



**Caractérisation des territoires de la région de Bécancour
Établissement d'un modèle d'occupation du sol et optimisation de
l'échantillonnage des hydrocarbures gazeux dans les sols grâce aux images de
télédétection**

RAPPORT INRSCO2-2013-V2.15

par

**Hilda Paucar
Jean-Christophe Aznar
Michel Malo**

Soumis au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

2013 – Québec

R-1431

TABLE DES MATIÈRES

PRÉAMBULE	9
SOMMAIRE	11
1. INTRODUCTION	13
2. ZONE D'ÉTUDE	14
2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE	14
2.2. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES	15
2.3. QUALITÉ DE L'AIR	17
2.4. BIODIVERSITÉ	17
2.5. ENVIRONNEMENT HUMAIN	20
2.6. CADRE PÉDOLOGIQUE	20
3. VALORISATION FUTURE DES TRAVAUX EFFECTUÉS	22
3.1. STANDARDISATION DES MÉTHODES DE PRÉLÈVEMENT ET D'ANALYSE	22
3.2. REGROUPEMENT DES DONNÉES ET MÉTADONNÉES	22
4. MÉTHODES UTILISÉES SUR LE TERRAIN	22
4.1. ÉCHANTILLONNAGES DES SOLS SUR LE TERRAIN	22
4.2. DESCRIPTION DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LE TERRAIN	24
4.3. MESURE DE DONNÉES COMPLÉMENTAIRES SUR LE TERRAIN	25
5. MÉTHODES UTILISÉES AU LABORATOIRE	25
5.1. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS	25
5.2. MESURE DU PH CaCl ₂	28
5.3. PERTES AU FEU	28
5.4. GRANULOMÉTRIE	28
5.5. ATTAQUES PARTIELLES MELICH ₃	31
5.6. ATTAQUES TOTALES PAR DIGESTION ACIDE	31
6. DESCRIPTION QUALITATIVE DES SOLS	32
6.1. ORIGINE DES DÉPÔTS ET TEXTURE DES SOLS	32
6.2. RELATIONS AVEC L'ALTITUDE	35
6.3. RELATIONS AVEC LA CARTOGRAPHIE PÉDOLOGIQUE DE 1943	35
6.4. RELATIONS AVEC DES OBSERVATIONS PONCTUELLES	37
6.5. IMPORTANCE DES TEXTURES DES SOLS POUR LES ÉCHANTILLONNAGES DE GAZ	37
7. CHIMIE DES SOLS	38
7.1. PH	38
7.2. TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE	39
7.3. CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS ÉCHANGEABLES DANS LES SOLS	41
7.4. MERCURE TOTAL	43
8. MODÈLE D'OCCUPATION DU SOL	46
8.1. INFORMATION SATELLITAIRE	46

8.2.	ÉTABLISSEMENT DU MODÈLE	46
8.3.	RELATIONS AVEC LA TEXTURE DES SOLS ET L'ORIGINE DES DÉPÔTS	47
8.4.	RELATION AVEC LE PH DES SOLS	50
9.	OPTIMISATION DES MESURES D'HYDROCARBURES GAZEUX À PARTIR DU CO₂ ET CH₄ MESURÉ DANS LES SOLS ET DE LA TÉLÉDÉTECTION.....	51
9.1.	MÉTHODE	51
9.1.1.	<i>Données de gaz utilisées</i>	<i>51</i>
9.1.2.	<i>Relation spatiale entre les données principales et secondaires</i>	<i>51</i>
9.1.3.	<i>Analyses.....</i>	<i>53</i>
9.2.	RÉSULTATS	54
9.2.1.	<i>Classification à partir du CO₂ et du CH₄ mesuré à une profondeur de 50 cm</i>	<i>54</i>
	Réduction de l'information contenue dans les bandes	54
	Relation entre la présence d'anomalies et les composantes de l'ACP	55
	Estimation des densités de probabilité par kernel bivariée	55
	Cartographie	57
9.2.2.	<i>Classification à partir du CO₂ mesuré en surface</i>	<i>59</i>
	Relation entre la présence d'anomalies et les composantes de l'ACP	59
	Estimation des densités de probabilité par kernel bivariée	61
9.2.3.	<i>Relation entre les classifications obtenues avec le CO₂ mesuré en surface et le CO₂ et le CH₄ mesuré en profondeur.....</i>	<i>64</i>
10.	DISCUSSION	66
11.	REMERCIEMENTS	67
	RÉFÉRENCES	68

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. ZONE D'ÉTUDE. VUE AÉRIENNE GÉNÉRALE. LA LIGNE POINTILLÉE EN ROUGE REPRÉSENTE LES LIMITES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE.	14
FIGURE 2. NOMBRE DE JOURNÉES DE FORTES PLUIES POUR LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE DE BÉCANCOUR POUR LA PÉRIODE 1971-2000 (MOYENNES MENSUELLES, PLUIES > 25 MM).....	16
FIGURE 3. TEMPÉRATURE MOYENNE MENSUELLE POUR LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE DE BÉCANCOUR POUR LA PÉRIODE 1971-2000...	16
FIGURE 4. ROSACE DE DIRECTION DOMINANTE DES VENTS EN FONCTION DE LEUR VITESSE.....	17
FIGURE 5. AIRES PROTÉGÉES DONT LA SUPERFICIE EST DE 1000 HECTARES OU PLUS AUX ENVIRONS DE LA ZONE D'ÉTUDE (SOURCE : DONNÉES-CADRES NATIONALES DE L'ATLAS DU CANADA À L'ÉCHELLE DE 1/1 000 000, ENVIRONNEMENT CANADA).....	18
FIGURE 6. LES MILIEUX HUMIDES DE LA ZONE D'ÉTUDE SONT DES ZONES DE FORTE BIODIVERSITÉ.	19
FIGURE 7. CARTE PÉDOLOGIQUE DE LA RÉGION DE NICOLET RÉALISÉE EN 1943 PAR LES SERVICES DU MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE.	21
FIGURE 8. SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS (CROIX NOIRES). LES ZONES NON COUVERTES CORRESPONDENT À L'EMPLACEMENT DE GRANDS SITES INDUSTRIELS (FONDERIE, CENTRALE NUCLÉAIRE, ...).	23
FIGURE 9. ÉCHANTILLONNAGE DES SOLS AVEC UNE TARIÈRE MANUELLE EN ACIER INOXYDABLE.....	24
FIGURE 10. HUMIDITÉ GRAVIMÉTRIQUE. LES ÉCHANTILLONS SONT PESÉS AVANT D'ÊTRE SÉCHÉS (HUMIDES) ET APRÈS (SECS). LA DIFFÉRENCE ENTRE LES DEUX MASSES RAPPORTÉES À LA MASSE SÈCHE DE L'ÉCHANTILLON FOURNIT LE TAUX D'HUMIDITÉ DES SOLS AU MOMENT DES PRÉLÈVEMENTS.....	26
FIGURE 11. TAMISAGE DES ÉCHANTILLONS.....	27
FIGURE 12. MESURE DU PH CaCl ₂	28
FIGURE 13. ABaque DES CLASSES GRANULOMÉTRIQUES DE LA FAMILLE DE SOLS (À GAUCHE) ET DES CLASSES TEXTURALES DE SOLS (À DROITE). LES ABRÉVIATIONS UTILISÉES DANS LE TRIANGLE DES TEXTURES SONT : A-Lo, ARGILE LOURDE; A-Li, ARGILE LIMONEUSE; A, ARGILE; A-S, ARGILE SABLEUSE; L-Li-A, LOAM LIMONO-ARGILEUX; L-A, LOAM ARGILEUX; L-S-A, LOAM SABLO-ARGILEUX; L-Li, LOAM LIMONEUX; L, LOAM; L-S, LOAM SABLEUX; Li, LIMON; S-L, SABLE LOAMEUX; S, SABLE. SOURCE : SYSTÈME CANADIEN DE CLASSIFICATION DES SOLS.	29
FIGURE 14. CLASSIFICATION GRANULOMÉTRIQUE EN FONCTION DE DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE.....	30
FIGURE 15. ÉLÉMENTS ANALYSÉS À L'ICP-MS.	31
FIGURE 16. CARTES DES TEXTURES DES SOLS ET DE L'ORIGINE DES DÉPÔTS QUATÉNAIRES OBTENUES PAR OBSERVATIONS QUALITATIVES EFFECTUÉES SUR LE TERRAIN. LES POINTS INDIQUENT LES SITES VISITÉS.	33

