



Mesures des concentrations en CO₂ dans la région de Bécancour
Rapport préliminaire de la campagne 2010

RAPPORT INRSCO2-2011-V2.7

par

Jean-Christophe Aznar
Hilda Paucar
Marc Richer-Lafèche
Michel Malo

Soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
2011 – Québec
R-1277

Préambule

Le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) a octroyé une subvention à l'INRS-ETE pour mettre en place une chaire de recherche sur la séquestration géologique du CO₂ au Québec. Le décret n° 714-2008 approuvant l'octroi a été adopté le 25 juin 2008. La subvention d'une durée de cinq ans (exercices financiers 2008-2009 à 2012-2013) provient du Fonds vert. La création de la chaire s'inscrit dans l'action 20 du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques intitulé « Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir ».

Les travaux de la chaire permettront d'explorer les principales options de séquestration géologique du CO₂ au Québec. Les objectifs principaux sont d'évaluer la capacité de stockage du CO₂ au Québec, de tester quelques sites pour leur potentiel de rétention du CO₂ après injection, et de former une expertise au Québec dans le domaine de la technologie du captage et de la séquestration du CO₂ (CSC). Les objectifs secondaires pour arriver à répondre aux objectifs principaux sont de: 1) faire l'inventaire des réservoirs géologiques potentiels au Québec; 2) faire l'inventaire des sources majeures d'émission de CO₂ au Québec; 3) compiler les travaux réalisés ailleurs dans le monde sur la technologie du CSC; 4) caractériser les paramètres géologiques et géophysiques des réservoirs potentiels; 5) évaluer leur capacité de stockage; 6) choisir des sites potentiels pour réaliser des essais d'injection de CO₂; 7) tester un ou deux sites avec suivi sur une période d'un à deux ans pour évaluer la capacité de rétention du CO₂ et les risques de fuite. En marge de l'atteinte des objectifs mentionnés plus haut, les travaux complémentaires concernent l'évaluation des enjeux socio-économiques de l'implantation de la technologie du CSC au Québec (lois, sécurité, etc.) et des études technico-économiques pour l'implantation d'une usine pilote.

Les cinq volets de recherche suivants permettront d'atteindre les objectifs et de réaliser les travaux complémentaires :

1. Inventaire
2. Caractérisation
3. Capacité de stockage
4. Test-pilote
5. Enjeux socio-économiques.

Le présent rapport sur les mesures de concentrations de CO₂ dans la région de Bécancour cadre dans le volet de recherche Caractérisation. Ces travaux permettront d'établir des mesures de référence pré-injection de CO₂.

Sommaire

Un échantillonnage extensif du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air au niveau du sol a été réalisé le long des routes dans la région de Bécancour, au Québec, au mois d'août 2010. Les valeurs moyennes des concentrations en CO₂ peuvent être utilisées pour définir des teneurs de référence de la concentration naturelle et anthropogénique de CO₂ avant l'injection dans les réservoirs souterrains potentiels à Bécancour. L'activité industrielle intense dans la région semble induire localement des rehaussements des valeurs obtenues.

Table des matières

Préambule.....	3
Sommaire	4
Table des matières.....	5
Introduction	7
Méthodes	8
Zone d'étude	8
Échantillonnage	11
Tests laboratoires.....	16
Résultats	18
Variabilité locale du signal	18
Distribution des valeurs mesurées	22
Concentrations en CO ₂	22
Ratio 13C/12C	24
Cartographies	25
Concentrations en CO ₂	25
Discussion	29
Remerciements	31
Bibliographie.....	33

Introduction

La séquestration géologique du dioxyde de carbone (CO₂) est une des solutions envisagée pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (IPCC, 2005). Il s'agit de capter le CO₂ à la source (au niveau des grands émetteurs), de le transformer, de le transporter et de le stocker en profondeur. La mise en oeuvre d'un programme de stockage géologique du CO₂ nécessite une démonstration claire que ces activités ne s'accompagnent pas de problèmes environnementaux (Sharma et al., 2007). Des programmes de surveillance sont nécessaires pour que le projet soit accepté socialement et pour s'assurer que les risques sont réellement maîtrisés. Par conséquent, des programmes de surveillance environnementaux sont mis en place dès le début des projets (Preston et al., 2009). La surveillance environnementale doit être effectuée durant les opérations d'injection, après, mais aussi avant l'injection afin de définir des valeurs de référence (Simone et al., 2009). La connaissance des conditions initiales permet de mesurer par la suite tout changement qui pourrait intervenir dans les milieux en relation avec la séquestration du CO₂ (IPCC, 2005).

Une croyance largement répandue consiste à considérer que le CO₂ soit un gaz inerte dont la toxicité serait reliée à la diminution du pourcentage d'oxygène dans l'air inhalée. Il n'en est rien. Il existe une toxicité propre au CO₂ bien documentée (e.g. Benson et al., 2007). À de fortes teneurs, il affecte les systèmes sanguin et respiratoire. Le dioxyde de carbone est le régulateur de la respiration. Il agit sur le système nerveux qui commande le système respiratoire. Lorsque les concentrations de CO₂ dans l'air commencent à atteindre les 3%, les premiers symptômes, comme une respiration accélérée ou des maux de tête apparaissent. À 10%, en fonction des durées d'exposition, on peut observer le décès de sujets. C'est sur la base de ces considérations que plusieurs pays ont d'ailleurs établi des critères ou des normes. Les concentrations maximales se situent aux alentours de 2 %.

Lors des phases de caractérisation des réservoirs géologiques, une attention particulière est portée

quant à la rétention des gaz en profondeur et à la détection de failles. Une zone d'enfouissement est jugée adéquate si une roche réservoir est surmontée d'une roche de couverture imperméable. De ce fait, lorsqu'un territoire a été sélectionné adéquatement, les risques de fuites ultérieures pourraient être jugés minimes. Par conséquent, une tentation forte serait de concentrer les efforts de surveillance sur la chaîne de transformation, transport et injection du CO₂, où la défaillance de système pourrait conduire à la libération brutale de grande quantité de CO₂ dans l'atmosphère. Si les libérations continues de CO₂ sont fréquentes dans les zones volcaniques, on n'a que peu de cas rapportés de libération brutale de CO₂. Les effets demeurent donc largement méconnus. On rapporte souvent le cas du lac Nyos, au Cameroun, où la libération brutale de 1.4 million de tonnes de CO₂ (produit par l'activité volcanique et accumulé au cours du temps), a causé le décès de 1700 personnes. Cette catastrophe illustre que si les risques de libération massive doivent être à l'évidence considérés, les phénomènes plus diffus le doivent également. Par exemple, la libération de CO₂ dans les aquifères peut conduire à une acidification de l'eau et à une dégradation des formations géologiques entraînant la libération d'éléments toxiques (Benson, 2005). La caractérisation des milieux concerne donc l'atmosphère mais aussi les sols et les aquifères (Johnson et al., 2008).

Si la prospection extensive des concentrations en CO₂ est une phase préliminaire indispensable à tout projet de séquestration du carbone, d'autres éléments doivent aussi faire l'objet d'attention. Certains éléments sont caractéristiques de remontées de gaz profond en surface et révèlent la présence de réseaux de failles qui devront par la suite faire l'objet d'attention. On peut citer par exemple des gaz carbonés (les composés de C₂ à C₄ sont souvent mesurés), ou encore des gaz rares comme l'hélium, le radon et le thoron (Chadwick et al., 2009; Jones et Pirkle, 2007; Voltattorni et al., 2009). D'autres éléments sont révélateurs de changements des conditions environnementales, comme le pH des aquifères.

Une surveillance sérieuse des projets de séquestration de CO₂ ne peut donc pas être articulée que sur un seul compartiment ou un seul élément.

Les remontées de gaz injectés en profondeur peuvent être localisées au niveau des points d'injection (forages), mais également le long des réseaux de failles (Annunziatellis et al., 2008). Ce patron a pu être vérifié dans les travaux d'exploration pétrolière, les anomalies détectées en surface ne sont pas nécessairement localisées au-dessus des gisements, du fait de migrations le long des réseaux de failles (Holys et Toth, 1996). Par conséquent, même si les sites d'injection concernent une surface relativement restreinte des territoires, les programmes de surveillances doivent être effectués régionalement (Leuning et al., 2008). En l'absence de modèle prédéfinis, une approche possible consiste à se focaliser progressivement sur des territoires de plus en plus restreints. Par exemple, les échantillonnages régionaux permettent de dresser un premier portrait global des patrons des remontées éventuelles de gaz. Ils doivent par la suite être complétés par des relevés locaux avec des densités de points plus fortes. Dans une troisième étape, les mesures effectuées couplées aux modèles de circulation atmosphérique permettent de définir des stations permanentes de mesures à long terme (Jones et Pirkle, 2007). Il est nécessaire, finalement, que

des mesures en continu soient effectuées en profondeur, dans les formations géologiques, pour anticiper des problèmes potentiels en surface.

