométrie des formations en profondeur (à l'aplomb des sites émetteurs), ii) les propriétés d'écoulement et les connections hydrogéologiques entre les objets considérés (réservoirs, surface) afin de quantifier les capacités, les impacts et les risques associés,

et de pouvoir élaborer un projet d'étude de stockage de CO₂. Parmi ces actions sont proposées l'acquisition de données gravimétriques, des profils de réflexions et réfractions sismiques, le forage de puits d'observation carottés dans les différentes zones d'intérêt permettant la mise en place de log et l'analyse sur carotte de la géologie locale en fonction de la profondeur, ainsi qu'un ensemble de test sur forages et échantillons pour apporter une meilleure connaissance des circulations profondes d'un système aussi complexe.

La mise en place d'un programme de recherche adapté et d'un démonstrateur sera donc nécessaire pour l'étude de faisabilité et le développement de ces techniques en Nouvelle-Calédonie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alt J.C. and Teagle D.A.H. (1999) The uptake of carbon during alteration of ocean crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**, 1527-1535.
- Amend J.P., McCollom T.M., Hentscher M. and Bach. W (2011) Metabolic Energy for Chemolithoautotrophs in Peridotite-Hosted and Basalt-Hosted Hydrothermal Systems. *Geochim. Cosmochim Acta* , **75**, 5736-5748.
- Andreani M., Luquot L., Gouze P., Godard M., Hoise E. and Gibert B. (2009) Experimental study of carbon sequestration reactions controlled by the percolation of CO₂-rich brine through peridotites. *Envir. Sci. Technol.* **43**, 1226-1231.
- Andreani M., Daniel I. and Pollet-Villard M. (2013) Aluminium speeds up the hydrothermal alteration of olivine. *American Mineralogist*, **98**, 1738-1744.
- Arnórsson S. and Gunnlaugsson E. (1985) New gas geothermometers for geothermal exploration - calibration and application. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 1307-1325.
- Bach W., Garrido C.J., Harvey J., Paulick H. and Rosner M. (2004) Variable seawater–peridotite interactions —first insights from ODP Leg 209, MAR 15°N. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **5**, Q09F26.
- Bachu S, Gunter W.D. and Perkins E.H. (1994) Aquifer disposal of CO₂: hydrodynamic and mineral trapping. *Energy Conversion and Management*, **35**(4), 269-279.
- Barnes I. and O'Neil J. R. (1969) The relationship between fluids in some fresh Alpine-type ultramafics and possible modern serpentinization, *West. United States Geol. Soc. Bull.*, **80**, 1947-1960.
- Béarat H., McKelvy M.J., Chizmeshya A.V.G., Gormley D., Nunez R., Carpenter R.W., Squires K. and Wolf G.H. (2006) Carbon sequestration via aqueous olivine mineral carbonation: role of passivating layer formation. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 4802-4808.
- Beinlich A. and Austrheim H. (2012) In situ sequestration of atmospheric CO₂ at low temperature and surface cracking of serpentinized peridotite in mine shafts. *Chem. Geol.*, **332–333**, 32–44.
- Beinlich A., Austrheim H., Glodny J., Erambert M. and Andersen T.B. (2010) CO₂ sequestration and extreme Mg depletion in serpentinized peridotite clasts from the Devonian Solund basin, SW-Norway. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 6935–6964.

- Bénézeth P., Saldi G., Dandurand J.L. and Schott J. (2011) Experimental determination of the solubility product of magnesite at 50 to 200°C. *Chem. Geol.*, **286**, 21-31.
- Bénézeth P., Stefánsson A., Quentin Gautier and Schott J. (2013a) Mineral solubility and aqueous speciation under hydrothermal conditions to 300°C – The carbonate system as an example. *In Rev. Min. Geochem*, **76** (Eds, Stefánsson Andri, Driesner Thomas, Bénézeth Pascale; ISSN 1529-6466, Mineralogical Society of America, Virginia, Jodi J. Rosso Series Editor), 81-133.
- Bénézeth P. Chen J., Qafoku O., Schaef H.T., Thompson C.J., Pearce C., Felmy A.R., Bonneville A., Rosso K.M. and Loring J.S. (2013b) In situ IR spectroscopic study of forsterite carbonation in wet-scCO₂. *Mineralogical Magazine*, **77**, p. 685.
- Bertil D., Lemoine A., Rey J., Auclair S., Dominique P., avec la collaboration de Winter Th. (2008) Évaluation probabiliste de l'aléa sismique de la Nouvelle-Calédonie. *Rapport BRGM/RP-54935-FR*, 137p.
- Bleuzen A., Pittet P.A., Helm L. and Merbach A.E. (1997). Water exchange on Magnesium(II) in aqueous solution: A variable temperature and pressure ¹⁷O NMR study. *Magn. Res. Chem.*, **35**, 765–773.
- Boschi C., Dini A., Dallai L., Ruggieri G. and Gianelli G. (2009) Enhanced CO₂-mineral sequestration by cyclic hydraulic fracturing and Si-rich fluid infiltration into serpentinites at Malentrata (Tuscany, Italy). *Chem. Geol.*, **265**, 209–226.
- Cabioch G., Montaggioni L., Thouveny N., Frank N., Sato T., Chazottes V., Dalamasso H., Payri C., Pichon M., Sémah A.M. (2008) The chronology and structure of the western New Caledonian barrier reef tracts. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.* **268**, 91–105.
- Chavagnac V., Ceuleneer G., Monnin C., Lansac B., Hoareau G. and Boulart C. (2013a) Mineralogical assemblages forming at hyperalkaline warm springs hosted on ultramafic rocks: A case study of Oman and Ligurian ophiolites. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **14**, 2474-2495.
- Chavagnac V., Monnin C., Ceuleneer G., Hoareau G. and Boulart C. (2013b) Characterization of hyperalkaline fluids produced by low-temperature serpentinization of mantle peridotites in the Oman and Ligurian ophiolites. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **14**, 2496–2522.

- Cluzel D., Maurizot P., Collot J. and Sevin B. (2012) An outline of the Geology of New Caledonia ; from Permian – Mesozoic Southeast Gondwanaland active margin to Cenozoic obduction and supergene. *Episodes*, **35**, 72–86.
- Cluzel D., Meffre S., Maurizot P. and Crawford A.J. (2006) Earliest Eocene (53 Ma) convergence in the Southwest Pacific: evidence from pre-obduction dikes in the ophiolite of New Caledonia. *Terra Nova*, **18**, 6, 395–402.
- Collot J. Y., P. Rigolot F. and Missègue (1988) Geologic structure of the northern New Caledonia Ridge, as inferred from magnetic and gravity anomalies. *Tectonics*, **7**(5), 991–1013.
- Collot J. (2009) Evolution géodynamique du domaine Ouest-offshore de la Nouvelle-Calédonie et de ses extensions vers la Nouvelle-Zélande, 290 pp, *Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, Brest / Noumea*.
- Collot, J., R. H. Herzer Y. Lafoy and L. Géli (2009), Mesozoic history of the Fairway - Aotea Basin: implications regarding the early stages of Gondwana fragmentation. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**(Q12019), doi: 10.1029/2009GC002612.
- Collot J., Lafoy Y. and Géli L. (2011) Explanatory notes of the structural provinces of the southwest Pacific, Geological Survey of New Caledonia - *DIMENC, IFREMER, version 1*, 1-40.
- Coudray J. (1971) Nouvelles données sur la nature et l'origine du complexe récifal côtier de la Nouvelle-Calédonie. *Quaternary Research*, **1**, 236-246.
- Cox M.E., Launay J. and Paris J.P. (1982) Geochemistry of low temperature geothermal systems in New Caledonia, Pacific Geothermal Conference. *University of Auckland, Auckland*, pp. 453-459.
- Daval D., Hellmann R., Corvisier J., Tisserand D., Martinez I. and Guyot F. (2010) Dissolution kinetics of diopside as a function of solution saturation state: Macroscopic measurements and implications for modeling of geological storage of CO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta* **74**, 2615-2633.
- Daval D., Sissmann O., Menguy N., Saldi G. D., Guyot F., Martinez I., Corvisier J., Garcia B., Machouk I. and Knauss K. G. (2011) Influence of amorphous silica layer formation on the dissolution rate of olivine at 90°C and elevated pCO₂. *Chem. Geol.*, **284**, 193-209.

- Dessert C., Dupré B., Gaillardet J., Francois L. M. and Allégre C. J. (2003) Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chem. Geol.*, **202**, 257-273.
- Dewandel B. (2002) *Structure et fonctionnement hydrogéologique d'un aquifère discontinu: l'ophiolite d'Oman*. PhD thesis, University of Montpellier II; Montpellier, France 650 pp.
- Dewandel B., Lachassagne P. and Qatan A. (2004) Spatial measurements of stream baseflow, a relevant method for aquifer characterization and permeability evaluation. Application to a hard-rock aquifer, the Oman ophiolite. *Hydrol. Process.* **18**, 3391–3400 (2004).
- Dufaud F., Martinez I. and Shilobreeva S. (2009) Experimental study of Mg-rich silicates carbonation at 400 and 500 °C and 1 kbar. *Chem. Geol.*, **265**, 79–87.
- Dupraz S., Fabbri A., Joulian C., Dictor M-C , Battaglia-Brunet F., Ménez B., Crouzet C., Henry B. and Garrido F. (2013) Impact of CO₂ concentration on autotrophic metabolisms and carbon fate in saline aquifers – A case study. *Geochim. Cosmochim. Acta* **119**, 61-76 (2013).
- Edwards K.J., Bach W. and McCollom T.M. (2005) Geomicrobiology in oceanography: microbe–mineral interactions at and below the seafloor- Trends. *Microbiol.*, **13**, 449.
- Espirat J.J. (1967) Étude hydrogéologique de la Côte ouest de la Nouvelle-Calédonie. Rapport d'ensemble sur les travaux effectués par le BRGM de 1962 à 1967. *Rapport BRGM*, pp. 1-178.
- Felmy A.R., Qafoku O., Arey B.W., Hu J.Z., Hu M., Schaef H.T., Ilton E.S., Hess N.J., Pearce C.I., Feng J. and Rosso K.M. (2012) Reaction of water-saturated supercritical CO₂ with forsterite: Evidence for magnesite formation at low temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **91**, 271-282.
- Flaathen T.K., Oelkers E.H. and Gislason S.R. (2010) The effect of aqueous sulphate on basaltic glass dissolution rates. *Chem. Geol.*, **277**, 345-354
- Galeczka I., Wolff-Boenisch D., Oelkers E.H. and Gislason S.R. (2014) An experimental study of basaltic glass–H₂O–CO₂ interaction at 22 and 50 °C: Implications for subsurface storage of CO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **126**, 123-145.
- Garcia B., Beaumont V., Perfetti E., Rouchon V., Blanchet D., Oger P., Dromart G., Huc A-Y. and Haeseler F. (2010) Experiments and geochemical modeling of CO₂ sequestration by olivine: potential, quantification. *Appl Geochem.*, **25**, 1383-1396.