FIGURE 17. ALTITUDE DANS LA ZONE D'ÉTUDE ET RELATION AVEC LA TEXTURE DES SOLS. LE GRADIENT D'ALTITUDE EST FOURNI PAR UN	
MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN RÉGIONAL	34
(DONNÉES NUMÉRIQUES D'ÉLEVATION DU CANADA, 031B, OGDENSBURG, 1991).	35
FIGURE 18. COMPARAISON ENTRE LA CARTOGRAPHIE PÉDOLOGIQUE RÉALISÉE EN 1943 ET LES TEXTURES DES SOLS DÉCRITES SUR LE TERRAIN	
AU COURS DE CETTE ÉTUDE.	36
FIGURE 19. PH MESURÉS DANS LES SOLS.....	38
FIGURE 20. TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS. LA MESURE A ÉTÉ OBTENUE PAR PERTE AU FEU.	40
FIGURE 21. POTASSIUM PRÉSENT DANS LE SOL (PPM). EXTRACTIONS MELICH-3.....	42
FIGURE 22. CONCENTRATIONS EN CADMIUM ÉCHANGEABLE DANS LES SOLS (PPM). EXTRACTIONS MELICH-3.....	43
FIGURE 23. MERCURE TOTAL DANS LES SOLS.	44
FIGURE 24. SITES DÉPASSANT LES CRITÈRES A (PETITS POINTS NOIRS) ET B (GROS POINTS NOIRS) DU MDDEFP POUR LE MERCURE TOTAL.	
LES SITES ÉCHANTILLONNÉS AVEC DES CONCENTRATIONS INFÉRIEURES AU CRITÈRE A SONT INDICUÉS AVEC DES CROIX.....	45
FIGURE 25. RELATIONS ENTRE L'OCCUPATION DU SOL OBSERVÉE AU SOL (CERCLES) ET PRÉDITE PAR LE MODÈLE (FOND DE CARTE).	47
FIGURE 26. MODÈLE D'OCCUPATION DU SOL. QUATRE CLASSES ONT ÉTÉ RETENUES : FORÊTS (EN VERT), ZONE DE VÉGÉTATION BASSE ET	
ZONES AGRICOLES (JAUNE), ZONE URBAINES ET CONSTRUITES (VIOLET) ET EAU (BLEU). LA RÉOLUTION DU MODÈLE EST DE 30 M. LE	
RECTANGLE NOIR INDIQUE LA ZONE D'ÉTUDE APPROXIMATIVE.....	48
FIGURE 27. RELATIONS ENTRE LA TEXTURE DES SOLS, L'ORIGINE DES DÉPÔTS ET L'OCCUPATION DU SOL.....	49
FIGURE 28. RELATION ENTRE LE PH DU SOL ET L'OCCUPATION DU SOL.	50
FIGURE 29. RELATION SPATIALE ENTRE LES ANOMALIES DE CO ₂ , DE CH ₄ ET D'HYDROCARBURES GAZEUX. LES ANOMALIES CORRESPONDENT	
AUX 5% DES VALEURS LES PLUS FORTES (95 ^{ÈME} PERCENTILE).....	52
FIGURE 30. VUE SYNTHÉTIQUE DE LA MÉTHODE UTILISÉE POUR ÉTABLIR ET VALIDER UN MODÈLE PRÉDICTIF DES TERRITOIRES OÙ DES	
ANOMALIES EN HYDROCARBURES GAZEUX PEUVENT ÊTRE RENCONTRÉES.	53
FIGURE 31. PROJECTION DES SCORES DES DEUX PREMIÈRES COMPOSANTES PRINCIPALES DE L'ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES	
EFFECTUÉE SUR LES 7 BANDES DE L'IMAGE LANDSAT.	54
FIGURE 32. DISTRIBUTION DES ANOMALIES EN CO ₂ ET CH ₄ (POINTS ROUGES) PAR RAPPORT AUX VALEURS DES DEUX PREMIÈRES	
COMPOSANTES DE L'ACP EFFECTUÉE SUR LES 7 BANDES DE L'IMAGE LANDSAT.....	55

FIGURE 33. REPRÉSENTATION DU KERNEL DE DENSITÉ POUR LES ANOMALIES DE CO ₂ ET DE CH ₄ EN FONCTION DES DEUX PREMIÈRES COMPOSANTES DE L'ACP EFFECTUÉE SUR LES 7 BANDES DE L'IMAGE LANDSAT	56
FIGURE 34. LOCALISATION DES ANOMALIES EN CO ₂ ET CH ₄ OBSERVÉES (ASTÉRISQUES) ET SUPERPOSITION AUX ANOMALIES PRÉDITES COMME ABSENTES (PIXELS GRIS) ET PRÉSENTES (PIXELS BLANCS).....	57
FIGURE 35. LOCALISATION DES ANOMALIES EN HYDROCARBURES GAZEUX OBSERVÉES (ÉTOILES) ET SUPERPOSITION AUX ANOMALIES PRÉDITES COMME ABSENTES (PIXELS GRIS) ET PRÉSENTES (PIXELS BLANCS).....	58
FIGURE 36. SUPERPOSITION DES ANOMALIES EN HYDROCARBURES GAZEUX OBSERVÉES (ÉTOILES) ET EN CO ₂ ET CH ₄ (ASTÉRISQUES). LES PETITS POINTS NOIRS REPRÉSENTENT LES SITES ÉCHANTILLONNÉS MAIS OÙ AUCUNE ANOMALIE N'A ÉTÉ DÉTECTÉE.	59
FIGURE 37. DISTRIBUTION DES ANOMALIES EN CO ₂ (POINTS ROUGES) PAR RAPPORT AUX VALEURS DES DEUX PREMIÈRES COMPOSANTES DE L'ACP EFFECTUÉE SUR LES 7 BANDES DE L'IMAGE LANDSAT.....	60
FIGURE 38. REPRÉSENTATION DU KERNEL DE DENSITÉ POUR LES ANOMALIES DE CO ₂ EN FONCTION DES DEUX PREMIÈRES COMPOSANTES DE L'ACP EFFECTUÉE SUR LES 7 BANDES DE L'IMAGE LANDSAT.....	61
FIGURE 39. LOCALISATION DES ANOMALIES EN CO ₂ OBSERVÉES (CIBLES) ET SUPERPOSITION AUX ANOMALIES PRÉDITES COMME ABSENTES (PIXELS GRIS) ET PRÉSENTES (PIXELS BLANCS).	62
FIGURE 40. LOCALISATION DES ANOMALIES EN HYDROCARBURES GAZEUX OBSERVÉES (ÉTOILES) ET SUPERPOSITION AUX ANOMALIES PRÉDITES COMME ABSENTES (PIXELS GRIS) ET PRÉSENTES (PIXELS BLANCS).....	63
FIGURE 41. SUPERPOSITION DES ANOMALIES EN HYDROCARBURES GAZEUX OBSERVÉES (ÉTOILES) ET EN CO ₂ (CIBLES). LES PETITS POINTS NOIRS REPRÉSENTENT LES SITES ÉCHANTILLONNÉS OÙ AUCUNE ANOMALIE N'A ÉTÉ DÉTECTÉE.	64
FIGURE 42. COMPARAISON DES ZONES PRÉDITES COMME ANOMALIQUES À PARTIR DES CONCENTRATIONS EN CO ₂ RECUEILLI À LA SURFACE DES SOLS ET LES CONCENTRATIONS DE CO ₂ ET DE CH ₄ ÉCHANTILLONNÉ À 50 CM DE PROFONDEUR.	65

LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 1. NORMALES CLIMATIQUES À LA STATION DE BÉCANCOUR ENTRE 1971 ET 2000 (SOURCE : MDDEFP).....	15
TABEAU 2. CLASSES D'OCCUPATION DU SOL	25
TABEAU 3. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES PH DES SOLS	39
TABEAU 4. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS.....	40
TABEAU 5. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CONCENTRATIONS (PPM) EN ÉLÉMENTS ÉCHANGEABLES DANS LES SOLS. L'EXTRACTION A ÉTÉ EFFECTUÉE SELON LA PROCÉDURE MELICH-3.	41
TABEAU 6. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CONCENTRATIONS (PPB) EN MERCURE TOTAL DANS LES SOLS	45
TABEAU 7. CORRESPONDANCE ENTRE L'OCCUPATION DU SOL OBSERVÉE SUR LE TERRAIN ET LE MODÈLE DE CLASSIFICATION DU SOL OBTENU GRÂCE AUX IMAGES DE TÉLÉ DÉTECTION.	46

Préambule

Le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) 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 :

Inventaire

Caractérisation

Capacité de stockage

Test-pilote

Enjeux socio-économiques

Le présent rapport sur l'état des connaissances de la région de Bécancour pour la séquestration géologique du CO₂ cadre dans le volet caractérisation.