L'objectif global dans lequel s'inscrit ce travail est donc de participer à la caractérisation de l'état initial du site avant injection. Un ensemble d'éléments chimiques et de compartiments (air, sol, eau) doivent faire l'objet d'attention. Ce rapport se limite à fournir un premier portrait des concentrations en CO₂ et des valeurs du ratio isotopique ¹³C/¹²C observées dans l'air, au niveau du sol, le long des routes. Il s'agit donc d'une approche préliminaire. Un objectif méthodologique consistait également à tester l'efficacité d'un spectromètre infra rouge permettant de mesurer en continu les concentrations en CO₂ et les ratios isotopiques ¹³C/¹²C.

Méthodes

Zone d'étude

Au Québec, un bon site pour la séquestration du CO₂ pourrait être la région de Bécancour (<http://chaireco2.ete.inrs.ca/?q=fr/objectifs>). S'y côtoient, en effet, des usines émettrices de CO₂ et un aquifère salin profond capable de servir de réservoir de stockage (Fig. 1).

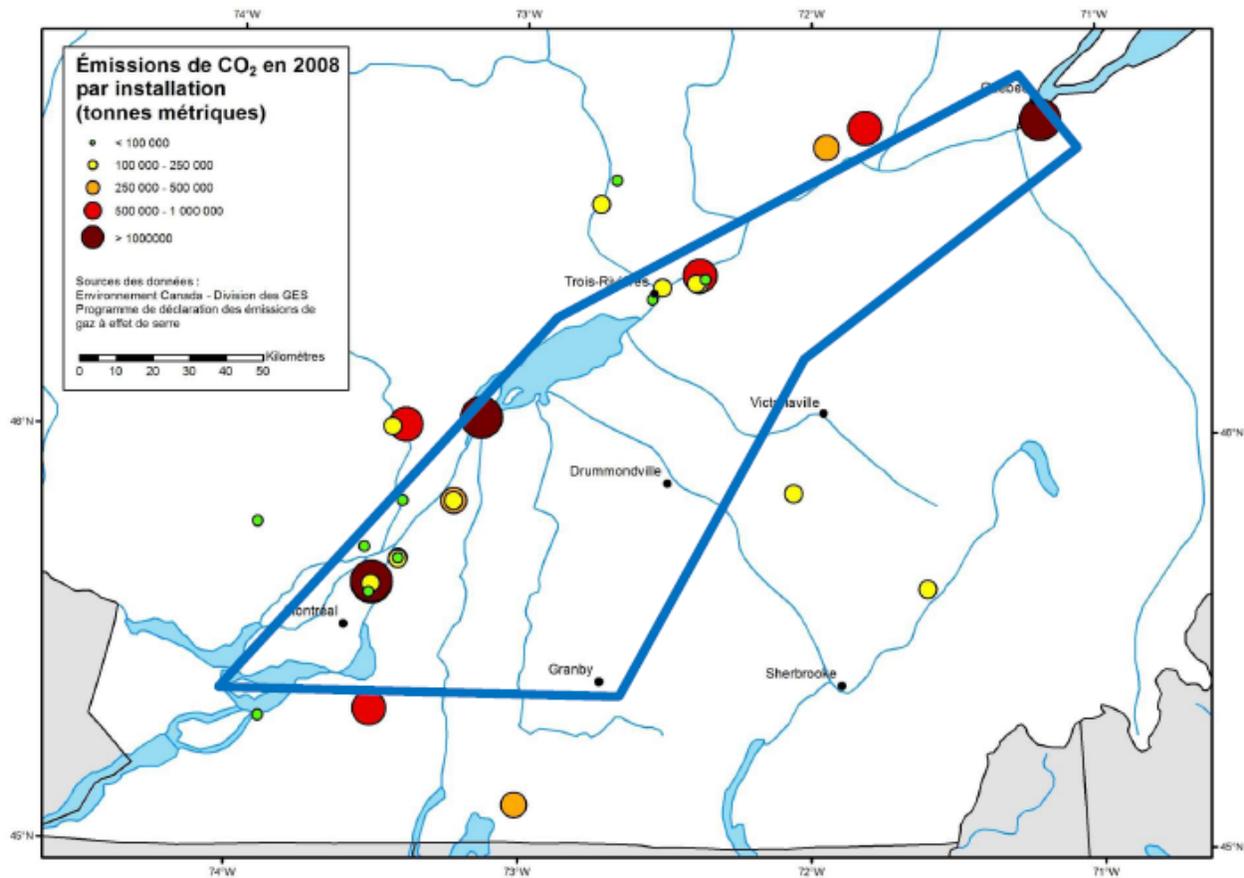


Figure 1. Localisation des grands émetteurs dans la région des Basses-Terres du Saint-Laurent (source : Bédard et al. 2010; http://chaireco2.etc.inrs.ca/?q=fr/publications_fr).

C'est également une zone pour laquelle on possède des données de puits d'exploration pétrolière et gazière, facilitant l'établissement d'un modèle géologique (figure 2).

La zone du parc industriel et portuaire de Bécancour, particulièrement attractive au

vue de ses caractéristiques géologiques et de la présence de grands émetteurs (plus de 100 000 t de CO₂ par année), a donc été retenue comme un site potentiel d'injection. C'est dans cette région qu'a été définie la zone d'étude du présent rapport (figure 3).

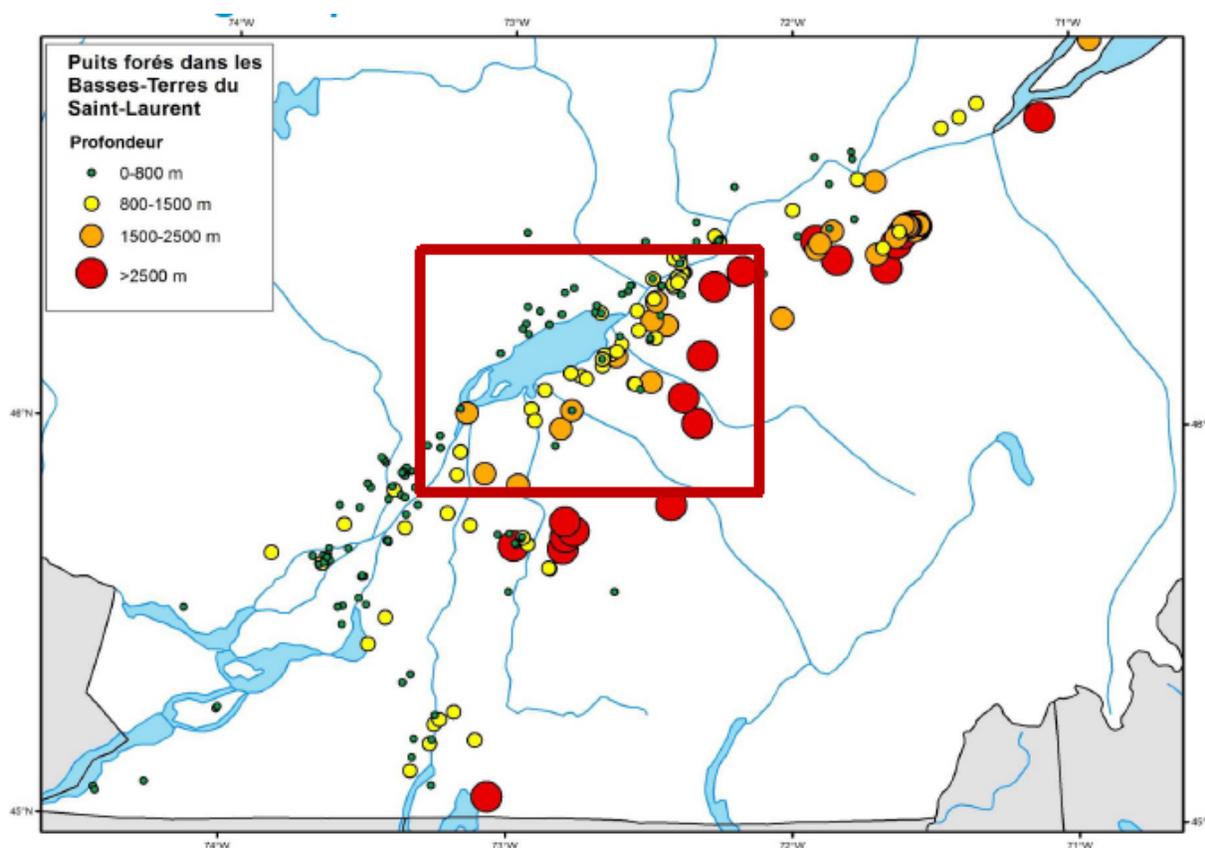


Figure 2. Présence de données disponibles : puits d'exploration pétrolière et gazière (source : Bédard et al. 2010; http://chaireco2.ete.inrs.ca/?q=fr/publications_fr).