- Gautier Q., Saldi G.D., Bénézech P., Oelkers E. and Schott J. (2009) Effects of organic ligands on magnesite precipitation rates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, p A419.
- Gautier Q., Jordan G., Bénézech P. and Schott J. (2010) Influence of organic ligands on the crystal growth of magnesite (MgCO₃): Mechanistic aspects and implications for the mineral sequestration of CO₂. *AGU, Fall meeting 2010, abstract GC31B-0880*.
- Gautier Q. (2012) Cinétiques de précipitation de minéraux carbonatés magnésiens, influence de ligands organiques, et conséquences pour la séquestration minérale du CO₂. *PhD Dissertation, Université Paris-Est, France*, 269 pp. (in French).
- Gerdemann S.J., O'Connor W.K., Dahlin D.C., Penner L.R. and Rush H. (2007) Ex situ aqueous mineral carbonation. *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 2587-2593.
- Giammar D.E., Bruant R.G. and Peters C.A. (2005) Forsterite dissolution and magnesite precipitation at conditions relevant for deep saline aquifer storage and sequestration of carbon dioxide. *Chem. Geol.*, **217**, 257-276.
- Gilfillan S.M.V., Lollar B.S., Holland G., Blagburn D., Stevens S., Schoell M., Cassidy M., Ding Z., Zhou Z., Lacrampe-Coulombe G. and Ballentine C.J. (2009) Solubility trapping in formation water as dominant CO₂ sink in natural gas fields. *Nature*, **458**, 614-618.
- Gislason S. R., Oelkers E. H. and Snorrason Á. (2006) The role of river suspended material in the global carbon cycle. *Geology* **34**, 49–52.
- Gislason S.R., Wolf-Boenisch D., Stefansson A., Oelkers E.H., Gunnlaugsson E., Sigurdardottir H., Sigfusson N., Broecker W.S., Matter J.M., Stute M., Axelsson G. and Fridriksson T. (2010). Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: a pre-injection overview of the Carbfix project. *Intern. J. Greenhouse Gas Contr.*, **4**, 537-545.
- Gislason S.R. and Oelkers E.H. (2014) Carbon storage in basalt. *Science*, **344**(6182), 373-374.
- Gourry J.C., Baltassat J.M. and Maurizot P. (2010) Détection de la serpentinite sur les pistes de Nouvelle-Calédonie par électro-magnétométrie. Faisabilité complémentaire in situ. *BRGM/RP-58774-FR*. 171 p.
- Gudmundsson B. and Arnórsson S. (2002) Geochemical monitoring of the Krafla and Námafjall geothermal areas, N-Iceland. *Geothermics*, **31**, 195-243.
- Guyot F., Daval D., Dupraz S., Martinez I., Ménez B. and Sissmann O. (2011) CO₂ geological storage: the environmental mineralogy perspective. *CR Geosci.*, **343**, 246–259.

- Gysi A. P. and Stefánsson A. (2012a) CO₂-water-basalt interaction. Low temperature experiments and implications for CO₂ sequestration into basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **80**, 129–152.
- Gysi A. P. and Stefánsson A. (2012b) Mineralogical aspects of CO₂ sequestration during hydrothermal basalt alteration - An experimental study at 75 to 250°C and elevated pCO₂. *Chem. Geol.*, **306-307**, 146–159.
- Hanchen M., Prigiobbe V., Storti G., Seward T.M. and Mazzotti M. (2006) Dissolution kinetics of fosteritic olivine at 90–150° C including effects of the presence of CO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70** 4403-4416.
- Hansen L.D., Dipple G.M., Gordon T.M. and Kellett D.A. (2005) Carbonated serpentinite (listwanite) at Atlin, British Columbia: a geological analogue to carbon dioxide sequestration. *Canad. Mineral.*, **43**, 225–239.
- Hickey Hannah. (n.d.). Big Sky partnership to bury greenhouse gas in lava rock. Idaho National Laboratory. Retrieved November 11, 2009 (<http://www.inl.gov/featurestories/2005-11-16.shtml>)
- Holloway S. (2001) Storage of fossil fuel-derived carbon dioxide beneath the surface of the earth. *Annual Reviews of Energy and the Environment*, **26**, 145–166 p.
- Humphris S.E. and Tivey M.K. (2000) A synthesis of geological and geochemical investigations of the TAG hydrothermal field: insights into fluid flow and mixing process in a hydrothermal system. In *GSA Memoir/Special Publication on Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*, ed. Y Dilek, E Moores, D Elthon, A Nicholas. Boulder, CO: Geol. Soc. Am. 552 pp.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds.) Pachauri, R.K., Reisinger, A. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Jeanpert J. (2013a) Analyse préliminaire des données hydrogéologiques du massif du Koniambo. *Rapport BRGM RP-61765-FR*.
- Jeanpert J. (2013b) Structure et fonctionnement hydrogéologiques des péridotites de Nouvelle-Calédonie: Etude du massif de Koniambo. Oral. 20 Juin 2013, Poindimié. <http://nouvelle-caledonie.ird.fr/toute-l-actualite/colloques/recherches-scientifiques-en-province-nord.-juin-2013/session-geosciences-projets-en-demarrage-ou-reflexion>.

- Jeanpert J. and Maurizot P. (2012) Essai de quantification de la structuration et de la dissolution associée dans les péridotites - Compte-rendu de la mission de terrain dans le secteur de Goro (massif du Sud) - Projet HYPERK. SGNC - BRGM.
- Kaszuba J., Yardley B.W.D., Andreani M. (2013) Experimental Perspectives of Mineral Dissolution and Precipitation due to Carbon Dioxide-Water-Rock Interactions. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **77**, 153-188.
- Kelemen P. and Matter J. (2008) In-situ carbonation of peridotite for CO₂ storage, *PNAS* **105**, 17295-17300.
- Kelemen P.B., Matter J., Streit E.E., Rudge J.F., Curry W.B. and Blusztajn J. (2011) Rates and Mechanisms of Mineral Carbonation in Peridotite: Natural Processes and Recipes for Enhanced, in situ CO₂ Capture and Storage. In: *Jeanloz, R., Freeman, K.H. (Eds.), Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol 39. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 545-576.*
- Kelley D.S., Karson J. A., Fruh-Green G. L. and Yoerger D. R. (2005) A serpentinite hosted ecosystem: the Lost City hydrothermal field. *Science*, **307**, 1418.
- Kelley D.S., Karson J.A., Blackman D.K., Fruh-Green G.L., Butterfield D.A., Lilley M.D., Olson E.J., Schrenk M.O., Roe K.K., Lebon G.T. and Rivizzigno P. (2001) An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30 degrees N. *Nature* **412**, 145-149.
- King H.E., Plümper O. and Putnis A. (2010) Effect of secondary phase formation on the carbonation of olivine. *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 6503–6509.
- Klingelhoefer F., Cosquer E, Collot J., Lafoy Y., Nouze H. and Vially R. (2007) Crustal structure of the basin and ridge system west of New Caledonia (southwest Pacific) from wide angle and reflection seismic data. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, **112**, No B11, 2007, Art. B11102, American Geophysical Union.
- Kopp H., Weinzierl W., Becel A., Charvis P., Evain M., Flueh E.R., Gailler A., Galve A., Hirn, A., Kandilarov A., Klaeschen D., Laigle M., Papenberg C., Planert L. and Roux E., (2011). Deep structure of the central Lesser Antilles Island Arc: Relevance for the formation of continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* **304**, 121-134.

- Kwak J.H., Hu J.Z., Turcu R.V.F., Rosso K.M., Ilton E.S., Wang C., Sears J.A., Engelhard M.H., Felmy A.R. and Hoyt D.W. (2011) The role of H₂O in the carbonation of forsterite in supercritical CO₂. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **5**, 1081–1092.
- Lafoy Y. (1994) The sedimentary basins of the New Caledonia region: *Special Publication of the European Association of Petroleum Geoscientists*, **4**, p. 427-429.
- Lafoy Y. (1994) Tectonique compressive cénozoïque sur les rides de Fairway et Lord Howe, entre Nouvelle-Calédonie et Australie: *CR. Acad. Sci.*, **319**, 1063-1069.
- Lafoy Y., Auzende J.M., Missegue F. and Van de Beuque S. (1996) Bilan des connaissances sur l'évaluation du potentiel pétrolier de la Nouvelle-Calédonie et de ses dépendances. Partenaires: Etat, Territoire et Provinces de Nouvelle-Calédonie, Ifremer, Orstom, SHOM, UFP.
- Lafoy Y., Van de Beuque S., Missegue F., Nercessian A. and Bernadel G. (1998) Campagne de sismique multitrace entre la marge Est Australienne et le Sud de l'arc des Nouvelles-Hébrides - *Rapport de la campagne RIG SEISMIC 206 (21 avril - 24 mai 1998) - Programme FAUST*. 1-40.
- Lafoy et al. (2004) Rapport de mission de la campagne ZONECO 11.
- Lafoy Y., Brodien I Vially R. and Exon N.F (2005) Structure of the basin and ridge system west of New Caledonia (Southwest Pacific): A synthesis. *Marine Geophys. Res.*, **26**, 37-50.
- Lagabrielle Y., Maurizot P., Lafoy Y., Cabioch G., Pelletier B., Régnier M., Wabete I. and Calmant S. (2005) Post-Eocene extensional tectonics in Southern New-Caledonia (SW Pacific): Insights from onshore fault analysis and offshore seismic data. *Tectonophys.*, **403**, 1-28.
- Larentzos J.P. and Criscenti L.J. (2008). A molecular dynamics study of alkaline earth metal-chloride complexation in aqueous solution. *J. Phys. Chem. B*, **112**, 14243–14250.
- Launay J. and Fontes J.C. (1985) Les sources thermales de Prony (Nouvelle-Calédonie) et leurs précipités chimiques. Exemple de formation de brucite primaire. *Géologie de la France* **1**, 83-100.
- Le Bars, Y., Faugère, E., Menanteau, Ph., Multon, B., Riedacker, A., Velut, S., « *L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie – Energy in the development of New Caledonia* », IRD Editions, Collection Expertise collégiale, 472 p.

- le Campion P., Ménez B., Trias R., Gislason S.R., Alfredsson H.A, Mesfin K.G., Snabjornsdottir S.O., Sigurdardottir H., Aradottir E.S., Gérard E. High reactivity of deep biota under anthropogenic CO₂ injections into basalts; submitted to *Nature*, June 2014 .
- Ledoux E., Cojean R. and Schmitt J.M. (2007) Expertise sur le projet de stockage des résidus solides dans la vallée de la Kwé Ouest de l'usine Goro Nickel. *Rapport technique n° R070731ELED*, Centre de Géosciences, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France.
- Loring J.S., Thompson C.J., Wang Z., Joly A.G., Sklarew D.S., Schaef H.T., Ilton E.S., Rosso K.M., Felmy A.R. (2011) In situ infrared spectroscopic study of forsterite carbonation in wet supercritical CO₂. *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 6204–6210.
- Le Roy P., Cabioch G., Monod B., Lagabrielle, Y., Pelletier B. and Flamand (2008) Late Quaternary history of the Nouméa lagoon (New Caledonia, South West Pacific) as depicted by seismic stratigraphy and multibeam bathymetry. A modern model of tropical rimmed shelf. *Palaeogeol., Palaeoclim., Palaeoecol.*, **270**, 29-45.
- Ludwig K.A., Kelley D.S., Butterfield D.A., Nelson B.K. and Fruh-Green G. (2006) Formation and evolution of carbonate chimneys at the Lost City Hydrothermal Field. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 3625-3645.
- Luquot L. and Gouze P. (2009) Experimental determination of porosity and permeability changes induced by massive injection of CO₂ into carbonate reservoirs. *Chem. Geol.*, **265**, 148–159.
- Luquot L., Andreani M., Gouze P. and Camps P. (2012) CO₂ percolation experiment through chlorite/zeolite-rich sandstone (Pretty Hill Formation – Otway Basin–Australia). *Chem. Geol.*, **294-295**, 75–88.
- Matter J. M., Takahashi T. and Goldberg D. (2007) Experimental evaluation of in situ CO₂-water-rock reactions during CO₂ injection in basaltic rocks: Implications for geological CO₂ sequestration. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **8**, 1-19.
- Matter J.M. and Kelemen P.B. (2010) Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation. *Nature Geosc.*, **2**, 837-841.
- Matter J.M., Broecker W.S., Gislason S.R., Gunnlaugsson E., Oelkers E.H., Stute M., Sigurdardottir H. Wolf-Boenisch D. Stefansson A., Alfredsson H.A., Aradottir E.E., Axelsson G., and Sigfusson N. (2011). The CarbFix project-Storing carbon dioxide in basalt. *Energy Procedia*, **4**, 5579-5585.