Sommaire

La chaire de séquestration géologique du CO₂ de l'INRS a procédé de 2010 à 2012 à des études environnementales dont les finalités étaient d'obtenir des valeurs de référence avant injection pour juger des modifications futures et d'identifier des zones sensibles devant faire l'objet de suivis. Ce premier rapport présente tout d'abord une description de la zone d'étude (géographie, éléments humains et de biodiversité devant faire l'objet d'attention). La région de Bécancour présente un aspect contrasté. Les industries lourdes (aluminerie, industries chimiques, ...) côtoient une flore et une faune diversifiées associées aux zones humides et au fleuve Saint-Laurent. Les résidents de la région, essentiellement regroupés dans la ville de Bécancour, trouvent dans ces territoires des sources d'activités professionnelles et récréatives (chasse, pêche).

Les observations conduites sur le terrain et l'analyse d'échantillons de sols permettent d'obtenir un portrait physicochimique de la région. Les dépôts quaternaires sur lesquels se sont développés les sols sont organisés dans un axe perpendiculaire au fleuve. Des alluvions ont été déposées au nord-ouest et occupent les territoires de plus faible altitude. Les dépôts marins et lacustres, plus anciens, déposés par la mer de Champlain, s'étendent plus au sud-est. Des tills glaciaires, intercalés entre les deux ensembles sont aussi rencontrés mais occupent une surface réduite. Les sols sont plutôt acides avec des pH s'étalant sur une gamme allant de 2.6 à 7.7. Les sols plus sableux situés au sud-est sont en général plus acides que ceux plus argileux situés au nord-ouest.

Les concentrations en éléments échangeables et totaux montrent que des rehaussements sont observés localement pour certains éléments potentiellement toxiques. Cette présence de contaminants dans les sols impose de se questionner sur leur devenir en cas de percolation de CO₂ en surface. En cas d'augmentation des concentrations du CO₂ dans les sols, un abaissement du pH et une libération plus importante des éléments accumulés sont attendus.

Finalement, dans un dernier volet, une méthode permettant d'optimiser l'échantillonnage des hydrocarbures gazeux est présentée. Les données d'entrée sont les réflectances d'une image Landsat et les mesures de concentrations du CO₂ et du CH₄ dans les sols. Ces données permettent d'établir un modèle de présences potentielles d'anomalies en hydrocarbures gazeux. Les anomalies en hydrocarbures gazeux observées se rencontrent très largement dans les territoires prédits comme potentiellement favorables. L'application de cette méthode aurait permis de réduire de moitié le territoire prospecté pour les hydrocarbures gazeux.

Le rapport est complété de fichiers de compilation des données. Les mesures réalisées dans ce projet pourront en effet être utilisées dans le futur à des fins comparatives ou pour d'autres travaux. Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse utilisées sont des méthodes standardisées utilisées au Québec et au MDDEFP en particulier. Un grand soin a été porté aux différentes opérations réalisées sur le terrain et au laboratoire afin de produire des données de qualité.

1. Introduction

La séquestration géologique du dioxyde de carbone (CO₂) est une des solutions envisagées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (IPCC, 2007). Il s'agit de capter le CO₂ à la source (au niveau des grands émetteurs), de le purifier, de le transporter et de le stocker en profondeur. Le CO₂ concentré dans les réservoirs pourrait même être à l'avenir utilisé comme source de carburant de synthèse ou valorisé dans d'autres applications (Song, 2006). Cependant, aussi prometteuse que soit cette technologie, les exemples observés ailleurs dans le monde ont montré que la réalisation des projets de séquestration géologique du CO₂ (SGC) était conditionnelle à leur acceptabilité sociale (Huijts et al., 2007). La SGC est encore largement méconnue du public (Moutenet et al., 2012) et les applications effectives du procédé encore rares à l'échelle mondiale. La mise en œuvre d'un programme de SGC nécessite donc une démonstration claire que ces activités ne s'accompagnent pas de problèmes environnementaux (Sharma et al., 2007). La confiance et l'adhésion des différents acteurs s'obtiennent par l'information concernant le procédé mais surtout grâce à une surveillance approfondie de l'environnement et une communication transparente des résultats de ces suivis.

La chaire de séquestration géologique du CO₂ de l'INRS a très tôt considéré ces nécessités. Des travaux de recherche ont été entrepris pour dresser un portrait de l'environnement de la zone d'étude retenue (valeurs de référence) et pour cibler des zones sensibles à l'intérieur de ce territoire devant faire l'objet de suivis ultérieurs. Les variables mesurées pour atteindre ces objectifs étaient les concentrations et les ratios isotopiques de gaz échantillonnés en surface des sols et dans l'atmosphère. Les espèces retenues sont les hydrocarbures gazeux (éthane, propane et butane), le radon, le méthane (CH₄) et le dioxyde de carbone (CO₂).

Comme pour toute variable mesurée in situ, des biais potentiels sont à considérer lors de l'interprétation des résultats. Les résultats obtenus peuvent dépendre des méthodes utilisées ou des populations et des milieux échantillonnés. Par exemple, les fortes valeurs anormales pour certains gaz ou, au contraire, leur absence dans certaines parties du territoire peuvent être reliées à des modifications des couvertures superficielles et en particulier des sols. Pour interpréter l'origine des anomalies rencontrées, une caractérisation poussée du milieu dans lequel sont recueillis les gaz de sol est donc nécessaire.

Parmi différents facteurs, la physicochimie des sols et l'occupation du territoire sont des éléments à considérer. Les couvertures en place peuvent en soi influencer les mesures effectuées mais elles traduisent aussi des changements des caractéristiques des sols. Dans les territoires essentiellement agricoles, les zones boisées sont essentiellement des zones non fertiles du fait de leurs caractéristiques pédologiques particulières.

Plusieurs espèces de gaz ont été échantillonnées. Pour cibler des zones sensibles, une approche multicritères est en effet préférable. Un axe de recherche dont les résultats sont intégrés dans ce rapport était de comprendre comment les mesures de certains gaz, faciles à obtenir, pouvaient permettre d'optimiser l'échantillonnage d'autres gaz plus difficiles à mesurer. Ce volet exploratoire s'est appuyé sur un apport de l'information multispectrale fournie par une image Landsat. L'éthane, le propane, le butane et le radon présentent l'avantage d'être moins influencés par l'activité en surface des sols que le CO₂ et le CH₄. Il est courant d'attribuer une origine thermogénique aux hydrocarbures gazeux. Au contraire, les mesures de CO₂ et de CH₄ peuvent avoir une origine biogénique. Ils peuvent être produits par la décomposition de la matière organique, l'activité microbienne, ou d'autres processus biogéniques. Pourtant, malgré les biais potentiels, ils peuvent être aussi de bons indicateurs de la présence de remontées de gaz profonds (Jones et Pirkle, 2007; Klusman, 2011). L'échantillonnage de ces gaz est plus facile que celui des hydrocarbures gazeux. L'instrumentation existante permet de fournir des lectures rapides avec le niveau de précision adéquate pour un coût réduit, au sol ou grâce à des levés aéroportés. Il n'en va pas de même avec la mesure des concentrations en hydrocarbures gazeux qui réclament des dispositifs plus sophistiqués comme des chaînes de purification couplées à des chromatographes. Il existe même des méthodes aéroportées utilisant des instrumentations laser permettant de couvrir de vastes territoires et d'obtenir une imagerie exhaustive de l'ensemble des zones concernées (www.boreal-laser.com). Le recueil des données de CH₄ et de CO₂ est donc particulièrement attractif pour surveiller de larges étendues et de manière répétée. Ceci même si des confusions sont possibles quant à l'origine thermogénique ou biogéniques des anomalies observées.

Finalement, ce rapport répond à plusieurs objectifs :

- procéder à la description de la zone d'étude,

- établir un modèle d'occupation du sol adapté aux objectifs du projet,
- mesurer les données nécessaires à l'interprétation des données des gaz de sol,
- tester la possibilité d'optimiser les échantillonnages d'hydrocarbures gazeux avec des mesures de CO_2 et de CH_4 et de l'information satellitaire.

Les trois premiers objectifs visent à produire une information complémentaire facilitant l'interprétation des données collectées. Ils sont regroupés dans ce rapport car ils ont en commun d'être périphériques à l'échantillonnage des gaz de surface.