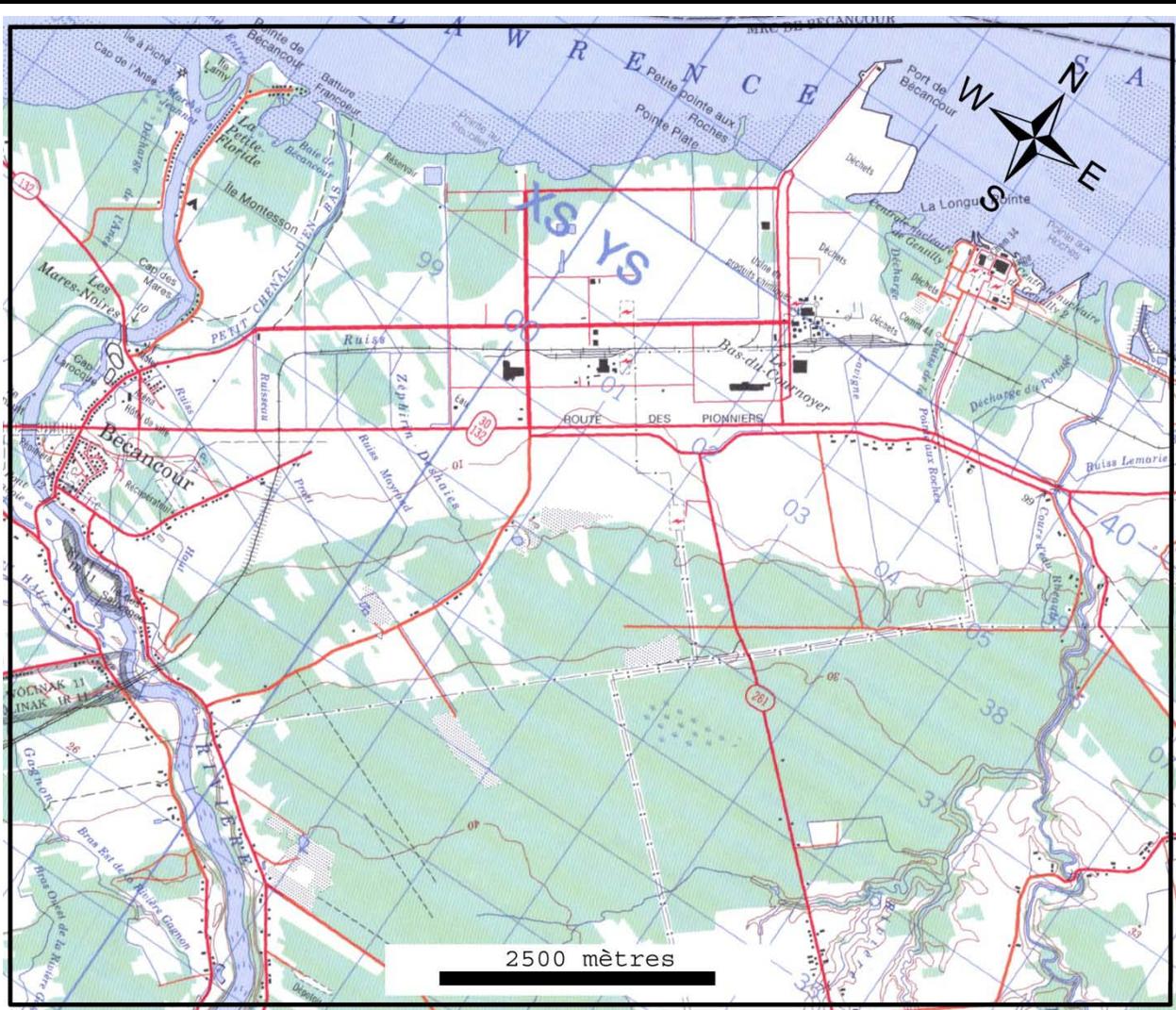


Figure 3. Zone d'étude.

La zone sur laquelle se sont concentrées les mesures représente environ 70 km². Elle englobe la ville de Bécancour ainsi que le parc industriel et portuaire (Fig. 3). Sur ces territoires où vivent et travaillent des populations, la réalisation de suivis environnementaux est donc particulièrement nécessaire.

Échantillonnage

Les échantillonnages ont été effectués le long des routes carrossables de la zone d'étude. Il s'agit donc d'un échantillonnage par transect. Ce choix a été effectué pour

obtenir rapidement, avec le matériel disponible, une grande densité de mesures sur l'ensemble du territoire. Les routes de circulation représentent des environnements particuliers. Des zones boisées, de végétations basses non-agricoles, agricoles, humides et urbanisées, complètent l'occupation du sol. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ne sont donc pas forcément généralisables à tous les milieux. Un échantillonnage complémentaire, sur point de grille permettrait de mesurer de potentielles variabilités entre les différentes classes d'occupation du sol.

L'instrumentation utilisée pour mesurer les concentrations de CO₂ et les ratios isotopiques en flux continu est un spectromètre laser (Picarro, modèle G1301). Les informations concernant cet appareil peuvent être trouvées sur le site du fabricant :

http://www.picarro.com/isotope_analyzers/co2_ambient. L'encombrement important du système ne permet pas un transport à la main de l'instrument. D'un autre côté, l'usage de véhicules émetteurs de CO₂ est prohibé. La solution retenue pour procéder à un levé régional a donc été d'installer l'analyseur sur des chariots de jardin tractés à pied par des opérateurs de terrain. Les positions GPS tests n'ont pas été enregistrées directement dans l'instrument pour des problèmes de compatibilité. Un système indépendant

d'enregistrement des localisations a donc été adjoint au dispositif. Après étalonnage temporel, les positions ont été associées aux mesures spectrométriques *a posteriori* sur la base du temps. Le GPS était un Minimax avec correction différentielle fournissant une précision métrique. Au début et en fin d'acquisitions, il était nécessaire de lancer, contrôler et éteindre le spectromètre en branchant un écran, un clavier et une souris. En cours d'acquisition, ces périphériques étaient débranchés. La seule observation de ces éléments montre que l'instrument n'est pas conçu pour effectuer des levés itinérants. Il s'agirait plus d'un instrument de laboratoire transportable, destiné à être installé sur des positions fixes. Comme illustré ci-dessous, le dispositif complet représentait un volume important (figure 4).



Figure 4. Préparation du spectromètre laser pour le levé de terrain.

L'instrument est alimenté en 110v et est piloté par Windows XP. Il ne possède pas de batteries internes et une interruption inopinée de l'alimentation lors des tests a provoqué l'arrêt brusque et irréversible du software. L'instrument a dû être redémarré

par des techniciens informatiques. L'alimentation du système a donc nécessité l'adjonction d'un second chariot où étaient disposés des batteries, un convertisseur 12v/110V et un système pour enregistrer les positions GPS (figure 5).



Figure 5. Instrumentation embarquée à l'intérieur du second chariot. L'ordinateur de terrain sert à enregistrer les positions fournies par le GPS à une fréquence de 1Hz.



Figure 6. Mesures des concentrations de CO₂ et des ratios isotopiques ¹³C/¹²C le long des routes. Deux opérateurs tirent à pied un spectromètre laser à flux continu (premier charriot) alimenté par un set de batteries (second charriot). Un GPS enregistre les positions à une fréquence de 1 Hz, elles sont associées aux mesures de CO₂ sur la base du temps. Un véhicule suiveur (non montré) complète le dispositif.

De ce fait, pour tracter l'ensemble du dispositif sur les routes, deux opérateurs étaient nécessaires.

Un élément important à considérer était le temps de stabilisation des mesures en début de période d'acquisition. Nous avons vérifié qu'elle était de 30 minutes, minimum, pour les concentrations et d'une heure pour les ratios isotopiques. Sur le terrain, il n'était donc pas possible d'interrompre l'instrument

pour changer les batteries. Il était nécessaire de procéder à des remplacements successifs et alternés. Chacune des batteries utilisées permettait d'alimenter le dispositif pendant une heure uniquement. Pour réaliser de longs levés, il était donc nécessaire de disposer d'un set de batteries transporté par un véhicule suiveur. La charge à trainer a nécessité l'effort continu de deux opérateurs (figure 6).

Le relief faible observé dans la région a facilité l'utilisation de ce dispositif. Lors des épisodes pluvieux ponctuels, le dispositif était simplement recouvert de bâches mais

laissé en acquisition pour éviter une nouvelle période de stabilisation lors d'un redémarrage (figure 7).



Figure 7. Le dispositif est recouvert de bâches mais laissé en fonctionnement lors d'épisodes pluvieux de faibles intensités et ponctuels.

Pour obtenir des mesures répétées permettant de calculer des variabilités locales, ou lors de pauses des opérateurs, le

dispositif était simplement laissé en position fixe le long des routes (figure 8).



Figure 8. Des mesures répétées au même point géographique sont enregistrées.

Bien que délicat à utiliser sur le terrain et nécessitant un personnel nombreux (3 personnes), le dispositif utilisé a permis de parcourir l'ensemble des transects envisagés.

Au cours du mois d'août 2010, les échantillonnages ont été pratiqués de jour uniquement, lors de journées sans vents importants et sans pluies abondantes. Il a été vérifié que la variabilité des mesures obtenues n'était pas conditionnée dans sa

majeure partie par des facteurs environnementaux comme la température, la teneur en eau dans l'atmosphère, ou l'heure de la journée (analyses de régressions).