- Maurizot P. and Gasc P. (1986) Carte géologique et d'aptitude à l'aménagement de la zone urbaine de Nouméa à l'échelle du 25 000. Territoire de la Nouvelle-Calédonie - *BRGM*, 1–45.
- Maurizot P., Lafoy Y. and Poupée M. (2002) Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain en Nouvelle-Calédonie - Zone du Koniambo, *Rapport BRGM 51 623 FR*.
- Maurizot P. (2005) Valorisation et validation du sondage de référence Cadart 1. *Rapport BRGM RP - 54 118 – FR*.
- Maurizot P. (2007) Cartographie d'aide à l'aménagement dans la zone Voh - Koné - Pouembout - Poya. Phase 1: Mise à jour de la carte géologique sur les communes de Koné et Pouembout et bilan des données existantes. *Rapport BRGM 54 898 FR*.
- Maurizot P, Cluzel D, (2014). Pre-obduction records of Eocene foreland basins in central New Caledonia; an appraisal from surface geology and Cadart-1 borehole data. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 57, 300-311.
- McGrail P.B., Schaef H.T., Ho A.M., Chien Y.-J., Dooley J.J. and Davidson C.L. (2006) Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **111**, 1-13.
- McGrail P.B., Spane F.A., Sullivan E.C., Bacon D.H. and Hund G. (2011) The Wallula Basalt Sequestration Pilot Project. *Energy Procedia*, **4**, 5653-5660.
- McCullom T.M. and Bach W. (2009) Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 856-879.
- Ménez B., Dupraz S., Gérard E., Guyot F., Rommevaux-Jestin C., Libert M., Jullien M., Michel C., Delorme F., Battaglia-Brunet F., Ignatiadis I., Garcia B., Blanchet D., Huc A.Y., Haesler F., Oger P., Dromart G., Ollivier B. and Magot M. (2007) Impact of the deep biosphere on CO₂ storage performance. *Geotechn. Sci. Rep.*, **9**, 150-163.
- Monger J.W.H. and Price R.A. (1979) Geodynamic evolution of the Canadian Cordillera - progress and problems. *Can. J. Earth Sci.*, **16**, 770-791.
- Monnin C., Chavagnac V., Boulart C., Ménez B., Gérard M., Gérard E., Pisapia C., Quéméneur M., Erauso G., Postec A., Guentas-Dombrowski L., Payri C. and Pelletier B. (2014). Fluid chemistry of the low temperature hyperalkaline hydrothermal system of Prony bay (New Caledonia). *Biogeosc.*, 11, 5687-5706.

- Montaggioni L., Cabioch G., Thouveny N., Frank N., Sato T. and Semah A.M. (2011) Revisiting the Quaternary development history of the western New Caledonian shelf system: From ramp to barrier reef. *Marine Geology*, **280**, 57-75.
- Morozova D., Zettlitzer M., Leta D. and Würdemann H. (2011) Monitoring of the microbial community composition in deep subsurface saline aquifers during CO₂ storage in Ketzin, Germany. *Energy Procedia* **4**, 4362–4370 (2011).
- Nasir S., Al Sayigh A.R., Al Harthy A., Al-Khirbash S., Al-Jaaldi O., Musllam A., Al-Mishwat A. and Al-Bu'saidi S. (2007) Mineralogical and geochemical characterization of listwaenite from the Semail Ophiolite, Oman. *Chemie der Erde — Geochemistry*, **67**, 213–228.
- O'Connor W.K., Dahlin D.C., Rush G.E., Dahlin C.L. and Collins W.K. (2001) Carbon dioxide sequestration by direct mineral carbonation: process mineralogy of feed and products. *Min. Metallurg. Proc.*, **19**, 95-101.
- O'Connor, W.K., Dahlin D.C., Rush G.E., Gerdemann S.J. and Nilsen D.N. (2004) *Final report: aqueous mineral carbonation. Albany Research Center, Albany, OR.*
- Oelkers E. H., Gislason S. R. and Matter J. (2008) Mineral carbonation of CO₂. *Elements*, **4**, 333–337.
- Park AHA, Jadhav R, Fan LS (2003). CO₂ mineral sequestration: chemically enhanced aqueous carbonation of serpentine. *Canad. J. Chem. Engin.*, **81**, 885–890.
- Pelletier B. and Chevillon C., (2006) Morphologies sous-marines particulières et constructions chimiques et biologiques dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie : les aiguilles hydrothermales de la baie du Prony et les monticules d'huîtres du banc Gail. *Abstract book, Congrès Biodec, Nouméa (New Caledonia)*, pp. 84-85.
- Pelletier B., Chevillon C., Menou J.L., Butscher J., Folcher E., Geoffray C., Bore J.M., Panché J.Y. and Perrier J. (2006) Plongées, forage et cartographie Baie du Prony et Banc Gail, lagon Sud de Nouvelle-Calédonie, N.O. ALIS, 13-17 juin 2004 et cartographie baie du Prony N.O. ALIS, 25-26 septembre 2005, Rapports de missions, *Sci. Terre, Geol-Geophys - IRD Nouméa*, p. 44.
- Pelletier B., Juffroy F., Perrier J. and Panch J.-Y. (2013) Bathymétrie des marges de la Grande-Terre en province Nord: des données de base indispensables à de nombreux programmes. *Séminaire Activités en Province Nord, 19-21 juin 2013.*

- Peuble S., Andreani M., Godard M., Gouze P., Barou F., Van de Moortele B., Mainprice D., Reynard B. (2014) Carbonate mineralization in percolated olivine aggregates: Linking effects of crystallographic orientation and fluid flow. *Amer. Min. In press (09/2014)*.
- Peuble S., Godard M., Luquot L., Gouze P. and Martinez I. CO₂ geological storage in olivine rich basaltic aquifers: New Insights from flow-through experiments. *Applied Geochemistry (In review)*.
- Pisapia C., Gerard E., Gerard M. and Menez B. (2013) Organomineralization drives early chimney edification at the hyperalkaline hydrothermal field of the Prony Bay (New Caledonia), *Goldschmidt Conference*, Florence (Italy).
- Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Bénézech P., Schott J. and Golubev S.V. (2009) Effect of organic ligands and heterotrophic bacteria on wollastonite dissolution kinetics. *Amer. J. Sci.*, **309**, 731-772.
- Postec A., Quéméneur M., Bes M., Meil N., Benaïssa F., Payri C., Pelletier B., Monnin C., Dombrowsky L., Ollivier B., Gérard E., Pisapia C., Gérard M., Ménez B., Erauso G., submitted. Microbial Communities in a Serpentinite-Hosted Ecosystem: the Prony Hydrothermal Field, New Caledonia. PLOS ONE.
- Prigobbe V., Costa G., Baciocchi R., Hänchen M. and Mazzotti M. (2009). The effect of and salinity on olivine dissolution kinetics at salinity at 120°C. *Chem. Engin. Sci.*, **64**, 3510–3515.
- Quéméneur M., Bes M., Postec A., Meil N., Hamelin J., Monnin C., Chavagnac V., Payri C., Pelletier B., Donbrowski L., Gérard M., Pisapia C., Gérard E., Ménez B., Ollivier B., Erauso G., submitted. Spatial distribution of microbial communities in the shallow submarine alkaline hydrothermal field of the Prony Bay, New Caledonia. *Environ. Microbiol. Reports*, doi:10.1111/1758-2229.12184.
- Ragnheidardottir E., Sigurdardottir H., Kristjansdottir H., and Harvey W. (2011) Opportunities and challenges for CarbFix: An evaluation of capacities and costs for the pilot scale mineralization sequestration project at Hellisheidi, Iceland and beyond. *Int. J. Greenh. Gas Cont.*, **5**, 1065-1072.
- Riedacker A. (coord.), Baby Patrice, Couteron P., Most J.M. (2010). Les émissions et les réductions d'émissions de GES en Nouvelle-Calédonie (2010). In : Le Bars Y. (coord.), Faugère E. (coord.), Menanteau P. (coord.), Multon B. (coord.), Riedacker A. (coord.),

- Velut S. (coord.) *L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie = Energy in the development of New Caledonia*. Marseille: IRD, 2010, p. 230-335. (Expertise Collégiale).
- Rosenbauer R. J., Koksalan T., Palandri J. L. (2005) Experimental investigation of CO₂-brine-rock interactions at elevated temperature and pressure: Implications for CO₂ sequestration in deep-saline aquifers. *Fuel Proc. Techn.*, **86**, 1581-1597. ISSN 0378-3820.
- Rosenbauer R. J., Thomas B., Bischoff J. L. and Palandri J. (2012) Carbon sequestration via reaction with basaltic rocks : Geochemical modeling and experimental results. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **89**, 116–133.
- Sader J.A., Leybourne M.I., McClenaghan B. and Hamilton M.S. (2007) Low-temperature serpentinization processes and kimberlite groundwater signatures in the Kirkland Lake and Lake Timiskiming kimberlite fields, Ontario, Canada: implications for diamond exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* **7**, 3-21.
- Saldi G.D., Jordan G., Schott J. and Oelkers E.H. (2009) Magnesite growth rates as a function of temperature and saturation state. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 5646-5657.
- Saldi G.D., Schott J., Pokrovsky O.S., Gautier Q. and Oelkers E.H. (2012) An experimental study of magnesite precipitation rates at neutral to alkaline conditions and 100 to 200°C as a function of pH, aqueous solution composition and chemical affinity. *Geochim. Cosmochim. Acta* **83**, 93-109
- Schaef H., McGrail B. and Owen A. (2009) Basalt-CO₂-H₂O interactions and variability in carbonate mineralization rates. *Energy Procedia*, **1**, 4899–4906.
- Schaef H.T., McGrail B.P., Loring J.S., Bowden M.E., Arey B.W., Rosso K.M. (2013) Forsterite [Mg₂SiO₄] carbonation in wet supercritical CO₂: An in situ high pressure X-ray diffraction study. *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 6204–6210.
- Schuite J. (2013) Modélisation des propriétés de transport des péridotites fracturées de Nouvelle-Calédonie (Sud-Ouest Pacifique). Université Montpellier 2, 53 p.
- Shirokova L.S., Bénézech P., Pokrovsky O.S., Gérard E., Ménez B. and Alfredsson H. (2012a) Effect of the heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* on olivine dissolution kinetics and implications for CO₂ storage in basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **80**, 30-50.

- Sissmann O. (2013) Séquestration minérale du CO₂ dans les basaltes et les roches ultrabasiques: impact des phases secondaires silicatées sur le processus de carbonatation. *Thèse de doctorat, IPGP, Paris.*
- Sutherland R., Viskovic P., Bache F., Stagpoole V., Collot J., Rouillard P., Hashimoto T., Hackney R., Higgins K., Rollet N., Patriat M. and Roest, W.R (2012) Compilation of seismic reflection data from the Tasman Frontier region, southwest Pacific, *GNS Science Report* 2012/01. 72 p.
- Steeffel C.I., DePaolo D.J. and Lichtner P.C. (2005) Reactive transport modeling: An essential tool and a new research approach for the Earth sciences. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **240**, 539-558.
- Stockmann G.J., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Bénézech P., Bovet N., Gislason S.R. and Oelkers E.H. (2012) Does the presence of heterotrophic bacterium *Pseudomonas reactans* affect basaltic glass dissolution rates? *Chem. Geol.*, **296-297**, 1-18.
- Thinon I., Audigane P., Augé T. and Maurizot P. (2013) – Listing de données : projet stockage géologique de CO₂ en Nouvelle-Calédonie. Rapport intermédiaire. *BRGM/RP-63135-FR*, p. 44, 2014.
- Trias R., Gérard E., le Campion P., Gislason S.R., Aradóttir E.S., Alfredsson H.A, Mesfin K.G., Snabjornsdottir S.O. and Ménez B. (2014a) The N cycle in Earth subsurface. Reactivity of functional genes to anthropogenic CO₂ injections. *EGU2014-11901*.
- Trias R., Ménez B., Aradóttir E.S., Gunnarsson I., Gíslason S.R. and Gérard, E. (2014b) The deleterious impact of endemic microbial communities on basalt porosity following CO₂-H₂S injections in the subsurface. *To be submitted to Nature Geosciences*.
- Vale Inco Nouvelle-Calédonie (2009). Verse à stérile de la Kué Est (VSKE). Note préliminaire. Impacts hydrogéologiques.
- Velut S. (coord.), Baby Patrice, Riedacker A. (2010). L'insertion internationale de la Nouvelle-Calédonie (2010). In : Le Bars Y. (coord.), Faugère E. (coord.), Menanteau P. (coord.), Multon B. (coord.), Riedacker A. (coord.), Velut S. (coord.) *L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie = Energy in the development of New Caledonia*. Marseille : IRD, 2010, p. 336-402. (Expertise Collégiale).
- Vially R., Benard F. and Cluzel D. (1999) Potentiel pétrolier de l'offshore de Nouvelle-Calédonie, Rapport régional d'évaluation pétrolière – offshore Nouvelle-Calédonie (1999) – IFP.