2. Zone d'étude

2.1. Situation géographique

Au Québec, un bon site pour la SGC pourrait se situer dans la région de Bécancour (<http://chaireco2.ete.inrs.ca/?q=fr/objectifs>). C'est dans cette région qu'a été définie la zone d'étude pour l'échantillonnage des gaz de sol (Fig. 1).

Ce territoire d'une extension initiale de 10 par 8 km a été étendu par la suite vers le sud.



Figure 1. Zone d'étude. Vue aérienne générale. La ligne pointillée en rouge représente les limites de notre zone d'étude.

2.2. Conditions météorologiques

La zone d'étude est l'objet d'un climat continental tamponné par le fleuve Saint-Laurent. La température moyenne annuelle avoisine les 5 degrés Celsius et les précipitations totales sont un peu au-dessus de

1000 mm. Les normales climatiques produites avec les données enregistrées par le MDDEFP pour la station de Bécancour entre 1971 et 2000 révèlent les variabilités interannuelles (Tab. 1).

Tableau 1. Normales climatiques à la station de Bécancour entre 1971 et 2000 (source : MDDEFP).

									Période d'échantillonnage					
	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	Août	sept.	oct.	nov.	déc.	année	
Températures														
Moy. quotidienne (°C)	-12.4	-10.4	-4	4.3	12.1	16.9	19.8	18.4	13.2	6.8	0.1	-8.5	4.7	
Max. extrême (°C)	9.4	30	16.7	30	33	34	35.6	35	34.4	27.2	20	15		
Min. extrême (°C)	-38.3	-38.3	-33	-16.1	-5.6	0	3.5	1	-6.1	-11.1	-23.3	-39		
Précipitations														
Pluie (mm)	22.3	16.4	36.6	67.9	95.4	94.9	98.7	120	106.7	92.8	71.8	31.6	854.7	
Neige (cm)	53.7	45.8	34.5	8.9	0	0	0	0	0	0.8	27	59.4	230.1	
Total (mm)	76	62.2	71	76.8	95.4	94.9	98.7	120	106.7	93.6	98.8	91	1084.7	
Journées avec pluie:														
>= 25 mm	0.1	0.1	0.1	0.2	0.6	0.7	1.1	1	0.9	0.7	0.5	0.1	6	

Juillet est le mois où le nombre de jours de fortes pluies (> 25 mm) est le plus important (Fig. 2). Ce mois est à déconseiller pour les travaux de terrain

envisagés car les sols saturés d'eau se prêtent mal à l'échantillonnage des gaz de sols et le prélèvement d'échantillons de sol.

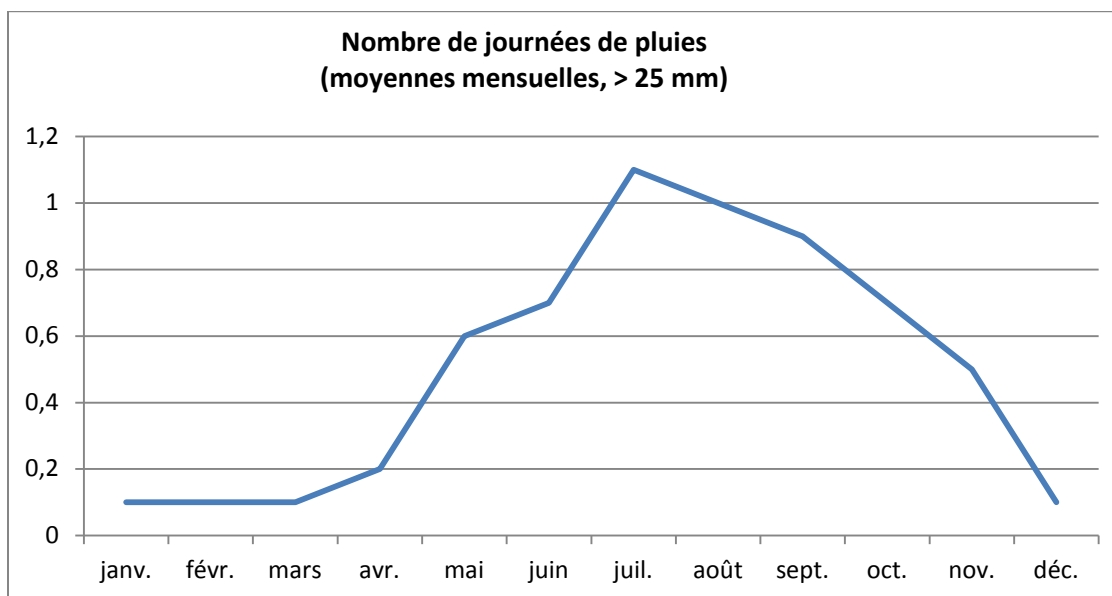


Figure 2. Nombre de journées de fortes pluies pour la station météorologique de Bécancour pour la période 1971-2000 (moyennes mensuelles, pluies > 25 mm)

De fortes variations de la température (18.4 – 0.1 degrés Celsius) sont observables sur les normales climatiques pour la période d'échantillonnage retenue (août-novembre). La température du sol doit donc être

enregistrée systématiquement au cours des travaux de terrain et il est nécessaire de vérifier l'absence d'effets sur la variabilité des concentrations ou ratio isotopiques des gaz mesurés.

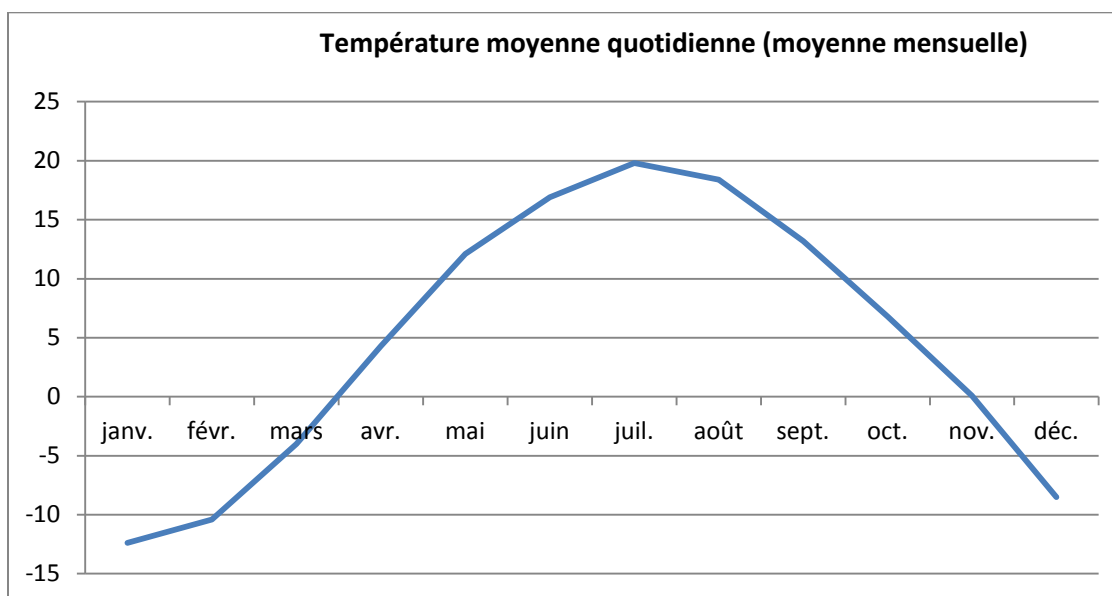


Figure 3. Température moyenne mensuelle pour la station météorologique de Bécancour pour la période 1971-2000.

Finalement, la période d'échantillonnage ne devrait pas se prolonger au-delà du mois de novembre. À partir de ce mois, les sols risquent d'être gelés (températures négatives, fig. 3).

La fréquence et la vitesse des vents enregistrées sur une période de 8 ans sur le complexe nucléaire de Gentilly situé dans notre zone d'étude montrent que les vents dominants sont orientés SO-NE, c'est-à-dire dans l'axe du fleuve (Fig. 4).