Tests laboratoires

De nombreux tests ont été effectués au laboratoire par Mme Hilda Paucar afin de vérifier la bonne calibration de l'instrument et les problèmes de dérives potentielles reliés

à différents facteurs. Les concentrations en CO₂ de l'air analysé ont été manipulées pour observer le résultat sur les ratios isotopiques ¹³C/¹²C. Un volume d'air initial a été placé dans un sac en tédlar de grand volume (5 litres). Le sac était connecté au spectromètre. Au départ, le gaz n'était pas comprimé à l'intérieur du sac. Le pompage du gaz à l'intérieur du sac ne créait pas de dépression du fait de la contraction progressive des parois fines du sac. Cet élément est important car le fabricant recommande de ne pas injecter en surpression ou en dépression l'air à l'inlet, ce qui pourrait endommager le

système de calibration du flux passant dans la chambre. Les variabilités observées ne dépendaient pas des variations de pression du gaz. Des volumes successifs de CO₂ étaient injectés dans le sac avec une seringue. Le ratio isotopique du CO₂ injecté était proche de celui observé dans l'air (-10.8). Il n'est pas attendu que des mécanismes de fractionnement aient pu modifier les ratios. Les résultats observés lors de ces tests semblent montrer des phénomènes de dérives des ratios isotopiques en fonction de la concentration en CO₂ dans l'air (figure 9).

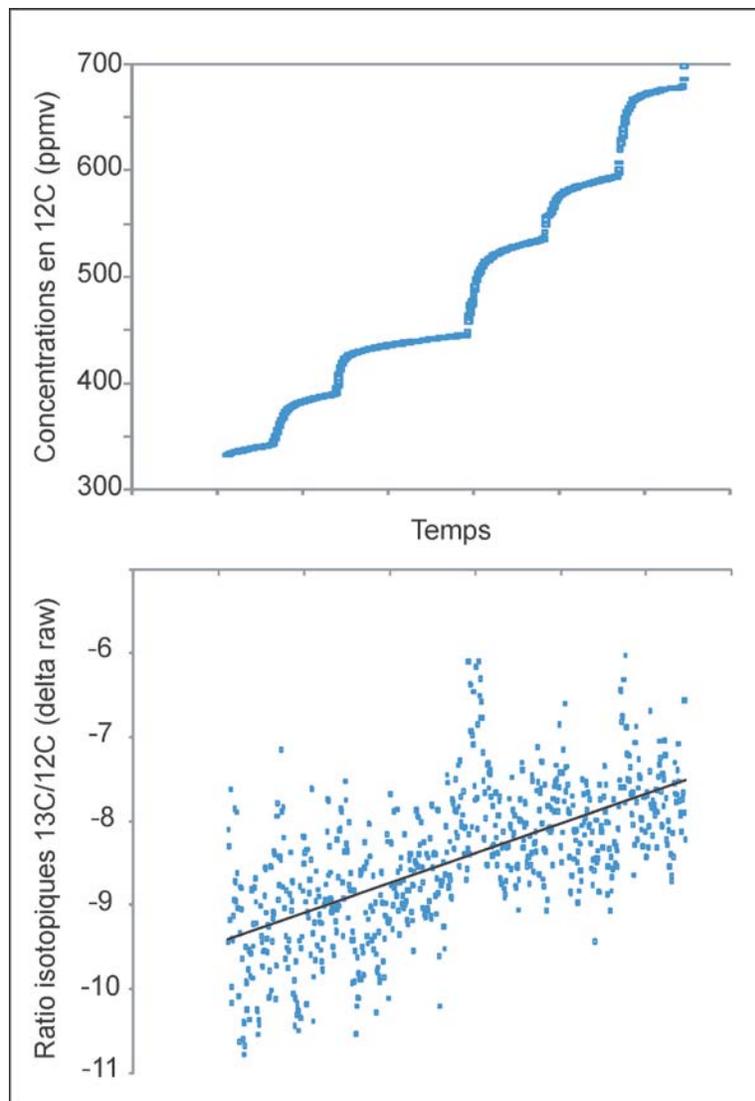


Figure 9. Variabilité des mesures de ratios isotopiques ¹³C/¹²C en fonction de la concentration en CO₂.

Dans d'autres expérimentations, c'est le pourcentage d'eau dans l'air analysé qui a été manipulé. Là encore, des phénomènes de dérives des valeurs de ratios ont été constatés.

Pour les concentrations, des gaz de référence étaient disponibles. Il était donc possible de valider les mesures enregistrées par le spectromètre. Pour les ratios isotopiques par contre, on ne disposait pas de gaz de référence. Les mesures effectuées sur le terrain ne pouvaient donc pas être validées. En l'absence de validation et au vu des problèmes de dérives observées, les mesures du ratio isotopique fournies dans ce rapport sont donc à considérer avec circonspection. Elles ne sont fournies qu'à titre indicatif.

Les tests ont également permis de montrer que les temps de stabilisation des mesures

étaient de 30 minutes pour les concentrations et 1 heure pour les ratios isotopiques.

Résultats

Variabilité locale du signal

Sur le terrain des tests de variabilité locale du signal ont été effectués sur deux sites. Le spectromètre, immobile, dans la même configuration que lors d'une acquisition mobile, enregistrait des mesures répétées. Les résultats obtenus ont permis de juger de la précision des mesures enregistrées. Les positions géographiques avaient une précision relative de l'ordre du mètre (figure 10). Comme illustré sur la figure ci-dessous, les points mesurés étaient essentiellement concentrés dans un cercle de 2 mètres de rayon.

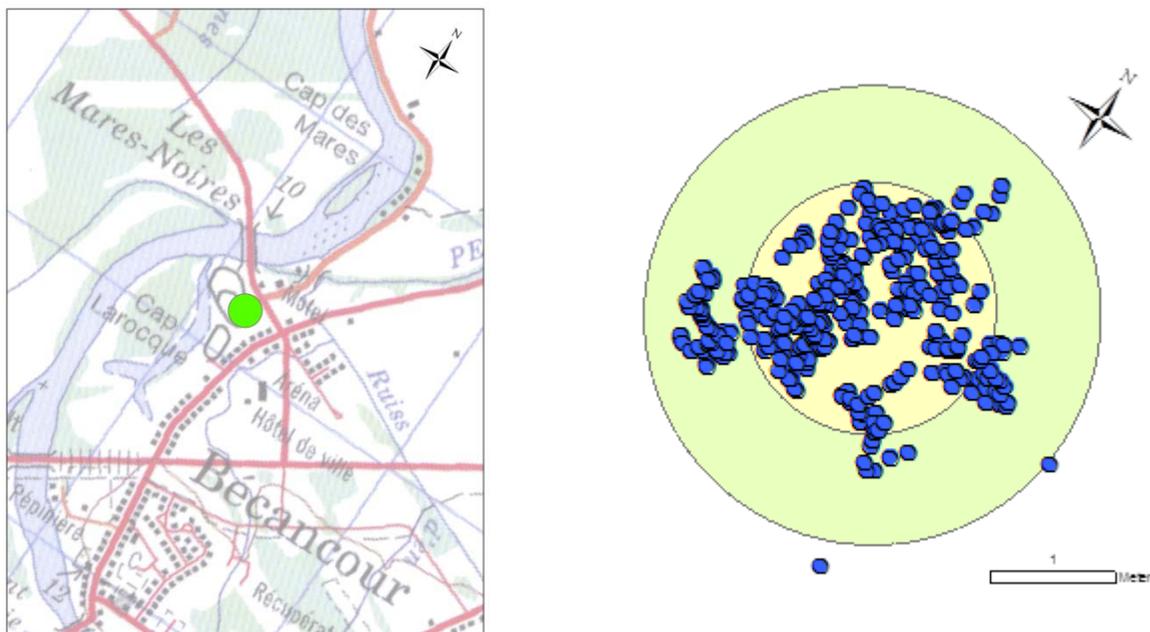


Figure 10. Étude de la variabilité locale des mesures (site 1). Localisation d'un des deux sites d'étude (à gauche) et distribution des mesures (à droite). Les 2 cercles ont des rayons de 1 et 2 mètres respectivement.

L'écart type sur les positions métriques x et y était inférieur à 70 cm sur les 2 sites. Cette précision était suffisante pour notre

échantillonnage et il n'a pas été nécessaire par conséquent de corriger les données de positionnement.

Tableau 1. Variabilité des mesures enregistrées sur deux sites. Les acquisitions ont été effectuées pendant une heure avec une mesure toutes les 10 secondes (n = 360).

	Moyenne	Écart type	Max	Min
Site 1				
12CO ₂ (ppm)	367.9	1.3	372	365
13C/12C	-11.35	2.11	-8.73	-19.2
H ₂ O (%)	1.27	0.05	1.36	1.15
Site 2				
12CO ₂ (ppm)	363.4	1.9	371	360
13C/12C	-10.25	0.7	-8.34	-13.2
H ₂ O (%)	2.08	0.04	2.17	1.99

Les variabilités enregistrées sur le terrain pour les concentrations en 12C et les ratios 13C/12C sont plus fortes que celles obtenues en laboratoire (tableau 1). Aux variabilités instrumentales s'ajoutent en effet les fluctuations naturelles du signal au cours du

temps. Les valeurs moyennes obtenues sur les 2 sites pour les concentrations en 12C (368 et 363 ppm), pour les ratios (-11.3 et -10.2), et pour les teneurs en eau (1.3 et 2 %) sont des valeurs plausibles.