- Vially R. and Lafoy Y. (2005) Principales conclusions sur le potentiel pétrolier des bassins de Nouvelle-Calédonie et de Fairway à la lumière des résultats de la campagne ZoNéCo 11. *Rapport IFP n°58 668*.
- Vially R. and Lafoy Y. (2008) Synthèse du potentiel pétrolier de la Nouvelle-Calédonie. – *Rapport IFP et programme ZONECO*.
- Wandrey M., Pellizari L., Zettlitzer M. and Würdemann H. (2011) Microbial community and inorganic fluid analysis during CO₂ storage within the frame of CO₂ sink-longterm experiments under in situ conditions. *Energy Procedia* **4**, 3651–3657 (2011).
- West J. M., McKinley I.G., Palumbo-Roe B. and Rochelle C.A. (2011) Potential impact of CO₂ storage on subsurface microbial ecosystems and implications for groundwater quality. *Energy Procedia* **4** (0), 3163-3170 (2011).
- Wolff-Boenisch D., Gislason S. R., and Oelkers E. H. (2006) The effect of crystallinity on dissolution rates and CO₂ consumption capacity of silicates. *Geochim. Cosmochim. Acta* **70**, 858–870.
- Xu T., Apps J.A. and Pruess K. (2004) Numerical simulation of CO₂ disposal by mineral trapping in deep aquifers. *Appl. Geochem.*, **19**, 917–936.
- Xu T., Spycher N., Sonnenthal E., Zhang G., Zheng L. and Pruess, K. (2011). TOUGHREACT Version 2.0: A simulator for subsurface reactive transport under non-isothermal multiphase flow conditions. *Computers & Geosciences*, **37**, 763-774.
- Zevenhoven R., Fagerlund J. and Songok J. K. (2011). CO₂ mineral sequestration: developments toward large scale application. *Greenh. Gas. Sci. Techn.*, **1**, 48–57.

CARTES

- Collot J., Vende-Leclerc M., Rouillard P., Lafoy Y. and Géli L. (2011) Map of the structural provinces of the southwest Pacific, Geological Survey of New Caledonia - DIMENC, IFREMER, version 1.
- Laurent E. (2011) Carte de l'imagerie acoustique des fonds marins de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie, Geological Survey of New Caledonia - DIMENC, Agence des Aires Marines Protégées, ZoNéCo, version 1.
- Laurent E., Rouillard P., Collot J. and Gardes L. (2011) Carte morphosédimentaire des fonds marins de la ZEE de la Nouvelle-Calédonie, Geological Survey of New Caledonia - DIMENC, Agence des Aires Marines Protégées, ZoNéCo, version 1.
- Maurizot P. (1986) Carte géologique et d'aptitude à l'aménagement de la zone urbaine de Nouméa à l'échelle du 1 / 25 000. Territoire de la Nouvelle-Calédonie – BRGM.
- Sevin B., Maurizot P. and Vendé-Leclerc M. (2012) Carte Géologique du Grand-Sud de Nouvelle-Calédonie au 1 / 50 000. Service Géologique de Nouvelle-Calédonie - Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

ANNEXES

Annexe A

Projet CNRT-CO2 Cahier des charges Programme des travaux scientifiques et techniques

1. INTRODUCTION

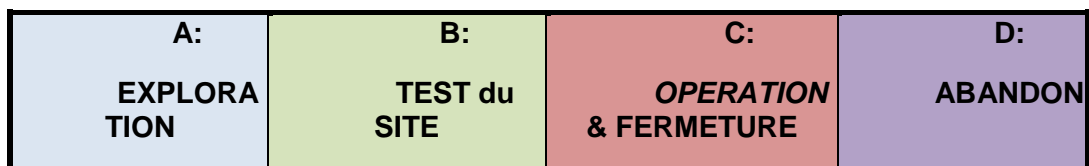
Chacune des solutions présentées dans la section V-2 du rapport (page 78-83) engendrent une mobilisation financière conséquente. Les coûts exacts sont difficiles à établir car ils dépendent de facteurs économiques difficiles à anticiper pour les années futures, ainsi que de facteurs logistiques liés à position géographique particulière de la Nouvelle Calédonie. Néanmoins, il est possible de réaliser un cahier des charges précis décliné en quatre phases Exploration – Opération – Fermeture – Abandon, et d'en estimer les coûts respectifs, à ce jour, pour un site pilote sur le sol français. Ces informations sont mises à disposition ici dans un cahier des charges avec une estimation détaillée pour les phases exploratoires (acquisition de données, tests à l'échelle d'un pilote, ...) et des ordres de grandeurs sur les phases industrielles (injection à l'échelle commerciale) dont les coûts dépendront fortement des options prises (lieu, profondeur et nombre de forages, pureté requise du CO₂, protocole d'injection, système de surveillance requis, etc) après analyse des résultats de la phase exploratoire.

Ce cahier des charges a pour objet d'apporter une feuille de route comme requis par le contrat avec le CNRT, accompagné d'un budget des différentes tâches préconisées et permet de visualiser à la fois à court et long terme les différentes étapes nécessaires à la mise en place d'un site pilote (indépendamment du scénario choisi).

Le programme de recherche, de développement et de démonstration (R&D) détaillé ci-après décrit les différentes étapes qu'il sera nécessaire de réaliser afin d'évaluer la faisabilité et les capacités d'un stockage de CO₂.

2. LES PHASES DU PROGRAMME

Les quatre étapes principales de la vie d'un stockage sont les suivantes :



Pour chacune de ces étapes, des recherches, études et travaux sont nécessaires. Le programme de travail concerné par l'appel CNRT consiste à fournir une évaluation des coûts des études à mener ainsi qu'un ensemble de tests de validations permettant de décider la mise en place ou de l'arrêt de ces phases. Dans le présent document nous évaluons les phases A et B en détail avec un ensemble de tâches à réaliser. La poursuite des phases C et D dépendent grandement des résultats obtenus pour les phases précédentes.

Ce document est proposé comme base de discussions pour de potentiels appels d'offres futurs du CNRT (ou autres organismes de financements) dédiés à la mise en place d'un site de stockage géologique de CO₂ en Nouvelle-Calédonie. Ce document n'aborde pas les phases de capture et transport nécessaire à la mise en place d'un site.

2.1 PHASE « EXPLORATION »

La phase "Exploration" regroupe l'ensemble des activités liées à la qualification d'un site de stockage. Elle conduit à la mise en place d'une demande de permis d'exploration. Il est donc primordial de s'assurer auprès des autorités locales (et du code minier appliqué) qu'aucune contrainte particulière pourrait s'opposer à la mise en place d'un permis d'exploration. Cette demande de permis demande la préparation d'un dossier constitué des éléments présentés ci-dessous.

2.1.1 Préparation du dossier de demande d'un « permis d'exploration »

1. sélection des formations géologiques, disponibles pour le projet :
 - a. carte géologique de la zone d'étude
 - b. collections de données existantes : sismiques, forages (log, diagraphie)
 - c. complément de données si besoin pour améliorer les connaissances: liste ci-dessous non exhaustive et adaptée selon les cas.
 - i. campagne de terrain + mesure géophysique en surface pour estimer les corps à l'aplomb de la zone investiguée (les usines et ou autre dans notre cas)
 - ii. campagne de sismique 2D et 3D
 - iii. campagne de forage d'exploration
2. sélection de sites: en fonction de plusieurs scénarios on évalue les critères suivant pour choisir le site :
 - a. contraintes environnementales « externes » (zones naturelles protégées);
 - b. contraintes environnementales « internes » (risques naturels et ressources naturelles protégées) ;
 - c. contraintes réglementaires (permis exclusifs);
 - d. évaluation des capacités de stockage efficaces disponibles (au sens du Carbon Sequestration Leadership Forum, cf. Bachu et al., 2007²), c'est-à-dire évaluation du volume de pore disponible diminué du coefficient de saturation irréductible.
3. qualification du site: une fois le site défini les différentes étapes de caractérisation suivantes sont à effectuer:
 - a. caractérisation du site
 - i. composition du gaz à stocker
 - ii. modèle statique du réservoir (géométrie du réservoir : caractérisation fine du réservoir et de ses hétérogénéités, de sa couverture, du réseau de faille)

² Bachu, S.; Bonijoly D., Bradshaw J., et al., "CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps" International Journal of Greenhouse Gas Control 1 (2007) 430–443.

- iii. caractéristiques des roches réservoir et roches de couverture : description pétrophysique du réservoir et de sa couverture, propriétés capillaires des couvertures
- b. simulation de l'injection, dimensionnement et localisation des injecteurs
 - i. simulation du comportement hydrodynamique, thermique
 - ii. prévision du champ de pression du réservoir et évolution dans le temps
 - iii. processus géochimiques mis en œuvre et induits; transferts réactifs; simulations hydrauliques, thermiques, géochimiques et mécaniques des interactions du CO₂ avec l'eau du réservoir et la roche pendant la phase d'injection (comportement court et moyen terme « proche-puits »)
 - iv. gestion du développement du panache et contrôle de pression (éventuellement extraction d'eau), stratégie d'injection (éventuellement injections pulsées), dimensionnement et positionnement des ouvrages
- c. impact du CO₂ injecté:
 - i. impacts dues aux modifications du champ de pression
 - ii. migrations gravitaires du CO₂ libre (phase gazeuse)
 - iii. migrations gravitaires du CO₂ dissout
 - iv. quantification des déplacements de masses d'eau et impacts sur les déplacements des gradients de salinité, des gradients de pression, les charges hydrauliques, impacts sur les exploitations existantes (stockages de gaz, champs producteurs d'hydrocarbures, captages d'eau potable), impacts sur les recharges naturelles des aquifères
 - v. simulations hydrauliques, thermiques, géochimiques et mécaniques des interactions du CO₂ avec l'eau du réservoir et la roche après l'arrêt de l'injection (comportement long terme)
 - vi. identification des voies de fuites possibles (puits abandonnés, failles, perte de la qualité de la couverture), des systèmes de confinement secondaires, construction de scénarios de risque de fuite.
- d. étude de sensibilité:

des simulations multiples devront être réalisées pour déterminer la sensibilité de l'évaluation aux hypothèses posées concernant certains paramètres. Les simulations seront réalisées en faisant varier les paramètres dans le ou les modèles géologiques statiques et en modifiant les fonctions du débit et les hypothèses s'y rapportant lors de modélisation dynamique. Une sensibilité appréciable devra être prise en compte dans l'évaluation des risques.
- e. Analyse de risque :

Développer une activité telle que le stockage de CO₂ dans le sous-sol nécessite de déterminer des **critères de sécurité** qui puisse garantir des impacts négligeables pour:

 - la sécurité et la santé humaine,
 - l'environnement
 - et les ressources souterraines.

Au regard des risques identifiés, on déterminera les méthodes de surveillance les plus appropriées. Elles constitueront le **plan de surveillance**.

Enfin, pour chacun de ces risques, des propositions d'**actions de remédiation** seront formalisées.