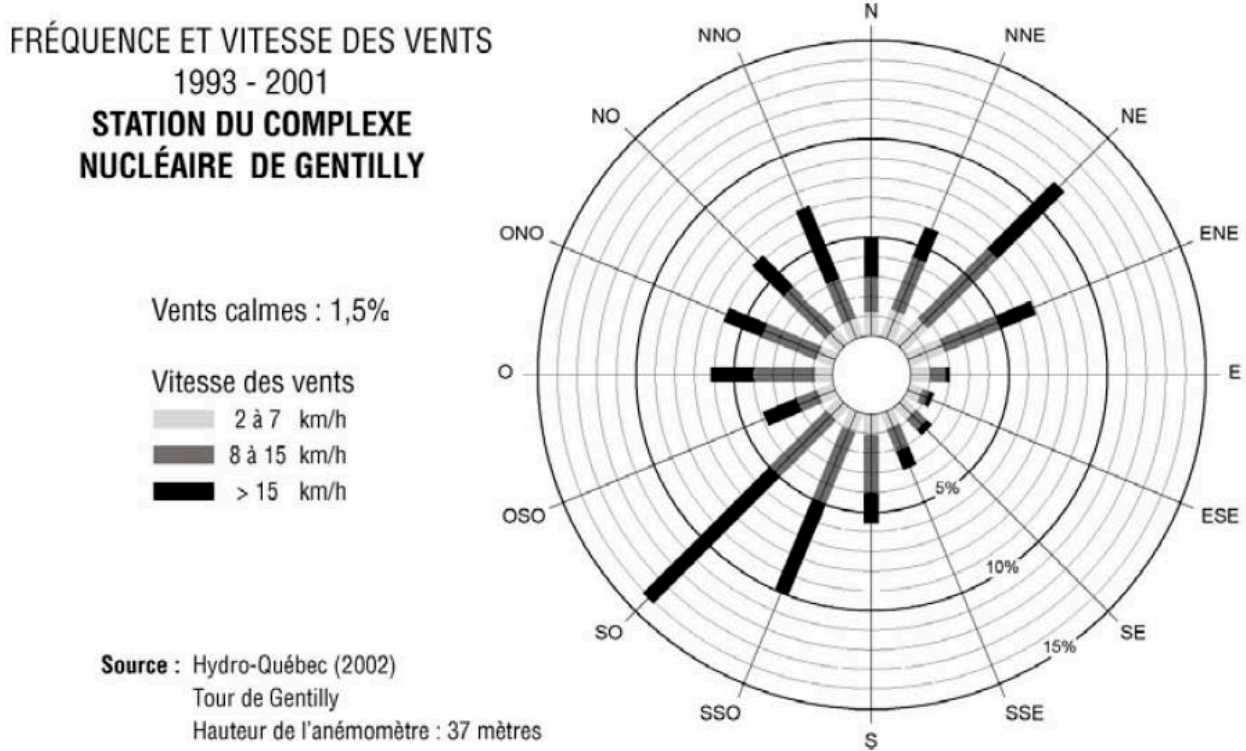


Figure 4. Rosace de la direction dominante des vents en fonction de leur vitesse.

Les vents sont assez forts. Les périodes de vent calme représentent seulement 1.5% alors que les vents > 15 km/h avoisinent les 30%. Les gaz atmosphériques sont donc susceptibles de se disperser rapidement, ce qui suggère de privilégier plutôt les échantillonnages de gaz dans les sols pour saisir des variabilités locales.

2.3. Qualité de l'air

Du fait de la concentration importante d'industries lourdes, métallurgique, chimique et la présence du complexe nucléaire de Gentilly, de nombreuses données concernant la qualité de l'air sont enregistrées par le MDDEFP ou bien directement par

les industriels (Alcan, Hydro-Québec). La municipalité de Bécancour et le parc industriel sont associés à ces campagnes de mesures. Les informations publiées ne révèlent pas de problèmes importants récurrents dans la zone d'étude.

2.4. Biodiversité

À une échelle régionale, la région dans laquelle s'inscrit notre zone d'étude est aussi particulièrement riche d'un point de vue écologique. En amont, le lac Saint-Pierre fait l'objet de deux classements internationaux (site RAMSAR et réserve de Biosphère) en raison notamment de son importance pour la migration des oiseaux aquatiques (Fig. 5).

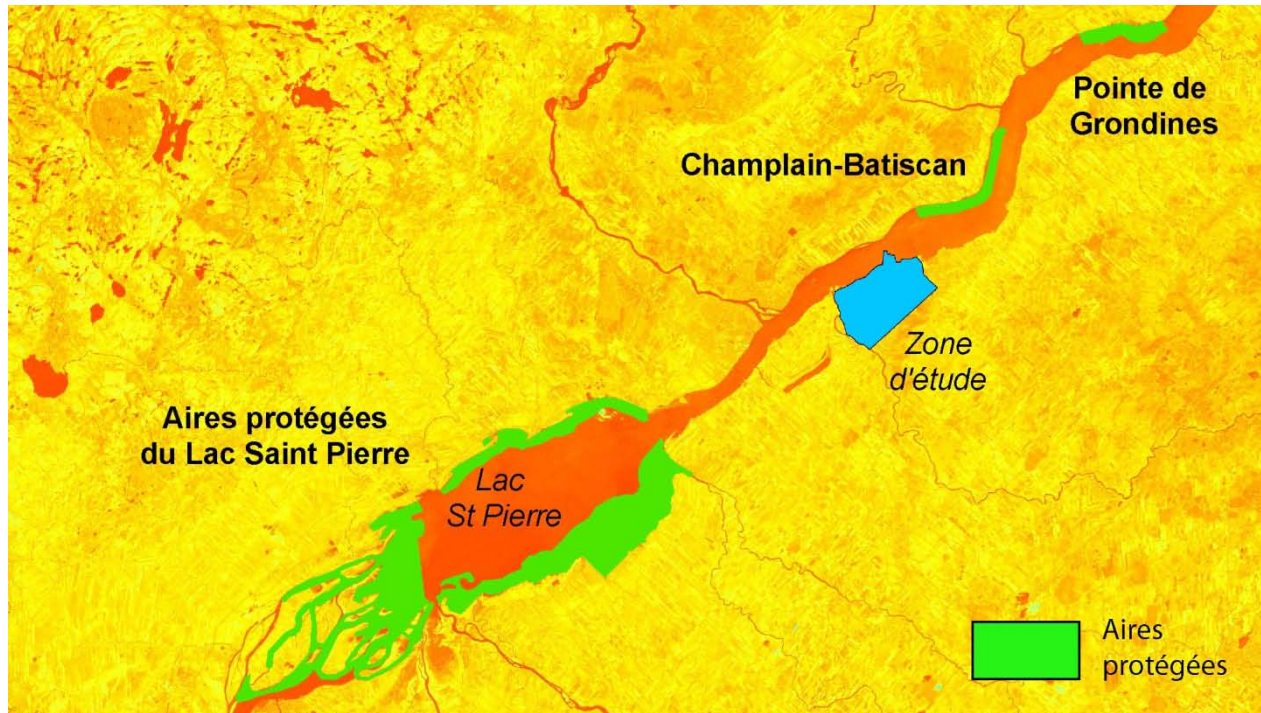


Figure 5. Aires protégées dont la superficie est de 1000 hectares ou plus aux environs de la zone d'étude (source : données-cadres nationales de l'Atlas du Canada à l'échelle de 1/1 000 000, Environnement Canada).

En aval, les aires protégées de Champlain-Batiscan et Pointe de Grondines soulignent l'importance écologique des rives du Saint-Laurent. A une échelle plus locale, il existe des aires protégées de surface plus modestes, comme le marais Léon Provancher. Les îles de l'embouchure de la rivière Bécancour, les terres localisées de part et d'autre de cette rivière et les rives du fleuve Saint-Laurent font partie d'un système de zones humides comprenant des marécages d'eau libre, des marécages arborés et des forêts riveraines d'érables argentés, de frênes noirs, d'ormes d'Amérique et de peupliers baumiers. Ces zones sont d'une grande valeur écologique pour diverses communautés biologiques.

La végétation aquatique prospère dans les grandes battures du bord du fleuve, les marais et les autres zones humides. Les espèces végétales émergentes rencontrées sont la vallisnérie d'Amérique (*Vallisneria americana*), des scirpes (*Scirpus americanus*, *S. lacustris*, *S. fluviatilis*, *S. acutus*) et les sagittaires (*Sagittaria latifolia*). Les macrophytes aquatiques viennent compléter ces communautés :

potamots (*Potamogeton richardsonii*, *P. pectinatus*), myriophylle (*Myriophyllum* sp.), cératophylle (*Ceratophyllum demersum*), naïade flexible (*Najas flexilis*) et l'alisme plantain d'eau (*Alisma gramineum*) (Armelin et Mousseau, 1998). Les milieux humides sont l'objet d'une attention particulière concernant la conservation des espèces végétales. La direction du patrimoine écologique et du développement durable du MDDEFP a recensé trente-quatre espèces de plantes menacées ou vulnérables dans les milieux humides de cette région (CNPNQ-MENV, 2001). Certaines se rencontrent dans notre zone d'étude : gratiole négligée du Saint-Laurent (*Gratiola neglecta glaberrima*), rubanier rameux (*Sparganium androcladum*) et la platanthère à gorge tuberculée (*Platanthera flava herbicola*), bident discoïde (*Bidens discoideus*), éragrostis hypnoïde (*Eragrostis hypnoides*) et la lindernie litigieuse (*Lindernia dubia inundata*) (Sabourin, 2001).