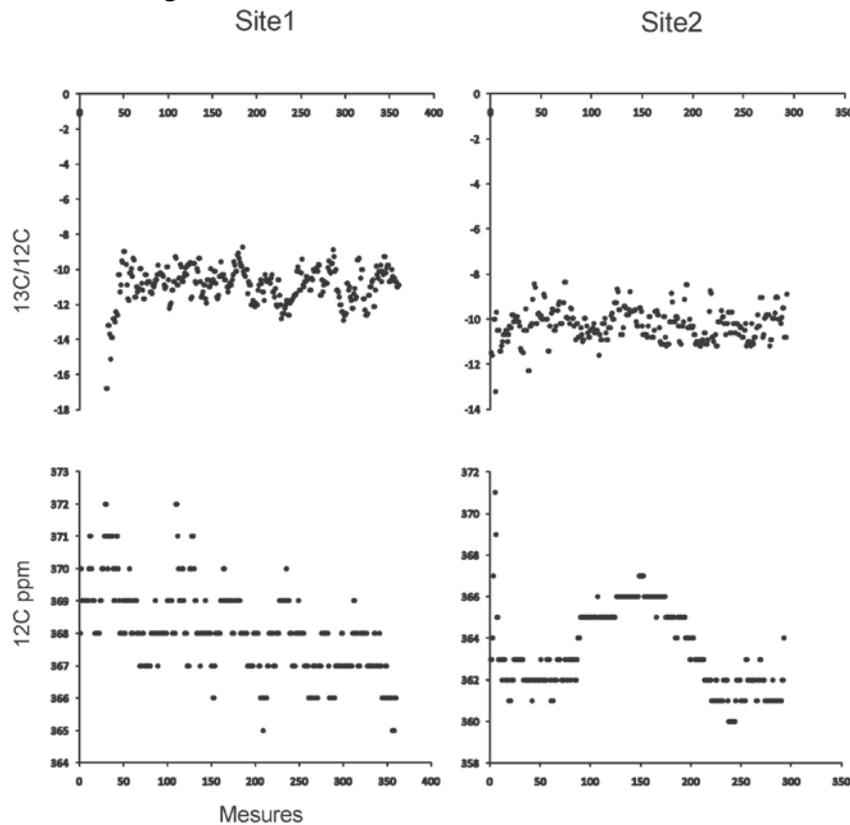


Figure 11. Variabilité temporelle des mesures de 12C et de ratio 13C/12C enregistrées sur 2 sites.

Ces mesures sont soumises à des phénomènes de dérives temporelles (figure 11). Sur la période d'enregistrement (une heure) et pour les deux sites, des fluctuations cycliques ou des tendances linéaires (site 1, concentration en 12C) sont observables. Les

variations observées restent faibles quantitativement à l'échelle des variations totales enregistrées dans la zone d'étude (voir plus loin). Il serait pertinent de mesurer si ces fluctuations sont notables sur de plus longues périodes.

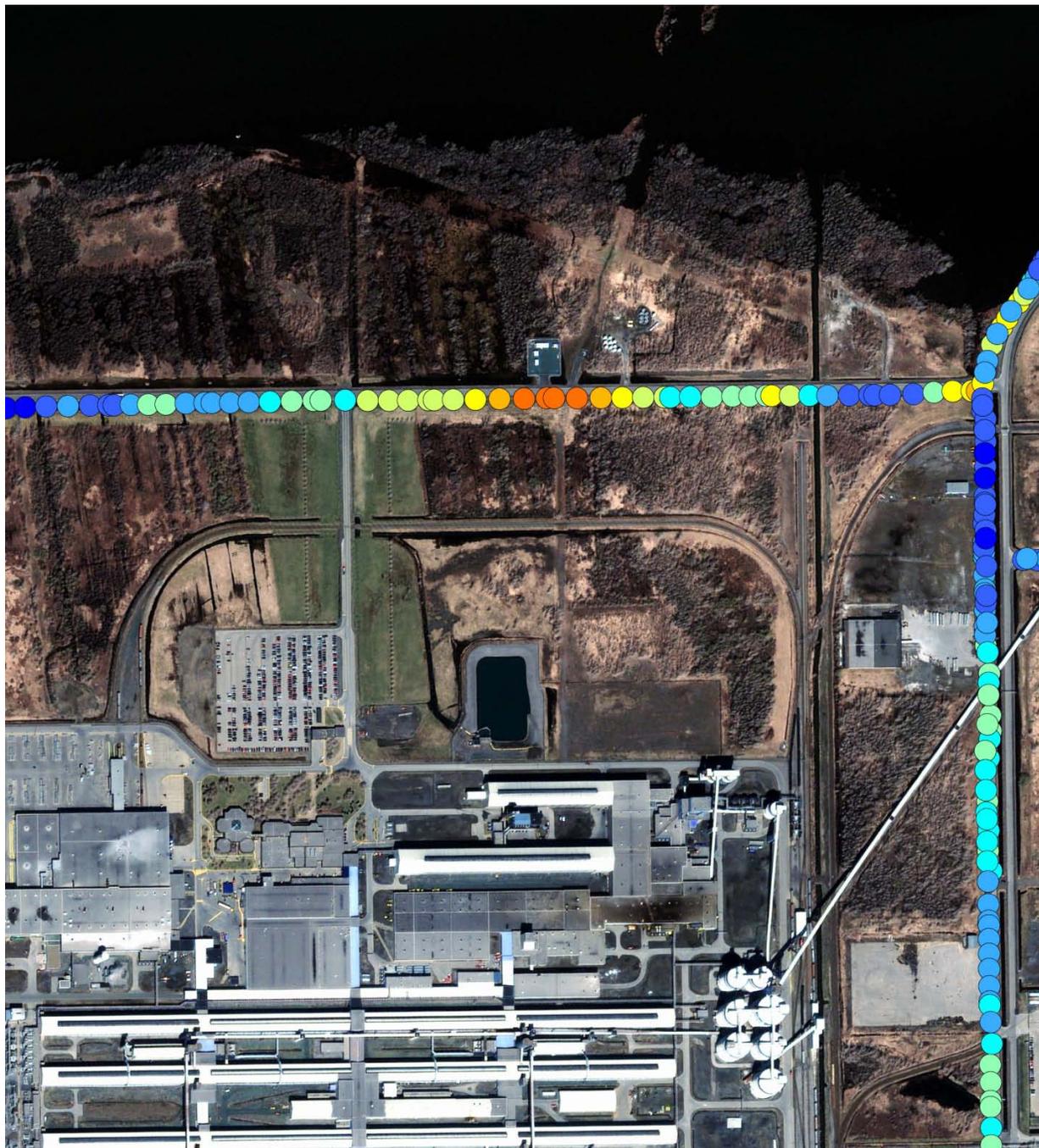


Figure 12. Autocorrélation des mesures de concentrations de 12C dans une zone de plus forte variabilité.

En acquisition, les mesures obtenues étaient largement autocorrélées spatialement. Des points enregistrés successivement ont des valeurs de concentrations de 12C proches,

comme illustré sur la figure ci-dessus. Un variogramme omnidirectionnel calculé sur la même variable (12C) confirme cette observation visuelle (figure 12).

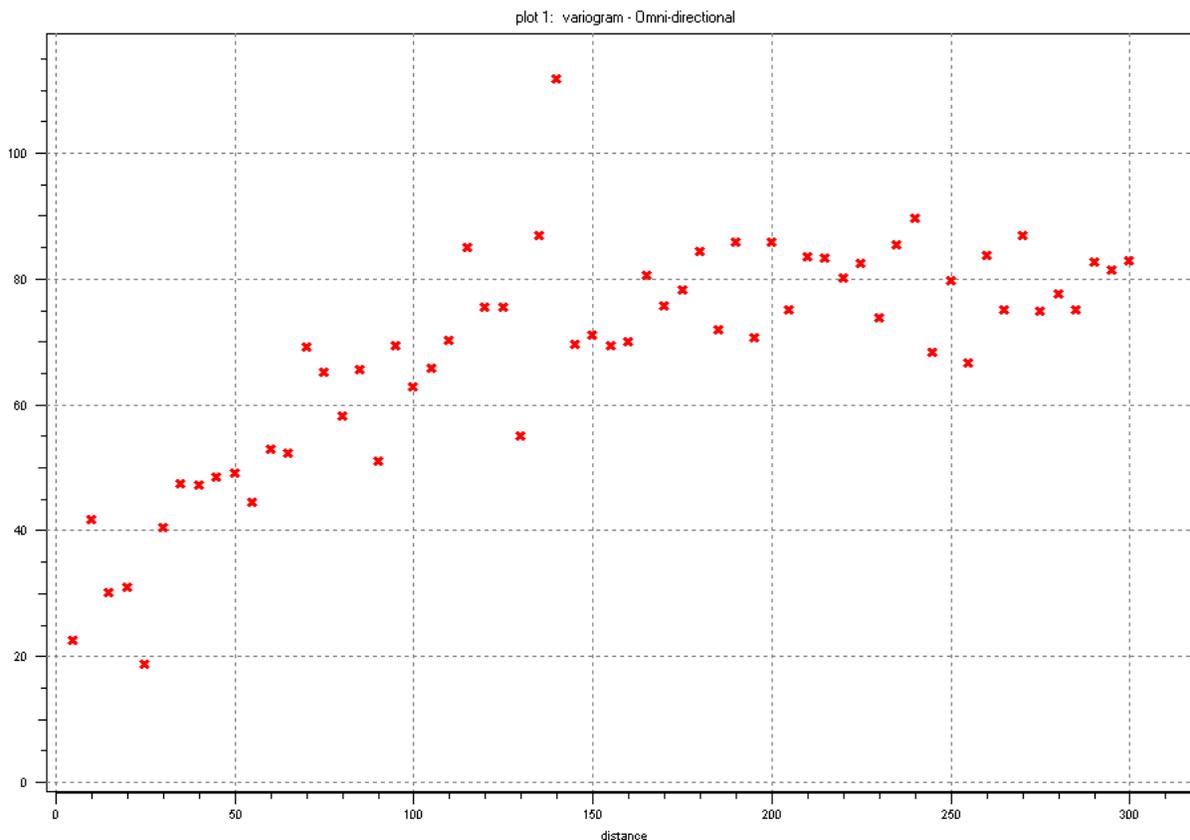


Figure 13. Variogramme omnidirectionnel des concentrations en 12C. La distance de séparation interpoints est de 5m. Les valeurs de semivariances sont reportées en ordonnée.