Par ailleurs, la directive ETS-MRG de juillet 2008 propose un certain nombre de règles et recommandations aux fins de contrôler les éventuelles fuites

tout au long du processus de captage, transport et stockage géologique du CO₂.

L'ensemble des études décrit ci-dessus, sera réalisé sur la base des données existantes qu'il sera nécessaire de récupérer et de valoriser (lignes sismiques, dossiers de forage, carottes). Elles permettront également de réaliser une **étude de danger** et de fournir les éléments techniques à la **consultation** qui devra être organisée auprès **du public**.

Toutes les études seront mises en forme afin de constituer le dossier pour l'obtention du **permis d'exploration**. Elles permettront en particulier de déterminer les différentes emprises définies dans les textes existants : « **site de stockage**³ » et « **complexe de stockage**⁴ (cf Fig. A1) ».

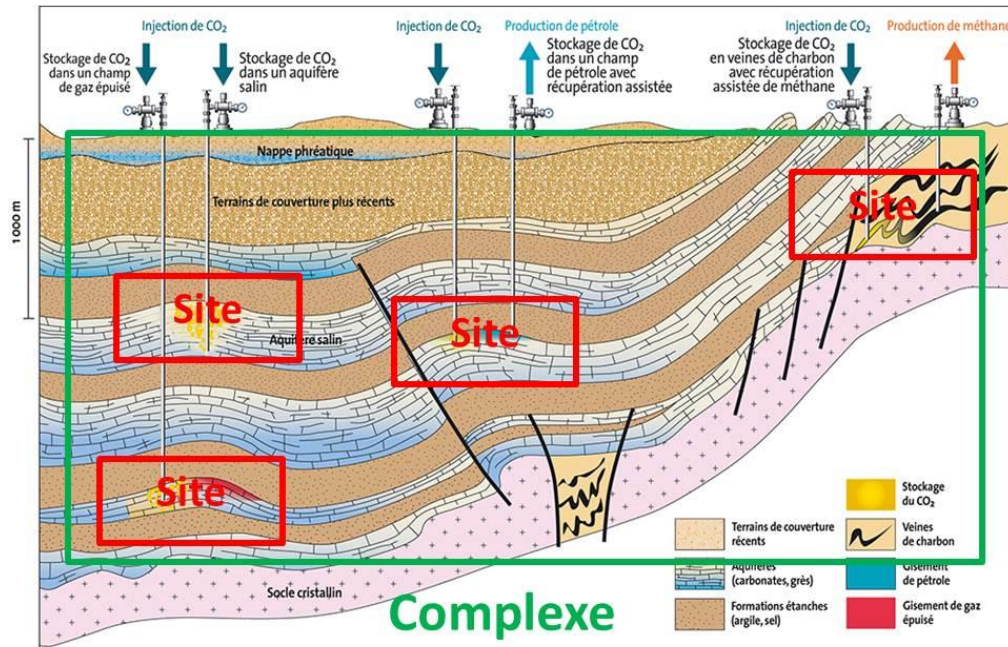


Figure A1. Complexe et sites de stockage de CO₂

2.1.2 Permis d'exploration

Si, à l'issue de l'enquête publique et de l'instruction du dossier par les services compétents, le permis d'exploration est attribué, alors les études réalisées lors de la phase précédente permettront de :

- concevoir et dimensionner le démonstrateur de recherche pour le stockage de CO₂ (pilote d'injection),
- rédiger les cahiers des charges « Travaux » nécessaires à la consultation des entreprises.

³ "Site de stockage", une zone définie au sein d'une formation géologique utilisée pour le stockage géologique du CO₂ et les installations de surface et d'injection qui y sont associées.

⁴ «Complexe de stockage», le site de stockage et les domaines géologiques environnants qui sont susceptibles d'influer sur l'intégrité et la sécurité globales du stockage (c'est-à-dire les formations de confinement secondaires)

L'étape suivante consistera en l'approvisionnement des équipements nécessaires à la réalisation du démonstrateur. Enfin la mise en service des équipements permettra de tester la fiabilité des simulations du comportement du stockage.

2.1.3 Conception du démonstrateur « Stockage »

- Cahier des charges « Prospection par sismique réflexion 2D »

On concevra, sur la base de la zone géographique correspondant au « **complexe de stockage** », une campagne de sismique réflexion haute résolution 2D (plan de position, paramètres d'acquisition...), qui devra compléter les données disponibles si existantes. Elle sera accompagnée de la réalisation de forages courts (carottage VT) permettant l'amélioration sensible du calcul des corrections statiques. Le chiffre proposé dans le chapitre 3 correspond à l'hypothèse la plus défavorable pour laquelle aucune donnée ancienne ne pourrait être récupérée sur le complexe de stockage choisi.

- Cahier des charges « Prospection par sismique réflexion 3D »

On concevra sur la base de la zone géographique correspondant au "**site de stockage**", une campagne de sismique réflexion haute résolution 3D. Cette campagne permettra une meilleure définition du site, avec une résolution latérale qui pourra être de l'ordre de quelques dizaines de mètres (exemple maille finale de 25mx25m). Du fait du dispositif d'acquisition en 3D, il y aura contribution de l'information dans toutes les directions (multi azimut), ce qui permettra d'éviter les conflits dus aux données qui pourraient être hors plan lors d'acquisition 2D. Une meilleure image en résultera.

- Cahier des charges « Etat initial de la teneur en gaz des sols » (cas on-shore)

Pour le site de stockage, on concevra le cahier des charges d'une campagne de mesures des gaz des sols permettant d'établir un état initial de la teneur en gaz dans les sols.

- Cahier des charges « Forages »

En fonction des résultats des études de phase A, on établira le cahier des charges des travaux de forages. Le démonstrateur de recherche comprendra deux forages, l'un destiné à l'injection, le second à l'observation des événements associés à l'injection. Un tel dispositif permettra de suivre l'évolution des variations de pression au puits d'injection et à une distance suffisante de l'injecteur, et des modifications physiques et chimiques induites par le CO₂ injecté sur le réservoir, la couverture et l'aquifère de contrôle.

- Cahier des charges « Diagraphies »

Des diagraphies différées seront enregistrées dans chacun des forages. Chacun des paramètres à enregistrer sera justifié au regard des travaux de recherches devant démontrer la faisabilité de l'injection et la maîtrise de la sécurité de l'opération.

- Cahier des charges « Tests en forage et prélèvements »

Toutes les opérations à réaliser pendant et après la réalisation du forage (carottages, tests d'injection et de production, techniques de prélèvement, localisation, fréquence et quantité des

matières solides ou liquides à prélever) seront conçues et formalisées afin de fournir les données les plus pertinentes et les matériaux les mieux adaptés aux modélisations qui accompagneront la phase de test.

- *Demande d'autorisation de travaux*

Tant pour les travaux d'exploration par sismique réflexion que pour les travaux de forage, il sera nécessaire d'établir des dossiers de demande d'autorisation de travaux.

- *Contrats fournisseurs*

Ces contrats seront établis par le BRGM (Assistance à Maîtrise d'ouvrage) ou le Maître d'œuvre, pour le compte du Maître d'ouvrage du projet (VALE).

2.1.4 Réalisation des travaux d'exploration

La réalisation des travaux d'exploration et, en particulier, la réalisation des forages, nécessite l'obtention d'une autorisation de travaux. La confirmation des caractéristiques favorables des réservoirs visés pour la réalisation du pilote de recherche sera obtenue grâce à la réalisation d'une campagne sismique 2D et la réalisation d'un forage d'exploration.

- *Campagne de sismique réflexion 2D*

La campagne de sismique réflexion 2D comprendra les phases suivantes:

- **Permitting:** demande des autorisations de passage et d'implantation de la campagne sismique auprès des collectivités locales et des particuliers. Mise en place d'une convention entre la société qui acquière les données sismiques et les propriétaires des terrains empruntés, visant au dédommagement de ces derniers. Expertise des lieux avant acquisition et après acquisition pour le dédommagement. Procédure d'information auprès des autorités locales et de la population. Recueillir les informations sur l'implantation des réseaux électriques, téléphoniques, de gaz, etc.
- **Acquisition:** implantation du dispositif des géophones le long de lignes. Quand les lignes sont définitivement implantées, passage des camions vibrateurs ou bateaux. Déplacement au fur et à mesure des lignes géophones au cours de l'acquisition. A la fin de l'acquisition, équipe de ramassage des matériels (panneaux signalétiques, etc.). Rapport d'acquisition.
- **Traitement** avec option PSTM (Pré Stack Time Migration) migration temps avant stack, ce traitement permet, une meilleure définition des structures qui pourraient être mieux imagées. Un calage aux puits lors du traitement sera proposé afin de mieux caler les horizons. Une attention particulière sera portée à la définition de la séquence de traitement ainsi qu'aux corrections statiques.
- **Interprétation sismique**
- **Rapport** d'acquisition et de traitement.

- *Forage d'exploration*

Le forage d'exploration permettra d'acquérir les échantillons nécessaires (par carottage) à la qualification du site et plus particulièrement aux caractéristiques du réservoir visé et de sa

couverture. Il permettra également d'obtenir, par les enregistrements diagrapiques dont il fera l'objet, les informations nécessaires à la caractérisation de la série sédimentaire recoupée ainsi qu'au calage des enregistrements sismiques afin d'en améliorer le traitement et l'interprétation. Ces travaux seront réalisés par des sociétés spécialisées (supervision forage, forage, diagrapies, prélèvements). Ils nécessiteront la mise à disposition des terrains pour l'installation des plates-formes (génie civil plate-forme, bourbier, installation rig et bâtiments). Destiné à devenir le futur forage d'observation, une complétion spécifique peut être envisagée pour surveiller d'éventuels aquifères stratégiques immédiatement sus-jacents au réservoir retenu pour tester le stockage. On rappelle que la réalisation de cet ouvrage nécessitera la maîtrise du foncier sur lequel devront être réalisés les travaux d'aménagement de la plate-forme et l'installation de la machine de forage.

2.1.5 Demande de permis pour la réalisation d'une « opération pilote de stockage de dioxyde de carbone »

Sur la base des résultats acquis, un dossier de demande d'autorisation d'injecter le CO₂ sera déposé auprès des autorités compétentes. Ce dossier sera conforme aux obligations décrites dans la section 5 du Code de l'Environnement, section rajoutée au chapitre IX du titre II du livre II du code de l'environnement (loi Grenelle 2), relatif aux demandes de permis pour la réalisation d'opération pilote de stockage de dioxyde de carbone. Par ailleurs, on se propose de le compléter conformément aux obligations décrites dans le projet de Directive sur le stockage géologique du CO₂. En effet, cette précaution permettra d'évaluer l'adéquation de la directive au regard des réalités du terrain. Il sera donc constitué des pièces suivantes:

- Renseignements généraux relatifs au projet (cf. article 7, directive Stockage géologique du CO₂)
- Programme de travaux de forage et d'injection
- Plan de contrôle et de surveillance,
- Plan de mesures correctives,
- Conditions de fermeture,
- Plan de post-fermeture,
- Plan de consultation et d'information du public

Une demande d'autorisation de travaux sera également nécessaire pour la réalisation des programmes de travaux décrits dans ce qui suit.

2.2. PHASE B « OPERATION »

Si, à l'issue de l'enquête publique et l'instruction par les services compétents, le permis de réaliser une opération pilote de stockage de CO₂ est attribué et l'autorisation de travaux est acquise, alors les travaux suivant pourront être engagés.

2.2.1 Campagne de sismique réflexion 3D

La campagne de sismique réflexion 3D sera centrée sur le puits d'injection. Elle couvrira un bloc de 10x10 km afin d'imager la totalité du « complexe de stockage », zone pouvant être impactée par le panache de CO₂ supercritique. Elle comprendra les phases suivantes:

- **Permitting:** demande des autorisations de passage et d'implantation de la campagne sismique auprès des collectivités locales et des particuliers. Mise en place d'une

convention entre la société qui acquière les données sismiques et les propriétaires des terrains empruntés, visant au dédommagement de ces derniers. Expertise des lieux avant et après acquisition pour le dédommagement. Procédure d'information auprès des autorités locales et de la population. Recueillir les informations sur l'implantation des réseaux électriques, téléphoniques, de gaz, etc.