Les amphibiens et les reptiles sont potentiellement bien représentés dans la zone (Bider et Matte, 1994). Les espèces observées dans notre zone d'étude sont la

couleuvre rayée (*Thamnophis sirtalis*), la salamandre à points bleus (*Ambystoma laterale*), le ouaouaron (*Rana catesbeiana*), le crapaud d'Amérique (*Bufo americanus*), la rainette crucifère (*Pseudacris crucifer*) et des grenouilles : grenouille des bois (*Rana sylvatica*), léopard (*Rana pipiens*) et verte

(*Rana clamitans*) (Nove Environnement, 2001, fig. 6). Plus au sud de la zone, dans les boisés riverains, des populations de tortues des bois (*Clemnis insculpta*), une espèce au statut préoccupant, ont également été recensées (<http://www.crecq.qc.ca>).



Figure 6. Les milieux humides de la zone d'étude sont des zones de forte biodiversité.

La diversité des milieux et en particulier la présence de zones humides induit la présence d'une avifaune diversifiée dans notre zone d'étude (banque de données Étude des populations d'oiseaux du Québec, AQGO). Une centaine d'espèces est susceptible de nicher dans la zone d'étude. Des espèces communes de lisières forestières colonisent les forêts riveraines mais aussi des espèces faisant l'objet de plus

d'attention d'un point de vue conservation. Le pygargue à tête blanche (*Haliaeetus leucocephalus*) utilise les grands arbres morts, situés dans le parc industriel en lisière du fleuve, comme reposoir. Ces grands chicots sont peut-être utilisés également pour la nidification du canard branchu (*Aix sponsa*) observé dans les marais. Le faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) est observé le long du fleuve. Le petit

blongios (*Ixobrychus exilis*) et le héron vert (*Butorides virescens*), ont aussi été observés lors des campagnes d'échantillonnage. Au sud de l'autoroute 30 un site de nidification reconnu du hibou des marais (*Asio flammeus*), une espèce désignée vulnérable au Québec, a été recensé (Hydro-Québec production, 2002). La pie-grièche migratrice (*Lanius ludovicianus*), également menacée est observée dans les zones de végétation basse et arbustive du parc industriel. Une buse à épaulettes (*Buteo lineatus*), une espèce au statut préoccupant, fréquentait la partie ouest de la zone d'étude au moment des échantillonnages (observations personnelles).

Parmi les autres espèces rencontrées, le papillon monarque (*Danaus plexippus*), également avec un statut d'espèce préoccupante, a également été observé sur l'ensemble de la zone d'étude. En ce qui concerne les mammifères, aucune espèce ayant un statut particulier ne semble être rencontrée sur la zone.

2.5. Environnement humain

Les installations industrielles lourdes et les infrastructures routières présentent dans le parc industriel pourrait laisser penser à première vue que ces territoires présentent peu de valeur en terme écologique ou de qualité d'habitat. Il n'en est rien. La ville de Bécancour située à l'ouest de la zone d'étude et du parc industriel est un lieu de villégiature de qualité. Les résidences sont de caractère rural. La proximité de la rivière Bécancour donne beaucoup de

charme à l'endroit. Les exploitations agropastorales apportent une note bucolique que renforcent encore les aménagements urbains (espaces verts, pistes cyclables). L'ensemble confère une note très esthétique. Ces considérations ne sont pas anecdotiques car elles déterminent très certainement l'attachement de la population à sa région et en particulier à tout ce qui se rapporte à l'environnement (conversations avec la population locale lors des travaux de terrain).

L'île Montesson, au nord de Bécancour, est une zone caractéristique de la complexité des milieux et de la relation forte entre les populations et leur environnement. Elle est composée de peuplements d'érables argentés (50%), de terres agricoles (35%) et de marais (15%). Cette zone est l'objet d'aménagements réalisés par Canard Illimités pour l'avifaune (sauvagine et autres espèces). L'île de Montesson est aussi un espace vert à vocation récréative. La petite Floride, au nord-ouest est utilisée pour la mise à l'eau d'embarcation, la pêche et aussi la baignade. La pêche, le piégeage et la chasse aux oiseaux d'eaux sont des activités largement pratiquées.

2.6. Cadre pédologique

Des données existent concernant les sols de la zone d'étude. Une carte pédologique a été réalisée en 1948 par Lucien Choinière et Léonard Laplante (Fig. 7).

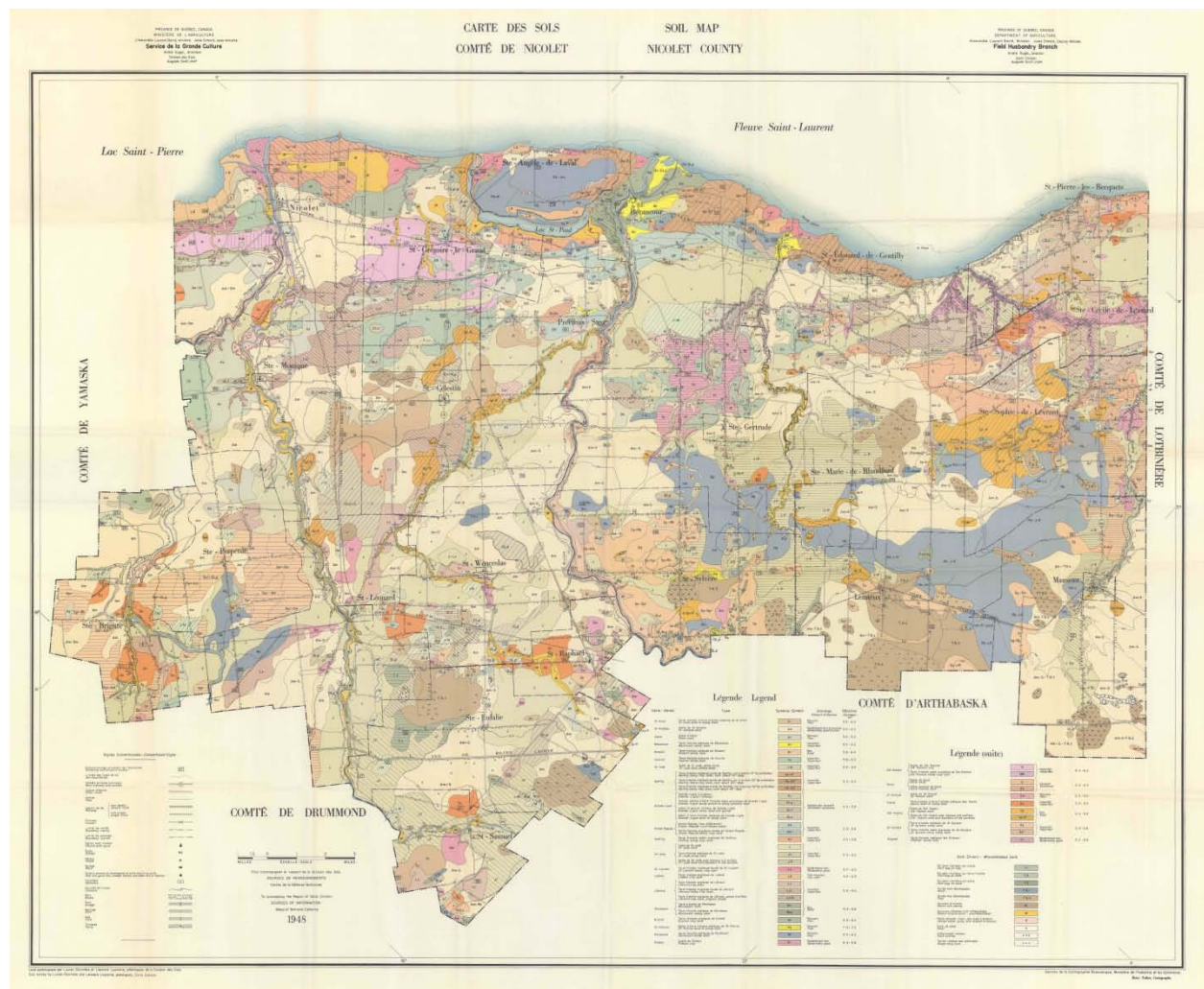


Figure 7. Carte pédologique de la région de Nicolet réalisée en 1943 par les services du ministère de l'agriculture.