Le semivariogramme montre qu'il existe une continuité spatiale dans les données (figure 13). Elle peut être exploitée pour procéder à des cartographies si des données localisées et mieux réparties dans l'espace que celles

offertes par les transects sont disponibles. Passé 150 mètres, la structure spatiale tend à disparaître. La distance entre les points d'échantillonnage devrait donc être inférieure à cette valeur.

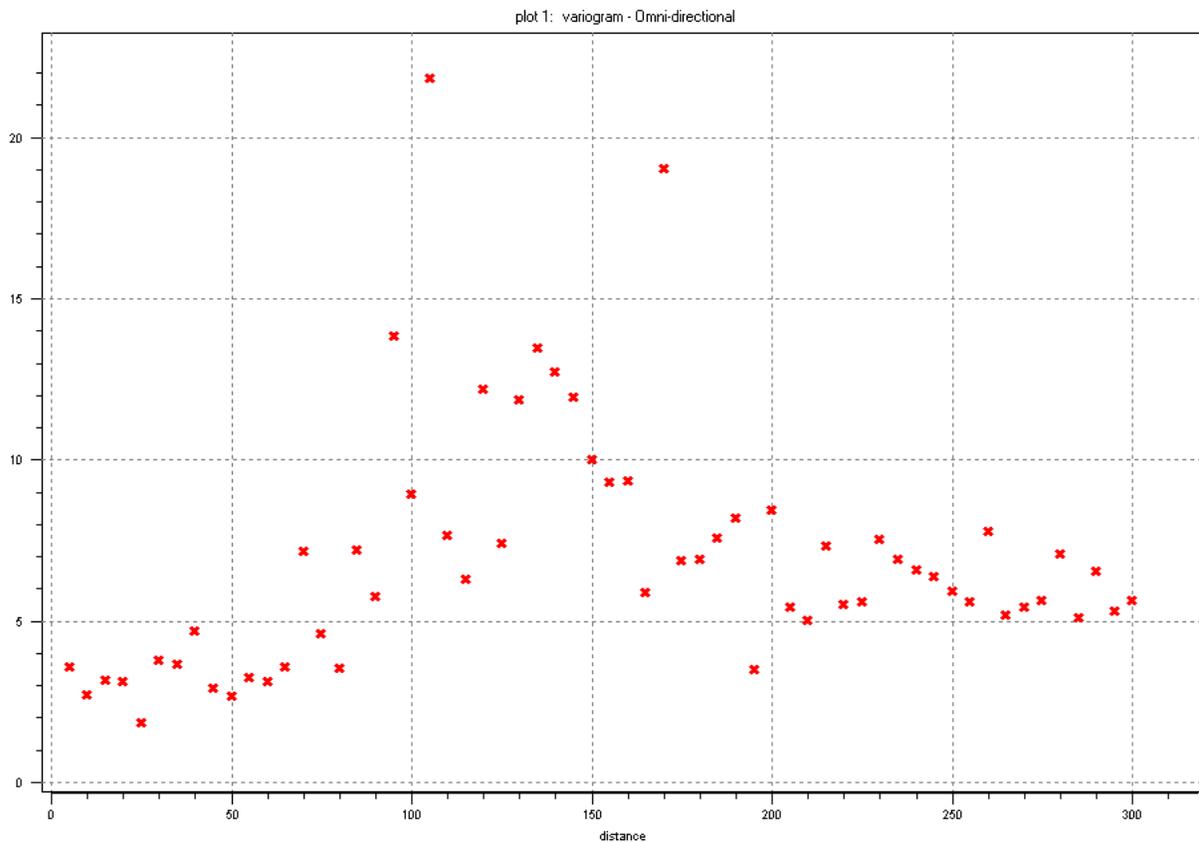


Figure 14. Variogramme omnidirectionnel des ratios 13C/12C. La distance de séparation interpoints est de 5m. En ordonnée sont reportées les valeurs de semivariances.

Le même patron est observé pour les ratios isotopiques 13C/12C. On retrouve en particulier cette distance de 150 mètres (figure 14).

Distribution des valeurs mesurées

Concentrations en CO₂

Le nombre important de mesures effectuées durant le relevé (près de 8000, tableau 2)

permet d’obtenir un portrait robuste de la distribution des variables et donc de remplir l’objectif de cette étude qui était de dresser un portrait régional des teneurs en CO₂ dans l’atmosphère avant de potentielles injections de carbone en profondeur.

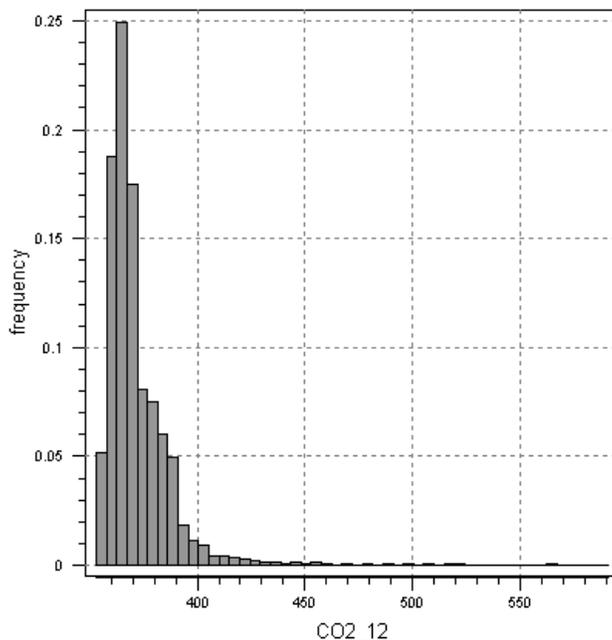


Figure 15. Histogramme de fréquence des concentrations en 12C.

Tableau 2. Statistiques descriptives des concentrations en 12C.

N	Moyenne	variance	Premier quartile	Dernier quartile	min	max
7672	372	513	363	377	353	1160

L’histogramme de fréquence montre une distribution très resserrée des valeurs de concentrations en 12C avec néanmoins des dépassements vers de plus fortes valeurs (figure 15). L’histogramme est étiré vers la droite, et suit une distribution de poisson. Ce schéma est concordant avec l’hypothèse d’une concentration moyenne régionale globale avec une variabilité naturelle et instrumentale (distribution gaussienne) auquel se superpose des zones localisées de plus fortes concentrations. Globalement, au moment du relevé, les concentrations en 12C variaient entre 363 et 377 ppm (premier et dernier quartile, tableau 2). Cette valeur

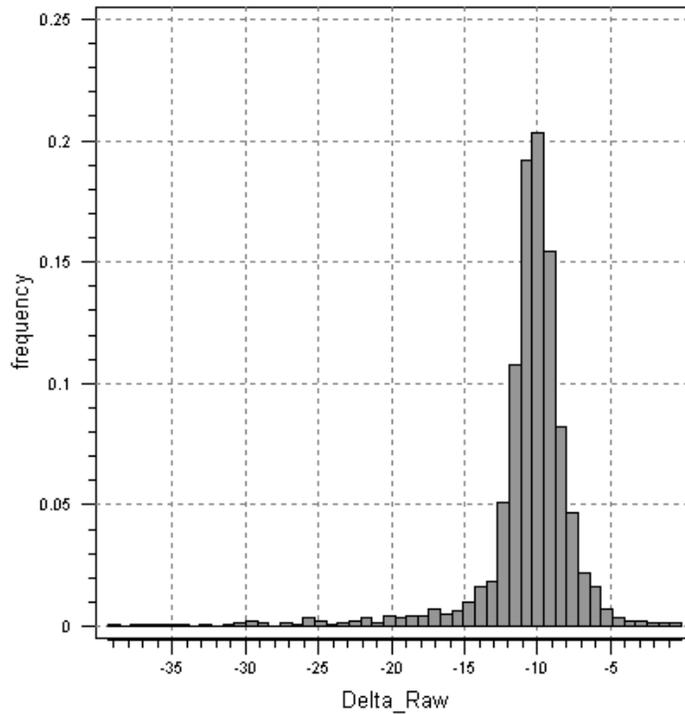
pourrait être utilisée comme valeur de référence pour les mêmes environnements que ceux échantillonnés (les bordures des routes). Ce résultat est concordant avec les valeurs reportées dans la littérature en journée (Leuning et al., 2008).