- **Acquisition:**
 - o **On shore** : implantation du dispositif des géophones par andain (swath), après le permitting. Quand les andains sont définitivement implantés, passage des camions vibrateurs. Déplacement au fur et à mesure des andains au cours de l'acquisition. A la fin de l'acquisition, équipe de ramassage des matériels (panneaux signalétiques, etc.). Rapport d'acquisition.
 - o **Off shore:** Les travaux offshore nécessitent d'avoir une bathymétrie très haute résolution de bonne qualité sur le site d'étude (Lidar pour la tranche -20m – 10m), ainsi qu'une imagerie acoustique du fond marin. Le type de sismique marine sera choisi en fonction de la bathymétrie d'investigation. Un maillage dense de lignes sismiques très haute résolution devra être acquis. Les données sismiques Très Haute Résolution (faible tranche d'eau) ne permettront pas de fournir des informations sur la géométrie des couches géologiques au-delà de 100m de profondeur. Il faudra évaluer l'apport de la sismique réfraction et de la sismique réflexion grand angle ou de type conventionnel (basse fréquence).
- **Traitement** avec option PSTM (Pré Stack Time Migration) migration temps avant stack, ce traitement permet, une meilleure définition des structures. Le forage d'exploration réalisé au cours de la phase précédente permettra un calage lors du traitement afin de mieux caler les horizons. Une attention particulière sera portée à la définition de la séquence de traitement ainsi qu'aux corrections statiques.
- **Interprétation sismique**
- **Rapport**

2.2.2 Acquisition des terrains

La réalisation du forage d'injection nécessitera l'acquisition, par VALE Inco, des droits d'usage de la parcelle sur laquelle le forage d'injection sera réalisé, ou pour le moins de l'autorisation des propriétaires. Cette parcelle pourra être éloignée de celle utilisée pour la réalisation du forage d'exploration. La distance entre les deux puits sera déterminée à la suite des simulations d'injection mises à jour après la réalisation du forage d'exploration.

2.2.3 Réalisation des travaux de forage

Ces travaux seront réalisés par des sociétés spécialisées (supervision forage, forage, diagraphies, prélèvements). Ils nécessiteront la mise à disposition des terrains pour l'installation des plates-formes (génie civil plate-forme, bournier, installation rig et bâtiments). Deux forages devraient être réalisés, un destiné à l'injection du CO₂, l'autre à la surveillance des modifications associées à l'injection de CO₂ dans le réservoir. Une complétion spécifique devra permettre de surveiller les possibles aquifères stratégiques immédiatement sus-jacents au réservoir retenu pour tester le stockage.

2.2.4 Acquisition des équipements du démonstrateur

Seront approvisionnés tous les matériels nécessaires à la construction du démonstrateur: têtes de puits spécifiques, pompes, réchauffeurs, stockage tampons, ...

2.2.5 Campagne d'injection

L'injection du CO₂ doit être planifiée sur une période jugée suffisante pour démontrer la faisabilité du stockage sur le site retenu (1 à 3 ans). Les quantités de CO₂ injectés devront être limitées (~100.000 t) afin de circonscrire l'expérimentation dans le cadre des pilotes de recherche tels que définis dans le cadre de la directive européenne relative au stockage géologique du CO₂. Le rythme de l'injection dépendra pour beaucoup de cette disponibilité et devrait permettre de tester différentes configurations (injection par pulse ou en continu)

La décision de poursuivre l'expérimentation au-delà de cette période dépendra des résultats acquis dans le cadre de ce programme. Sa poursuite nécessitera probablement une nouvelle autorisation soit dans le cadre du Grenelle 2 (si celui-ci est encore applicable après 2014), soit dans le cadre de la transposition en droit français de la directive européenne sur le stockage géologique du CO₂.

2.2.6 Valorisation des matériaux recueillis lors des travaux d'exploration et de forage.

Les travaux de recherche prévus pour cette phase de travaux sont destinés à confirmer les caractéristiques favorables du site choisi.

- Programme d'études sur prélèvements et mesures en forages:
 - Description géologique des carottes
 - Suivi des tests hydrauliques (tests de production en puits)
 - Propriétés physico-chimiques de la roche couverture
 - Propriétés physico-chimiques des roches réservoir
 - Propriétés géomécaniques des roches réservoir et de couverture
 - Composition chimique des aquifères (aquifère hôte et aquifère de contrôle) et teneur en gaz dissout.

- Programme d'études des processus dynamique par simulation des conditions d'injection en laboratoire:

En travaillant sur des carottes prélevées sur chacun des sites, un ensemble de tests sur bancs de percolation reproduisant les conditions thermodynamiques et hydrodynamiques est nécessaire pour évaluer l'évolution des propriétés du milieu pendant l'injection. Associée à un travail précis d'analyse chimique des fluides et des phases solides (ex : spectrométrie de masse, microscopie électronique), pétrographique (ex: Spectrométrie Raman) et d'imagerie des microstructures (ex : micro-tomographie à rayons X), ces mesures sont essentielles dans un premier temps pour déterminer les mécanismes (encore peu décrits) mis en jeu, puis pour fournir les données nécessaires aux modèles numériques et valider leurs résultats. En particulier il est indispensable de mesurer les propriétés qui contrôlent les vitesses de percolation (perméabilité (relative), porosité), la redistribution des solutés (dispersivité) et la réactivité du milieu pendant la minéralisation (production de carbonates) du CO₂. De telles mesures de laboratoires permettent de quantifier les effets en retour des processus de dissolution et précipitation sur les propriétés hydrodynamiques du réservoir et ainsi de vérifier, en particulier, la capacité d'injection à long terme. Ces expériences permettent aussi de tester l'influence de la procédure d'injection (ex: injection continue versus cyclique) ainsi que des méthodes de réhabilitation mécaniques ou chimiques de la perméabilité en cas de blocage du système. Enfin il est possible à partir de ces expériences de quantifier les effets des gaz résiduels pour minimiser les coûts de purification du CO₂ injecté et encore de tester des procédures qui devront être appliquées lors de l'abandon du

stockage et de tester le comportement de traceurs qui pourraient être utilisés pour la détection de fuite. Ces travaux de laboratoires sont donc essentiels non-seulement pour analyser la faisabilité du stockage et dimensionner les opérations, mais aussi dans le cadre de l'analyse des risques. Ces travaux peuvent être réalisés sur les péridotites, les basaltes et les roches sédimentaires.

- Programme de mesures en surface de l'état initial :

- *Mesure des gaz des sols*
- *Ecoute sismique*
- *Champ gravimétrique*
- *Champ électrique*
- *Interférométrie radar*

L'ensemble des données acquises au cours de toutes les phases préliminaires au test d'injection (sismique réflexion, mesure des gaz des sols, caractérisations physico-chimiques et mécaniques des roches, champ de potentiel, activité sismique, réflectométrie radar), contribueront à établir ***l'état initial du site*** à partir duquel les évolutions éventuelles seront analysées pendant et après le test d'injection.

2.2.7 Travaux de surveillance de l'injection test

Le programme de surveillance de l'injection test (100.000 ou 500.000 t en fonction de la réglementation applicable) comprendra:

- suivi chimique de l'aquifère au puits d'observation
- suivi de la pression au puits d'injection et au puits d'observation
- monitoring sismique en puits (PSO-PSV)
- tomographie électrique entre puits
- surveillance micro-gravimétrique en surface
- écoute micro-sismique
- interférométrie radar sur réflecteurs persistants.

Cette surveillance sera réalisée à une fréquence variable en fonction des techniques mises en œuvre. Celle-ci pourront être continues (chimie, écoute sismique), mensuelles, trimestrielles (gaz des sols, mesures électriques), semestrielles (microgravimétrie, interférométrie) ou annuelles (sismique).

2.2.8 Valorisation des campagnes de surveillance

Les objectifs des travaux de recherche proposés devront permettre de:

- surveiller le développement du panache de CO₂ depuis la surface par la mise en œuvre de méthodes indirectes,
- surveiller d'éventuelles modifications de la chimie de l'aquifère immédiatement sus-jacent,
- surveiller les variations des teneurs en gaz des sols,
- identifier d'éventuelles déformations liées à l'injection du CO₂ – déformations sismiques par rupture ou asismiques par gonflement

- caractériser les propriétés PVT du fluide injecté (CO₂ + gaz annexes) afin de préciser la température et la pression dans le puits et à l'entrée du réservoir,
- étudier la réactivité du ciment de complétion du puits d'injection vis-à-vis du fluide injecté mais aussi de la saumure porale acidifiée par solubilisation du fluide injecté,
- étudier les interfaces puits-ciment et le point triple puits-ciment couverture/réservoir
- étudier les phénomènes d'assèchement et leurs conséquences pétrophysiques,
- étudier le comportement (mobilité et réactivité) des particules fines (exogènes et endogènes) pour les réservoirs silico-clastiques,
- étudier des effets de l'imbibition et du retour de la vapeur d'eau dans la zone à CO₂(sc) (solubilisation de l'eau par le solvant CO₂(sc)).

2.2.9 Intégration des résultats

Sur la base des études réalisées et décrites ci-dessus, des modélisations couplées permettront de rendre compte du comportement du test d'injection réalisé dans le cadre du démonstrateur de recherche, et de simuler le comportement injecté dans le sous-sol à court, moyen et long terme.

2.3. PHASE C – EXPLOITATION DU STOCKAGE - DEMONSTRATION SEMI-INDUSTRIELLE

Si les conclusions de ces études étaient favorables, alors une demande de permis de stockage pourrait être demandée sur la base d'un dossier qui devra comprendre, conformément à l'article 9 du projet de directive sur le stockage géologique du CO₂:

- 1) le nom et l'adresse de l'exploitant;
- 2) l'emplacement et la délimitation précis du site de stockage et du complexe de stockage, **et des éléments d'information relatifs à l'unité hydraulique;**
- 3) **les conditions à remplir pour l'opération de stockage**, la quantité totale de CO₂ dont le stockage géologique est autorisé, **les limites de pression du réservoir** et les débits **et pressions** d'injection maximaux;
- 4) les exigences concernant la composition du flux de CO₂ et la procédure d'acceptation du CO₂ conformément à l'article 12 de la directive, et, le cas échéant, les autres exigences pour l'injection et le stockage, **visant en particulier à prévenir des irrégularités notables;**
- 5) le plan de surveillance approuvé, l'obligation de mettre en œuvre le plan et les exigences d'actualisation du plan conformément à l'article 13 de la directive, ainsi que les exigences en matière d'informations à fournir conformément à l'article 14 de la directive;
- 6) l'obligation de notifier l'autorité compétente en cas d'irrégularité notable ou de fuite importante, le plan de mesures correctives approuvé et l'obligation de le mettre en œuvre en cas d'irrégularité notable ou de fuite importante, conformément à l'article 16 de la directive;
- 7) les conditions de fermeture et le plan de post-fermeture provisoire approuvé **visé** à l'article 17 de la directive;
- 8) les dispositions relatives aux modifications, à la révision, à l'actualisation et au retrait du permis de stockage, conformément à l'article 11;
- 9) l'obligation **d'établir et de maintenir la garantie financière** ou toute autre disposition équivalente conformément à l'article 19 de la directive.

Différents documents devront comprendre en particulier:

- un Plan de contrôle et de surveillance
- un Plan de mesures correctives
- les Conditions de fermeture
- un Plan de post-fermeture
- une Garantie financière - couverture des obligations découlant du permis, des procédures de fermeture et des dispositions de post-fermeture
- un Plan de consultation et d'information du public (directive européenne 2003/4/CE).