Ce travail de qualité, effectué par les équipes d'ingénieurs agronomes du ministère de l'agriculture est difficilement utilisable pour les besoins de cette étude. Les données sont anciennes mais les sols évoluent relativement peu rapidement. Par contre, les méthodes de cartographie pédologique ont changé énormément depuis cette époque. Les agronomes distinguaient de grandes unités homogènes par interprétation visuelle et paysagère des variabilités pédologiques. Les limites entre chaque unité étaient tracées à la main. Quelques pédon (fosses pédologiques) étaient ensuite réalisés à l'intérieur de chaque unité (les séries). Les mesures effectuées sur

ces pédon étaient extrapolées à l'ensemble de l'unité. Cette manière de procéder demande beaucoup d'expertise et introduit beaucoup de subjectivité lorsqu'il s'agit ensuite d'associer à chaque point d'échantillonnage des caractéristiques physicochimiques. Par exemple, il est peu probable que le pH ne varie pas à l'intérieur de grandes unités de milliers d'hectares.

Des études plus récentes des dépôts quaternaires existent également, mais elles sont souvent réalisées à des niveaux régionaux. Leur résolution est trop faible pour pouvoir les exploiter à un niveau local.

À l’opposé, il est possible d’utiliser des données ponctuelles, recueillies lors de forages géotechniques par exemple mais dans ce cas, le faible nombre d’observations (à une échelle locale) ainsi que leur répartition non-aléatoire (les forages sont implantés dans des sites spécifiques en lien avec les objectifs des projets pour lesquels ils sont réalisés), fait que les données recueillies sont difficilement interpolables spatialement.

Pour cette étude, une description des sols au niveau des points de prélèvement des gaz serait donc nécessaire.

3. Valorisation future des travaux effectués

3.1. Standardisation des méthodes de prélèvement et d’analyse

Pour des comparaisons futures, les techniques de prélèvement et d’analyses utilisées sont celles en vigueur au gouvernement du Québec. En particulier, les travaux de prélèvement se sont appuyés sur « Le guide d’échantillonnage des sols à des fins environnementales » (MDDEFP, 2009). De la même façon, la préparation des sols avant analyse a été effectuée en respectant les protocoles décrits dans la méthode DR-12-PEA (Préparation des échantillons de sol agricole, MDDEFP 2003). Les attaques partielles des échantillons (Melich III) ont été réalisées en collaboration avec les laboratoires du MRN. M. Carol De Blois, responsable du laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière, nous a fourni des échantillons de référence déjà analysés dans son laboratoire qui nous ont permis de valider nos analyses. Les attaques totales, ont été effectuées sur plaque, dans des contenants en Téflon en utilisant une série d’acides concentrés (nitrique, perchlorique et fluorhydrique). Cette méthode standard est utilisée par les différentes équipes de recherche de l’INRS.

La préparation des échantillons a été réalisée par des contractuels sous la supervision de professionnels. Les analyses granulométriques laser, les attaques acides et les mesures avec les spectromètres de masse (ICP) ont été effectuées par des techniciens professionnels de l’INRS ou le premier auteur de ce rapport.

Le soin apporté à la collecte des données devrait permettre de les verser dans les banques de données du MDDEFP et de pouvoir les utiliser postérieurement à des fins de comparaison par d’autres équipes de recherche.

3.2. Regroupement des données et métadonnées

Un objectif principal de cette étude est de fournir des mesures de référence pour vérifier la non-influence de l’activité de séquestration géologique du CO₂ sur l’environnement. Il est donc essentiel de préparer les données pour qu’elles puissent être utilisées dans le futur. Pour ce faire, trois problèmes récurrents dans l’utilisation de données anciennes ont été considérés : format des données, documentation, support.

L’utilisation de données anciennes est souvent compliquée par les formats dans lesquels elles sont compilées. Le format le plus simple et le plus polyvalent a été préféré. Les données ont été compilées dans de simples fichiers ASCII au format (.txt). Les données se présentent sous forme de matrices vectorielles. Les variables mesurées sont les colonnes de la matrice et chaque ligne représente un site mesuré. Les séparateurs sont des tabulations. Il n’y a pas d’entête dans les fichiers (la première ligne contient les variables). Ces matrices sont importables dans n’importe quel logiciel courant d’analyse, les tableurs ou les éditeurs de texte. La redondance de l’information n’a volontairement pas été évitée. Par exemple, les coordonnées géographiques (X, Y) ou la date de prélèvement sont indiquées pour chaque ligne (site) des matrices. L’optimisation de l’espace requis ne présente plus le même problème que par le passé et de plus cette approche permet une utilisation directe des données (importation dans un SIG, analyses statistiques) sans recourir aux opérations de jointure de tables. L’utilisateur pourra par la suite optimiser la compilation de ces données pour les rendre compatibles avec le système d’archivage utilisé dans son organisation. Une documentation détaillée est fournie concernant les données. Il permet à l’utilisateur de comprendre comment les données ont été collectées et analysées et donc d’en saisir leur limite. Le même format ASCII a été utilisé pour ces métadonnées. Finalement, il est indiqué dans le fichier de métadonnées des coordonnées permanentes du chercheur en charge du projet qui pourra en cas de difficultés fournir les renseignements désirés.

4. Méthodes utilisées sur le terrain

4.1. Échantillonnages des sols sur le terrain

Au vu de l’information disponible, il n’était pas possible d’associer à chaque mesure de gaz des caractéristiques physicochimiques des sols dans lesquels ils avaient été recueillis (cf. section « cadre

pédologique »). Un échantillonnage des sols a donc été effectué au cours des deux automnes 2011 et 2012. Le plan d'échantillonnage uniforme, avec des

points espacés de 150 mètres, assure une bonne représentation de la zone (Fig. 8).

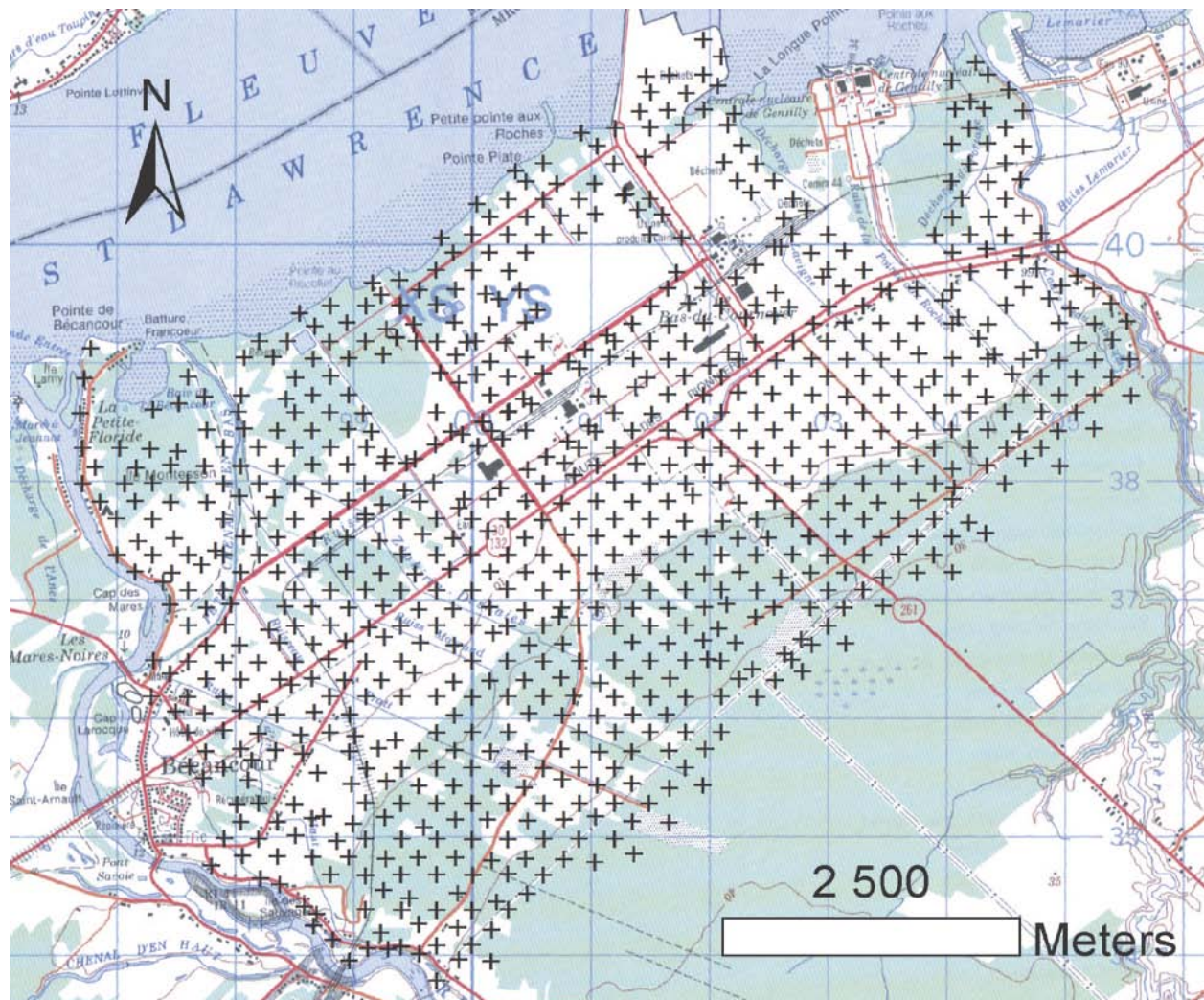


Figure 8. Sites d'échantillonnage des sols (croix noires). Les zones non couvertes correspondent à l'emplacement de grands sites industriels (fonderie, centrale nucléaire, ...).