Il est néanmoins important de constater que localement, on a des dépassements des valeurs moyennes qui peuvent atteindre les 1000 ppm. Ces augmentations locales sont certainement reliées aux activités industrielles (voir la section cartographie).

Ratio 13C/12C

Au contraire des concentrations en CO₂, aucune calibration des valeurs du ratio isotopique 13C/12C n’a pu être effectuée du fait de l’absence de gaz de références de

ratios connus. Les données présentées ci-dessous sont donc présentées à titre indicatif. Le personnel de Picarro a d’ailleurs proposé un certain nombre de correctifs, mais, parvenues tardivement, elles n’ont pas été incluses dans ce rapport.



Les distributions des valeurs de ratio sont très étalées avec des valeurs aberrantes comme -150 ou 308 (min et max). Lorsque les données sont observées de plus près, on s’aperçoit que ces valeurs sont reliées à une

mauvaise stabilisation de l’appareil au début des périodes de mesures.

La valeur moyenne pour les ratios isotopiques 13C/12C est de -11.2 (tableau 3).

Tableau 3. Statistiques descriptives des concentrations en 12C.

n	moyenne	variance	Premier quartile	Dernier quartile	Min	max
7672	-10.7	89.3	-11.2	-9.5	-150	308

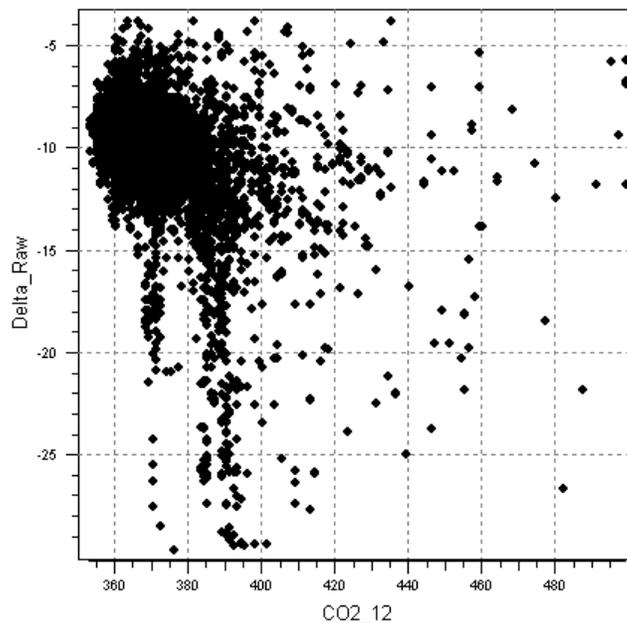


Figure 16. Relations entre les deltas ¹³C/¹²C et les concentrations en ¹²C. Les 10 valeurs extrêmes en tête et en queue de distribution ont été éliminées.

Il n'existe pas de relation linéaire entre les concentrations en CO₂ et le ratio isotopique ¹³C/¹²C du carbone (figure 16). Les enrichissements locaux en CO₂c ne s'accompagnent pas d'une variation corrélée du ratio isotopique.

Cartographies

Concentrations en CO₂

La cartographie des valeurs brutes des concentrations en ¹²C permet au premier coup d'œil de mesurer que des rehaussements locaux des valeurs sont observées dans la zone industrielle (figure 17).

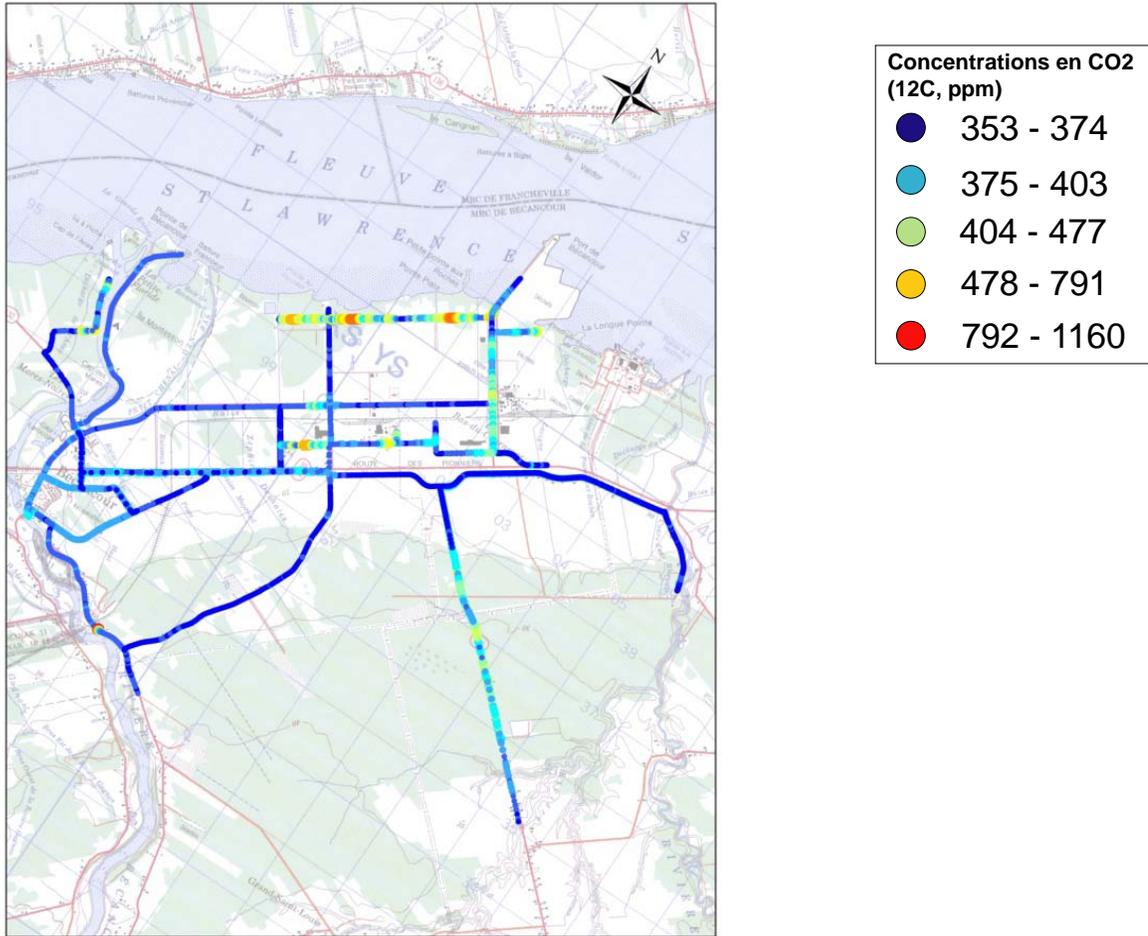


Figure 17. Cartographie des concentrations en carbone 12 (assimilable à la concentration de CO₂) le long des transects.

Les concentrations enregistrées au niveau de la ville de Bécancour sont faibles et correspondent aux valeurs globales observées dans la région (figure 18).

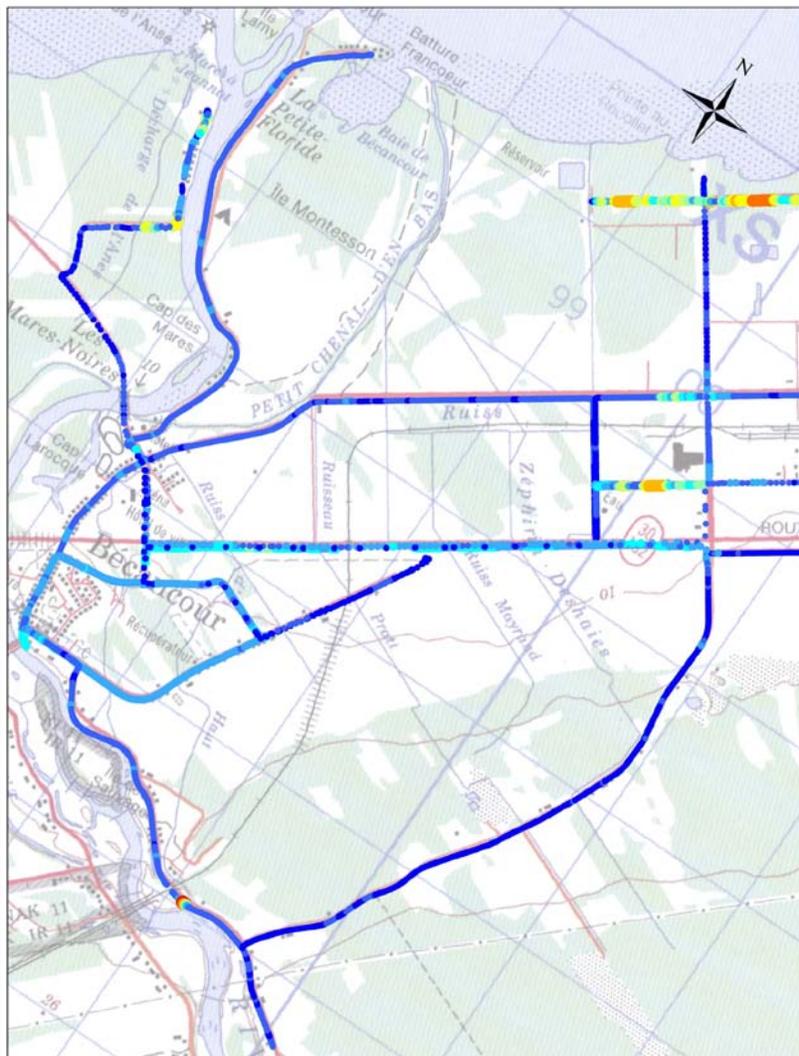


Figure 18. Concentrations en 12C au niveau de la région de la ville de Bécancour. La légende est la même que pour la figure 17.