2.4. PHASE C – FERMETURE DES INSTALLATIONS DU DEMONSTRATEUR

Si le projet devait s'arrêter après les tests d'injection réalisés sur le démonstrateur de recherche, les procédures nécessaires à l'abandon du site devront être engagées. En particulier, une **Déclaration d'arrêt des essais de stockage et d'injection** devra être adressée aux ministres chargés des installations classées et des mines.

Cette déclaration sera attribuée sur la base d'un dossier comprenant la description des travaux d'abandon des puits (rebouchage, mesures de protection vis-à-vis des aquifères sus-jacents, démantèlement des installations de surface) et des mesures de surveillance dimensionnées en fonction de la durée et du volume de CO₂ injecté et des caractéristiques du milieu récepteur. On proposera dans ce programme de surveillance:

- L'identification des paramètres physiques et chimiques à mesurer
- Le choix des techniques de surveillance
- Le dimensionnement des opérations de surveillance
- Un cahier des charges pour l'échantillonnage (positionnement, nature et fréquence)
- Un cahier des charges pour les analyses sur échantillons

Le dimensionnement de ces opérations reposera essentiellement sur la base des modélisations et simulations réalisées dans le chapitre précédent. Concernant la mise en sécurité des puits, l'intervention d'une société spécialisée dans la maintenance des puits sera nécessaire afin que le rebouchage des puits permettant l'isolement des aquifères sus-jacents au site de stockage soit effectué dans les règles de l'art (vérification de l'étanchéité du ou des bouchons). Enfin, des travaux de génie civil seront nécessaires afin de remettre les parcelles en l'état initial.

2.5. PHASE D – ABANDON DES INSTALLATIONS DU DEMONSTRATEUR

A compter du donné acte de la **Déclaration d'arrêt des essais de stockage et d'injection**, la responsabilité de la surveillance des installations de stockage et de prévention des risques sera transférée à l'Etat dans les conditions prévues au troisième alinéa de l'article 93 du code minier et selon des modalités fixées par décret en Conseil d'Etat.

3. BUDGET

Le budget présenté ici intègre une proposition de feuille de route à suivre pour les phases A et B avec un budget indicatif associé. Ces indications proviennent d'une étude

antérieure (interrompue) pour laquelle un cahier des charges avait été proposé à l'opérateur.

Le PROGRAMME 1 de la PHASE A est budgétisé en considérant le massif du Sud uniquement comme suggéré par le CNRT. Il comprend différentes étapes jusqu'à la demande du permis d'exploration.

PHASE A	PROGRAMME 1	Demande de permis d'exploration
Sélection de site (Massif Sud)	Dimensionnement des scénarios d'injection par modélisation numérique: dans les (i) péridotites (ii) basaltes, (iii) Flysch avec des profondeurs d'injection variant au-delà de 800m pour des contextes standards mais aussi entre 100 et 400m pour une injection multi-puits dans les péridotites. Evaluation des potentiels (i) d'injectivité, (ii) de capacité de stockage, (iii) de cinétique de carbonatation, et (iv) de surpression engendrée. Analyse de sensibilité sur les paramètres de transport réactif afin de définir les critères requis pour choisir le bon scénario en concordance avec des mesures en laboratoire sur échantillon.	70k€
	Campagne géologique de terrain en appui aux campagnes de mesures géophysiques pour cartographier en détail la zone choisie et compléter les informations obtenues par mesures géophysique	30 k€
	Campagne d'électromagnétisme : pour identifier les horizons en profondeurs et l'agencement des corps.	110 k€
	Campagne de gravimétrie : pour restituer un modèle dans la zone d'intérêt (usine du sud) dans le cadre géol. régional. Produire un modèle de la nappe ophiolitique et de son substratum (3-5 km prof.) et/ou de tester diverses hypothèses géologiques avec les nouvelles données de terrain. Couvrir une zone qui permette de « raccorder » en surface les unités qu'on imagine trouver dessous (depuis Goro jusque vers Nouméa): tout le sud de l'île, qui s'inscrit alors dans une bande E-W de 50x25 km environ.	110 k€
	Campagne environnementale et sociétale :	80 k€
	Mesure en laboratoire des propriétés caractéristiques de transport réactif (perméabilité, porosité, cinétique de carbonatation des péridotites/basaltes/Flysch (selon le site sélectionné par les modèles). Simulation en laboratoire des mécanismes de stockage: Mesure des vitesses de réactions, géochimie des phases secondaires minérales, la quantité de CO2 piégé en fonction de la température, pression, vitesse du fluide dans la gamme des conditions de stockage.	250 k€
	Campagne Sismique Passive Haute Résolution: pour identifier la présence de bassin sédimentaire sous les nappes de péridotites	300 k€
	Travaux de forage d'exploration	700 à

	- Amenée, déploiement et retrait de la plateforme de forage: 100 à 300 K€ - Forage de reconnaissance petit diamètre carotté de 600 m de profondeur: 250 K€ avec tubage provisoire. Tubage cimentage pour utilisation comme observatoire hydrogéologique : 200 K€. - Forage de reconnaissance à 1800 m de profondeur avec 800 m de zones carottées avec tubage provisoire : 800 K€. Tubage cimentage pour utilisation comme observatoire hydrogéologique : 400 K€	900 k€ (selon les options)
Qualification de site (une fois la zone de site et le complexe clairement défini)	Caractérisation du site	50 k€
	Simulation de l'injection dimensionnement impact du CO ₂ injecté	200 k€
	étude de sensibilité	400 k€
	analyse de risque	100 k€
		300 k€
Permis d'exploration		Sous-traitance 50 k€
TOTAL		~3 000 k€
PHASE A	PROGRAMME 2	Mise en place démonstrateur
Conception du démonstrateur	Cahier des charges « Prospection par sismique réflexion 2D »	100 k€
	Cahier des charges « Prospection par sismique réflexion 3D »	
	Cahier des charges « Etat initial de la teneur en gaz des sols »	
	Cahier des charges « Forages »	
	Cahier des charges « Diagraphies »	
	Cahier des charges « Tests en forage et prélèvements »	
	Demande d'autorisation de travaux	
Réalisation des travaux d'exploration	campagne de sismique réflexion 2D, traitement et interprétation	~3 000 à 6 000k€ (selon la surface à couvrir)
Demande de permis pour la réalisation d'une « opération pilote de stockage de dioxyde de carbone »		50 k€

Campagne d'explication au public		100 k€
Travaux de forage d'injection	réalisé par techniques destructives aux normes pétrolières (tubé en acier traité en surface et cimenté avec ciment Portland type G), sécurisé (Packers en profondeur et 'blow-out preventer' de surface, etc...) équipé (en redondance) pour le monitoring de l'injection (capteurs de pression, température, conductivité Cw en fond de trou, de fibres optiques (déformation, température) extra-casing et de capteurs acoustiques.	1700 k€
Travaux de forage d'observation	réalisé par techniques destructives aux normes pétrolières et sécurisé équipé de système de capteurs standard P,T, Cw en fond de trou, de fibres optiques (déformation, température) extra-casing et d'un système d'échantillonnage de fluide (type U-tube par exemple) et de capteurs acoustiques (cf., Figure 40). Le casing de ce forage doit être réalisé en double tubage pour la réalisation de mesure de type logging.	1500 k€
Acquisition des terrains pour droits d'usage du sous-sol	Par l'opérateur minier. Parcelle contenant le forage d'injection + observation	?
TOTAL		6000 à 9 000 k€

PHASE B	PROGRAMME 3	TEST INJECTION
Campagne sismique réflexion 3D (on shore – off shore)	campagne de sismique réflexion 3D (50x50 m ; 100 km ²), traitement et interprétation	Sous-traitance 3.900 k€
Réalisation des travaux de forage	Mob/démob, 2 forages, diagraphies, prélèvements	Sous-traitance 10.000 k€
Acquisition des équipements, opération et maintenance	Stockage, pompage et réchauffage du CO ₂ , têtes de puits	Sous-traitance 10.000 k€
Injection de CO ₂	Maintenance d'injection durant les tests	pm
TOTAL		23.900 k€
	PROGRAMME 4	VALORISATION
Valorisation des matériaux recueillis lors des travaux d'exploration et de forage	Programme d'études sur prélèvements et Mesures en forages	700 k€
	Programme de mesures en surface de l'état initial	1 600 k€
Travaux de surveillance de l'injection test	Programme de mesures annuelles en surface et en puits <ul style="list-style-type: none"> - Suivi chimique - Suivi de pression - PSO-PSV 	3 800 k€

	<ul style="list-style-type: none"> - Tomographie électrique - Suivi microgravi - Ecoute microsismique - Interférométrie radar 	
Valorisation des campagnes de surveillance		900 k€
Intégration des résultats	Modélisations des comportements thermiques, hydrauliques, mécaniques et géochimiques à court, moyen et long terme	700 k€
TOTAL		7.700 k€
	PROGRAMME 5	FERMETURE
Fermeture des installations du démonstrateur (si abandon après des tests d'injection non convaincants)	<ul style="list-style-type: none"> - démantèlement des installations de surface - mise en sécurité des puits - remise en état des parcelles 	3.000 k€
Assistance MO ou MOe		500 k€
TOTAL		3.500 k€
Total démonstrateur stockage		~47 000 k€

Les PHASES C et D n'ont pas été budgétisées dans ce cahier des charges. Les coûts indiqués ici peuvent être comparés avec les chiffres présentés sur le budget d'autres sites opérateurs existants (Ottway et autres, cf. chapitre « Evaluation crédible des besoins en stockage de CO₂ »).

Annexe B :
Sites Internet

<http://ccsoman2011.gm.univ-montp2.fr/>

<http://www.or.is/en/projects/carbfix>

<http://www.bigskyco2.org/research/geologic/basaltproject>

<http://www.georep.nc>

<http://www.cnrt.nc/index.php?page=breves&onattr=1&brev=3&year=2013>

<http://www.zoneco.nc/resultats-thematiques/environnement-lagonaire/numerisation-des-minutes-bathymetriques-du-shom-dans>

http://www.deepseadrilling.org/21/volume/dsdp21_06.pdf

<http://www.zoneco.nc/resultats-thematiques/environnement-hauturier/mise-jour-de-latlas-bathymetrique-de-la-nouvelle>

<http://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Earth-Science/Ocean-Floor-Exploration/Oceans-Research/Tasman-Frontier>

http://www.lemonde.fr/planete/article/2013/03/23/la-nouvelle-caledonie-rejettera-en-2015-autant-de-co2-qu-un-pays-du-golfe_1853177_3244.html

<http://www.directmatin.fr/environnement/2013-03-26/la-nouvelle-caledonie-championne-de-la-pollution-au-co2-430443>

<http://www.europe1.fr/france/la-nouvelle-caledonie-championne-du-co2-1459569>

<http://www.mckinsey.com/>

Annexe C :

Liste des figures

Figure 1 : Exemples de carbonatation naturelle dans les péridotites (Ophiolite d'Oman) (photos : M. Kurz, WHOI)	5
Figure 2 : Groupe d'experts à Koniambo, Avril 2013 (debout de g. à d. : Jean Laurent, Dominique Cluzel, Pierre Maurizot, Bénédicte Ménez, Pascale Bénézech, Marguerite Godard, Philippe Gouze, Christophe Monnin, Thierry Augé, Isabelle Thinon, Claude Delor (BRGM). Accroupi : Jacques Loquet (Président du Comité Environnemental Koniambo), Domenik Wolff-Boenisch, Pierre Mercier (Directeur Environnemental Koniambo).	9
Figure 3 : les filières du CCS et options de stockage	12
Figure 4 : Effets des ligands organiques sur la vitesse de précipitation de la magnésite (Gautier, 2012)	17
Figure 5 : Expériences de percolation réactive : dunite synthétique percolée par une eau à l'équilibre avec un réservoir basaltique enrichie en CO ₂ à T=185°C ; (a) variations de perméabilité (10 ⁻¹⁵ m ²) en fonction du temps (jours); images MEB des échantillons percolés après les expériences réalisées avec pCO ₂ = (b) 10MPa, (c) 1MPa and (d) 0.1MPa (T 190°C; P 20MPa, d'après Peuble et al, subm.); Abbr.: Mgn : Magnesite, Cal : Calcite, Srp : Proto-serpentine.	19
Figure 6 : Cliché de cryomicroscopie électronique à balayage mettant en évidence sur les grains de basaltes de l'aquifère d'Hellisheidi, la présence de microorganismes adhérant à la roche au sein d'un biofilm. Lors des injections de CO ₂ et de CO ₂ /H ₂ S/H ₂ , ces microorganismes ont joué un rôle sur le devenir du CO ₂ en l'assimilant sous forme de biomasse ou en affectant la physico-chimie de l'aquifère et notamment son état redox (Le Campion et al., Trias et al., soumis).	23
Figure 7 : Carte géologique de la Nouvelle-Calédonie au 1/500 000 (Maurizot et al., 2009) et morphologie du domaine offshore (Atlas bathymétrique de la Nouvelle-Calédonie DTSI & Zonéco ; système de coordonnées WGS84 projection Mercator parallèle standard 21.5°S et méridien standard 165°E). Les zones de faible profondeur d'eau, le plateau, sont représentées dans les teintes beiges. Le domaine offshore profond est dans les teintes marrons. Vert : nappe des péridotites ; bleu : unité basaltique de Poya, orange à jaune : couverture sédimentaire du Crétacé/Oligocène (cf. légende de la carte géologique à 1/500000).	27
Figure 8 : Sites liés à l'exploitation du Nickel en Nouvelle-Calédonie.	28
Figure 9 : Extrait de la carte géologique à 1/500 000 (Maurizot et al., 2009)	29
Figure 10 : Unités géologiques de Nouvelle-Calédonie (extrait de la carte 1/500000 de Maurizot et al., 2009)	31
Figure 11 : Exemples de formations à l'affleurement dans la région Sud Goro (a) Gabbro, (b) filon de granodiorite (55 Ma)	33
Figure 12 : Exemple d'affleurement de la nappe de péridotites présentant une fracturation intense du sommet à la base (commune de Yaté, Col Paillard)	33
Figure 13 : Schéma des écoulements souterrains dans le massif minier du Koniambo et log schématique de la nappe des péridotites (travaux de J. Jeanpert, 2013b)	34
Figure 14 : Localisation des périmètres de protection des eaux (mars 2013) établi par la DAVAR sur fond de carte géologique à l'échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009)	35
Figure 15 : Coupe géologique simplifiée de la partie ouest de la Grande-Terre modifié d'après Vially et Mascle (1994)	38
Figure 16 : Différentes interprétations de la structure profonde de la Grande Terre, tirées de Lagabrielle et al. 2005 (Fig.21)	38
Figure 17 : Localisation des sondages (points bleu et rouge) de la base de donnée du sous-sol de Nouvelle-Calédonie de SGNC/DIMENC (Export avril 2013). Les sondages rouges sont ceux disposant d'une valeur de perméabilité. Fond de carte géologique à l'échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009).	40
Figure 18 : Localisation des sondages (en bleu) disposant d'une valeur de conductivité (en rouge). Source base de données du sous-sol de Nouvelle-Calédonie de SGNC/DIMENC (export Avril 2013). Fond de carte géologique à l'échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009)	40
Figure 19 : Localisation des sondages (en bleu) disposant d'une valeur de débit d'eau préconisé (en rouge). Source : base de données du sous-sol de Nouvelle-Calédonie (export Avril 2013), SGNC/DINEMC. Fond de carte géologique à l'échelle 1/500000 (Maurizot et al., 2009)	41
Figure 20 : Carte géologique du site de Vavouto (KNS)	42
Figure 21 : Localisation des sondages dans la région de Koniambo-Népoui (Nord) sur fond de carte géologique à 1/200000. Les croix représentent les sondages existants avec indication de la profondeur atteinte. Les couleurs surlignent les sondages qui ont atteint le substratum basaltique ou péridotitique.	

Système de projection : GCS RGNC 19991-93 (R-Reseau geodesique de Nouvelle-Calédonie)	43
Figure 22 : Carte géologique du site de Nouméa (usine SLN Doniambo)	44
Figure 23 : Localisation des sondages dans la région de Nouméa. Les croix représentent les sondages existants avec indication de la profondeur atteinte. Les couleurs surlignent les sondages qui ont atteint le substratum basaltique ou péridotitique. Système de projection : GCS RGNC 19991-93 (R-Reseau geodesique de Nouvelle-Calédonie)	45
Figure 24 : Carte géologique du site de Vale NC	46
Figure 25 : Localisation des sondages dans la région de Goro (Sud). Les croix représentent les sondages existants avec indication de la profondeur atteinte. Les couleurs surlignent les sondages qui ont atteint le substratum basaltique ou péridotitique. Système de projection : GCS RGNC 19991-93 (R-Reseau geodesique de Nouvelle-Calédonie)	47
Figure 26 : Localisation des séismes de profondeur inférieure à 50 km d'après Bertil et al. (2008) à l'échelle des plaques lithosphériques	48
Figure 27 : Localisation des mécanismes au foyer sur la région Sud, Nouméa et Goro (Le Roy et al., 2008)	48
Figure 28 : Carte géologique de la région de l'anticlinal de Gouaro (d'après Maurizot, 2005)	49
Figure 29 : Log synthétiques des sondages Gouaro 1 et 2 de la SREPNC (d'après J.P. Paris, 1981 ; extrait de Maurizot, 2005). Localisation Figure 28	51
Figure 30 : Reconstitution géométrique de l'épaisseur totale du flysch prenant en compte le sondage Cadart 1 et la coupe de la Néra (Maurizot, 2005). Localisation Figure 28	52
Figure 31 : Campagne de sismique réflexion multitraçes pétrolière G95 d'après Vially et al (1999)	53
Figure 32 : Exemple de profil sismique interprété G95-05 (Vially et al., 1999). Il présente la structure anticlinal du bassin de Bourail	53
Figure 33 : a) Exemple de modèle numérique de terrain sur le lagon effectué à partir des minutes bathymétriques numérisées du SHOM b) Localisation des sondes numériques SHOM en domaine lagunaire	59
Figure 34 : Position de la campagne CGG 57 (Vially & Lafoy, 2005)	59
Figure 35 : Position de la campagne (a) CALGON d'après Le Roy et al. (2008) et (b) ZONECO 7 du programme ZONECO (Lagabrielle et al., 2005)	60
Figure 36 : Exemples de profils sismiques HR (campagne CALGON) (Le Roy et al, 2008)	61
Figure 37 : Coupes à travers le bassin de Nouvelle-Calédonie (a) partie Nord et (b) partie Sud. Elles montrent le remplissage sédimentaire Crétacé-Tertiaire et les structures (d'après Vially et Lafoy, 2008)	63
Figure 38 : Les différents systèmes pétroliers du domaine offshore profond et au domaine émergé d'après Vially (1999)	65
Figure 39 : Données géosciences Australia pour mise à jour de l'atlas bathymétrique de la Nouvelle-Calédonie (source: http://www.zoneco.nc/resultats-thematiques/environnement-hauturier/mise-jour-de-latlas-bathymetrique-de-la-nouvelle).	65
Figure 40 : a) Carte de localisation des profils sismiques de la Tasman Frontier Geophysical Database développée en collaboration par les services géologiques régionaux (Geoscience Australia, GNS-Science et le SGNC); b) Plan de position des forages DSDP autour de la Nouvelle-Calédonie. Source DIMENC (site http://www.gns.cri.nz/Home/Our-Science/Earth-Science/Ocean-Floor-Exploration/Oceans-Research/Tasman-Frontier)	66
Figure 41 : Etat des lieux des données existantes sur le domaine océanique profond à proximité de Grande-Terre (Nouvelle-Calédonie) : prélèvements géologiques (forages DSDP) et l'ensemble des données de sismique réflexion numériques existantes [campagnes ZONECO (1, 2, 3, 4), IPOD, base de données TASMAN]. Source : SGNC.	67
Fond cartographiques : Carte bathymétrique et carte géologique à 1/500000 présentées (Figure 4)	67
Figure 42 : Carte gravimétrique (d'après Sdrolia et al., 2003). NC= Nouvelle-Calédonie	69
Figure 43 : Cours des quotas d'émission (2006-2013)	74

Annexe D:

Liste des tableaux

Tableau 1 : chiffrage des émissions de CO ₂ (en tonnes par an)	11
Tableau 2 : listing des données existantes sur le lagon à l'ouest de Grande-Terre	58
Tableau 3 : listing des produits cartographiques du lagon (source : site internet de la DIMENC)	62
Tableau 4 : Exemple de données existantes en offshore sur la ZEE de la Nouvelle-Calédonie	68
Tableau 5 : différents scénarios de stockage en fonction de critères liés à la capacité / Injectivité (efficacité) du site ainsi que les risques associés	76

Annexe E:

Liste des abréviations

CCS : Carbon Capture and Storage (or Carbon Capture and Sequestration)
CNRT : Centre National de Recherche Technologique
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
SGNC : Service Géologique de Nouvelle-Calédonie
GET : Géosciences Environnement Toulouse
GEOM : Géosciences Montpellier
IPGP : Institut de Physique du Globe de Paris
UNC : Université de la Nouvelle-Calédonie
COM : Collectivités d'Outre-Mer
KNS : Koniambo Nickel SAS
SLN : La Société le Nickel
SMSP : Société Minière du Sud Pacifique
DIMENC : Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie)
ICPE : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
NOx : Oxydes d'azote (NO et NO₂)
SOx : Oxydes de soufre (SO₂)
EOR : Enhanced Oil Recovery
ECBMR : Enhanced Coalbed Methane Recovery
IEA : Agence Internationale de l'Energie
DAVAR : Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales
SHOM : Service hydrographique et océanographique de la marine
ZEE : Zone Economique Exclusive
ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (devenu IRD)
TFGDB : Tasman Frontier Geophysical Database
DSDP : Deep Sea Drilling Project
ZoNéCo : Zone Economique de Nouvelle-Calédonie
B2D : Base de Données
OBS : Océan Bottom Seismometer
GLT : Geochemical Logging Tool

Annexe F:
Personnes contactées et rencontrées au cours du projet:

Noms-Prénoms	Organismes	Objet
Robineau Bernard	Président du CNRT	Réunion de démarrage du Projet
Berthault Laurence	Gestionnaire-administratif et financier du CNRT	Organisation des réunions-visites-workshop en Nouvelle-Calédonie pour le groupe d'experts
Olivier Jonemann (journaliste) et Nicolas Pasquel (caméraman)	TV Nouvelle-Calédonie 1ère	Tournage à côté de la butte re-végétalisée de la SLN afin de présenter et expliquer le projet par Pascale Bénézeth (GET, chef du projet) et Pascal Audigane (BRGM, France)
N'Guyen Jean-Michel	Vale NC	Visite du site à Goro
Ritter Jean-Charles	SLN Nouméa	Visite du site à la SLN Nouméa
Beligon Olivier	SLN Nouméa Chef du service Communication	contact
Mercier Pierre	KNS Chef département environnement	Visite du site à Koniambo
Ventura Didier	KNS Vice-président opérations	contact
Sylvain Capo	KNS, Coordinateur environnement	Visite du site à Koniambo
Loquet Jacques	Président du Comité Environnemental Koniambo	Visite du site à Koniambo
Pöllabauer Christine et Tremblier Alban	Hôtel de la Province Sud, Collaboratrice de Cabinet, Conseiller Spécial, Conseiller Nickel de la Province Sud et Président du CNRT	Rencontre et discussions à la Province sud pour faire un bilan des contributions et des perspectives du stockage géologique du CO ₂
Chopot Sandrine et Chalas Patrick	Journaliste indépendante Photographe	Interview pour l'article dans le Magazine NC Nickel N°5

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Technologie