Les plus fortes concentrations se retrouvent essentiellement au niveau de la zone industrielle. Il serait probable que les activités qui y sont pratiquées provoquent ces rehaussements mais en l'absence de démonstration claire, il est impossible de définir avec certitude les sources. Il serait

possible avec des données complémentaires et avec une approche simple de type rose de pollution de vérifier cette hypothèse, mais dans le cadre de ce travail, elle n'a pas été testée. L'objectif étant uniquement de définir des valeurs de références avant injection.



Figure 19. Concentrations en CO₂ dans la zone industrielle de Bécancour. La légende est la même que celle des figures 17 et 18.

La spatialisation des concentrations montre donc que des valeurs plus fortes sont observées localement dans la zone industrielle (figure 19).

Discussion

Le principal objectif de cette étude était de procéder à un échantillonnage spatial des concentrations en CO₂ et des ratios isotopiques du carbone pour la région de Bécancour. Les résultats des travaux présentés dans ce rapport sont largement préliminaires. Aucune variabilité temporelle n'est mesurée et les mesures ont été effectuées en bordure des routes. Néanmoins, les résultats obtenus nous fournissent de premières valeurs de référence. Les concentrations en CO₂ atmosphérique au niveau du sol et de jour sont aux alentours de 372 ppmv et les ratios isotopiques ¹³C/¹²C moyens sont de -11.2 pour mille. Les variabilités spatiales rencontrées sont également intéressantes à remarquer. Les plus fortes concentrations observées s'observent dans le parc industriel, certainement en relation avec les activités qui y sont menées.

Les valeurs rapportées sont relatives aux milieux échantillonnés, c'est-à-dire aux voies de circulation. Des valeurs différentes seraient peut être observées pour d'autres milieux, comme par exemple pour les tourbières. Une extension des mesures aux autres types de milieux est donc nécessaire.

Les mesures de CO₂ présentées dans ce rapport ont été effectuées en prélevant des gaz quelques centimètres au dessus du sol. Le principal reproche que l'on peut adresser à un tel levé est que les concentrations observées en un point peuvent être influencées par le transport atmosphérique. Les turbulences atmosphériques mélangent les masses d'air et peuvent réduire les hautes concentrations des sources ou déplacer géographiquement les signaux (Leuning et al., 2008). Les routes constituent des corridors favorisant d'ailleurs le mélange des masses d'air. Les zones de plus fortes concentrations observées sur les

cartographies sont donc relatives et devraient varier au cours du temps. Les mesures devraient donc être répétées au cours de l'année et sur des périodes continues, pour vérifier cette hypothèse. Pour s'affranchir des problèmes relatifs au déplacement des masses d'air dans l'atmosphère, les échantillons de gaz sont plutôt prélevés ponctuellement dans les sols. La comparaison des résultats permet alors de vérifier les patrons obtenus. Un levé de cette nature avait été prévu mais les conditions météorologiques ont conduit à son abandon prématuré. Un rapport présente toutefois la méthodologie et des résultats préliminaires sur un petit secteur au sud de la route 132 (Lange et al., 2011). Plus demandeur en terme d'énergie, le nombre de mesures est aussi plus limité lorsqu'on procède à un levé de gaz de sols. Les mesures de CO₂ atmosphériques en continu sont donc complémentaires. Elles permettent à un moindre coût des mesures répétées, donc d'avoir accès à une variabilité temporelle.

La répétition des mesures est un point clef de ce type d'étude (Simone et al., 2009). Des variations s'expriment au niveau de la journée (alternance jour et nuit) mais aussi des saisons et des années (Simone et al., 2009). Elles ne sont pas prises en compte dans cette étude. Il serait donc indispensable dans le cas d'une suite à donner à ce travail de mettre en place un programme de suivi temporel. Ces suivis doivent s'étaler sur plusieurs années (Sharma et al., 2009). Le dispositif pourrait prendre la forme de stations fixes localisées dans la zone de la ville de Bécancour et de la zone industrielle. Les caractéristiques de fonctionnement du spectromètre utilisé le destinent d'ailleurs plus à être utilisé dans un poste fixe, que de manière itinérante.

Les relations avec d'autres variables enregistrées par les stations de mesure de la qualité de l'air du MDDEP seraient très intéressantes. Elles pourraient permettre de modéliser les fluctuations des concentrations en CO₂ en fonction de paramètres climatiques, ou d'émissions industrielles. Cette compréhension serait nécessaire pour interpréter de futures variabilités des taux de CO₂ dans l'air et les relier aux opérations de séquestration géologique du carbone.

Une réflexion devrait être engagée concernant une surveillance qui serait effectuée plus en profondeur, dans les puits d'injection et dans les formations géologiques. Le suivi des caractéristiques des nappes phréatiques superficielles serait, à ce titre, indispensable. Aussi performant soit-il, un réseau de surface ne pourrait permettre que d'observer des problèmes alors qu'il serait nécessaire de pouvoir les anticiper pour pouvoir y remédier.

Remerciements

L'équipe de recherche tient à remercier les personnels de l'INRS et en particulier MM Sébastien Duval et Stéphane Prémont pour leur collaboration durant les phases de travaux au laboratoire. Mme Anna Smirnoff a alimenté notre réflexion quant à l'instrumentation utilisée. Mme Martine Savard nous a gracieusement permis d'utiliser son laboratoire et ses équipements.

Mme Karine Bédard et M. Jean-Philibert Moutenet ont participé activement à la planification des opérations. Sur le terrain, M. Robert Mammani Mammani a tracté efficacement le dispositif.

Ce projet a été financé par le MDDEP dans le cadre de la chaire de séquestration du CO₂ dirigée par le Pr. Michel Malo.

Bibliographie

- Annunziatellis, A., S.E. Beaubien, S. Bigi, G. Ciotoli, M. Coltella, et S. Lombardi. 2008. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): Implications for CO₂ geological storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2:353-372.
- Benson, S.M. 2005. Lessons Learned from Industrial and Natural Analogs for Health, Safety and Environmental Risk Assessment for Geologic Storage of Carbon Dioxide, p. 1133-1141 *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations*. Elsevier Science, Amsterdam.
- Chadwick, R.A., D. Noy, R. Arts, et O. Eiken. 2009. Latest time-lapse seismic data from Sleipner yield new insights into CO₂ plume development. *Energy Procedia* 1:2103-2110.
- Holys, S., et J. Toth. 1996. Flow of formation waters: likely cause of poor definition of soil gas anomalies over oil fields in east-central Alberta, p. 255-277, *In* D. S. a. M. A. Abrams, ed. *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*, Vol. AAPG Memoir 66.
- Johnson, G., M. Raistrick, B. Mayer, S. Taylor, M. Shevalier, M. Nightingale, et I. Hutcheon. 2008. Tracing the Fate of Injected CO₂ During Enhanced Oil Recovery using Stable Isotope Techniques.
- Jones, V.T., and R.J. Pirkle. 2007. Application of exploration geochemical methodology to CO₂ monitoring.
- Lange, S., Aznar, J.-C., Malo, M. 2011. Analyse des paramètres pédologiques et gazeux de la région de Bécancour - Rapport préliminaire de la campagne 2010. Rapport INRSCO2-V4.2. Rapport soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et desParc, INRS-ETE, rapport de recherche R-1268, 27 p.
- Leuning, R., D. Etheridge, A. Luhar, et B. Dunse. 2008. Atmospheric monitoring and verification technologies for CO₂ geosequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2:401-414.
- Preston, C., S. Whittaker, B. Rostron, R. Chalaturnyk, D. White, C. Hawkes, J.W. Johnson, A. Wilkinson, and N. Sacuta. 2009. IEA GHG Weyburn-Midale CO₂ monitoring and storage project-moving forward with the Final Phase. *Energy Procedia* 1:1743-1750.
- Sharma, S., P. Cook, S. Robinson, and C. Anderson. 2007. Regulatory challenges and managing public perception in planning a geological storage pilot project in Australia. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1:247-252.
- Sharma, S., P. Cook, T. Berly, and M. Lees. 2009. The CO₂CRC Otway Project: Overcoming challenges from planning to execution of Australia's first CCS project. *Energy Procedia* 1:1965-1972.
- Simone, A., E. Mackie, and N. Jenvey. 2009. CO₂ geological storage field development- Application of baseline, monitoring and verification technology. *Energy Procedia* 1:2219-2226.
- Voltattorni, N., A. Sciarra, G. Caramanna, D. Cinti, L. Pizzino, and F. Quattrocchi. 2009. Gas geochemistry of natural analogues for the studies of geological CO₂ sequestration. *Applied Geochemistry* 24:1339-1346.