Les sols ont, dans la majorité des cas, été échantillonnés sur les mêmes sites que ceux où ont été échantillonnés les gaz de sol. Les mesures sont donc colocalisées et peuvent être facilement associées les

unes aux autres par la suite. Sur chaque site, les textures et l'origine des dépôts ont été décrites afin de réaliser une cartographie pédologique (Fig. 9).



Figure 9. Échantillonnage des sols avec une tarière manuelle en acier inoxydable.

L'utilisation d'une tarière manuelle en acier inoxydable (Dendrotik) de faible diamètre permet de prélever sur chaque site un échantillon représentatif des 25 premiers centimètres de sol. Le faible diamètre permet de faciliter le prélèvement mais permet également de recueillir un échantillon moyen par site en répétant le prélèvement en 4 points différents (sous-échantillons et échantillon composite). Plusieurs échantillons de sol ont été recueillis pour réaliser les analyses physicochimiques en laboratoire.

Les échantillons recueillis sur le terrain dans des contenants hermétiques ont été pesés immédiatement pour obtenir le poids humide. Ils ont ensuite, pour la plupart, été séchés immédiatement à température ambiante. Chaque contenant était recouvert d'un tissu papier exempt de contamination (Kimwipes) pour éviter toute intrusion d'aérosols ou autre

contaminants pouvant venir fausser les analyses. Quelques échantillons trop humides ont d'abord été passés à l'étuve à 40 degrés Celsius pendant 48 heures pour éviter de potentielles transformations de l'échantillon (moisissure, dégradation de la matière organique, ...).

4.2. Description de l'occupation du sol sur le terrain

Des données complémentaires ont été également mesurées lors des prélèvements. L'occupation du sol a été estimée visuellement dans un rayon de 10 mètres par rapport au point de prélèvement. Des classes d'occupation du sol très générales mais adaptées à la zone d'étude ont été définies (Tab. 2).

Tableau 2. Classes d'occupation du sol

Classe d'occupation du sol	Description
Zone urbaine	Villes, villages, terrains occupés par des installations industrielles, routes
Zone de végétation basse agricole	Champs cultivés et pâturages utilisés pour l'élevage et la production de foin.
Zone de végétation basse non-agricole	Anciens terrains agricoles colonisés par une végétation basse et arbustive. Terrains industriels non utilisés et recouverts par des plantes basses colonisatrices
Zone forestière	Terrains couverts d'arbres de 7 mètres et plus (toute espèce d'arbres confondus). Les parcs urbains ou les autres localisations où les arbres sont présents à faible densité ne sont pas considérés comme des zones forestières.
Eau	Zone d'eau libre. Terrain non échantillonné. La classe a été retenue pour la classification des images satellitaires

Les champs labourés et nus ont également été classifiés dans la catégorie « zone de végétation basse agricole » car même s'ils étaient exempts de végétation basse au moment de l'échantillonnage, ils devaient l'être au moment de l'enregistrement de l'image satellite (juin, cf. section « Information multispectrale utilisée »). Par la suite, les zones de végétations basses non agricoles et agricoles ont été regroupées en une seule classe.

Une note de fiabilité (bonne, moyenne, mauvaise) a été associée à l'estimation visuelle de l'occupation du sol sur le terrain. Les difficultés étaient le plus souvent reliées aux discontinuités de l'occupation du sol sur le terrain. Par exemple, certains sites d'échantillonnage étaient situés en lisière de forêt et de champ agricole. La hauteur des végétations arborées a parfois également été une source d'ambiguïté : zone de végétation basse arbustive ou zone forestière? Par la suite, lors de l'analyse, les descriptions qualifiées de mauvaises ou moyennes ont été éliminées.

4.3. Mesure de données complémentaires sur le terrain

Des mesures de température et de conductivité électrique apparente ont été enregistrées sur les sites

au moment des prélèvements. Elles servent à contrôler les mesures pour d'éventuels biais. La conductivité électrique apparente est largement utilisée en agronomie comme descripteur synthétique des variabilités des caractéristiques des sols (pH, texture, humidité...). Une description des sols a aussi été effectuée.

5. Méthodes utilisées au laboratoire

5.1. Préparation des échantillons

Au laboratoire, les échantillons rapportés du terrain et séchés à l'air, ont été mis à l'étuve 48 heures à 45 degrés Celsius pour s'assurer de la bonne déshydratation. Ils ont été pesés à sec. La différence entre le poids sec et humide a fourni une humidité gravimétrique (terme employé en pédologie) qui a servi à juger de l'humidité des sols au moment du prélèvement (Fig. 10).



Figure 10. Humidité gravimétrique. Les échantillons sont pesés avant d’être séchés (humides) et après (secs). La différence entre les deux masses rapportées à la masse sèche de l’échantillon fournit le taux d’humidité des sols au moment des prélèvements.

Les échantillons ont ensuite été tamisés à 2 mm afin de fournir un matériel de base pour les analyses de pH, de (Fig. 11).

Les tamis en acier inoxydable ont été utilisés dans la majorité des cas (pH, granulométrie, Melich3) excepté pour les échantillons devant faire l’objet

d’attaques totales et de mesures des éléments traces. Pour éviter toute contamination, des tamis en matières plastiques ont été préférés. Moins résistants, ils ont été renouvelés plus souvent. Les particules végétales, les débris organiques grossiers ou les corps étrangers ont été éliminés visuellement.



Figure 11. Tamisage des échantillons.



Figure 12. Mesure du pH CaCl_2 .

5.2. Mesure du pH CaCl_2

Les mesures de pH ont été effectuées sur des échantillons séchés, tamisés à deux millimètres et placés dans une solution de chlorure de calcium (eau ultrapure et 0.01 mol/l de CaCl_2) (Fig. 12).

Le pH-mètre utilisé était calibré régulièrement dans des solutions d'étalonnage.

La mesure du pH dans une solution de CaCl_2 fournit des résultats plus reproductibles que ceux mesurés dans l'eau (meilleure solubilisation des éléments, moindre dépendance de la position de l'électrode dans la solution). De plus, cette solution se rapproche plus des solutions du sol d'un point de vue électrolytique.

5.3. Pertes au feu

Une masse de 3 g d'échantillon tamisé à 2 mm a été placée dans des creusets. La calcination a été

effectuée dans un four maintenu à 550 degrés Celsius pendant 2 h. Les creusets ont été pesés après calcination. La différence entre la masse initiale et finale rapportée à la masse finale donne un taux de matière organique. Les taux de matière organique des sols sont très influencés par les méthodes de mesures utilisées.

5.4. Granulométrie

Une analyse granulométrique a été effectuée sur dix échantillons choisis de manière à couvrir l'ensemble des descriptions pédologiques. Les fractions les plus grossières (sables) ont été séparées avec un tamisage manuel. Les fractions les plus fines (limons et argiles) ont été mesurées avec un granulomètre laser.

L'objectif de l'analyse granulométrique était de mesurer le pourcentage de sable, de limon et d'argile dans chaque échantillon et de classer l'échantillon de

sol dans une classe de texture (argileux, argilo-limoneux,...) (Fig. 13).

Le système de référence utilisé est celui en vigueur au Canada (Système Canadien de Classification des Sols, <http://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/cssc3/intro.html>).

Les descriptions des classes de texture sont dépendantes des systèmes de référence utilisés mais une certaine correspondance existe malgré tout (Fig. 14).

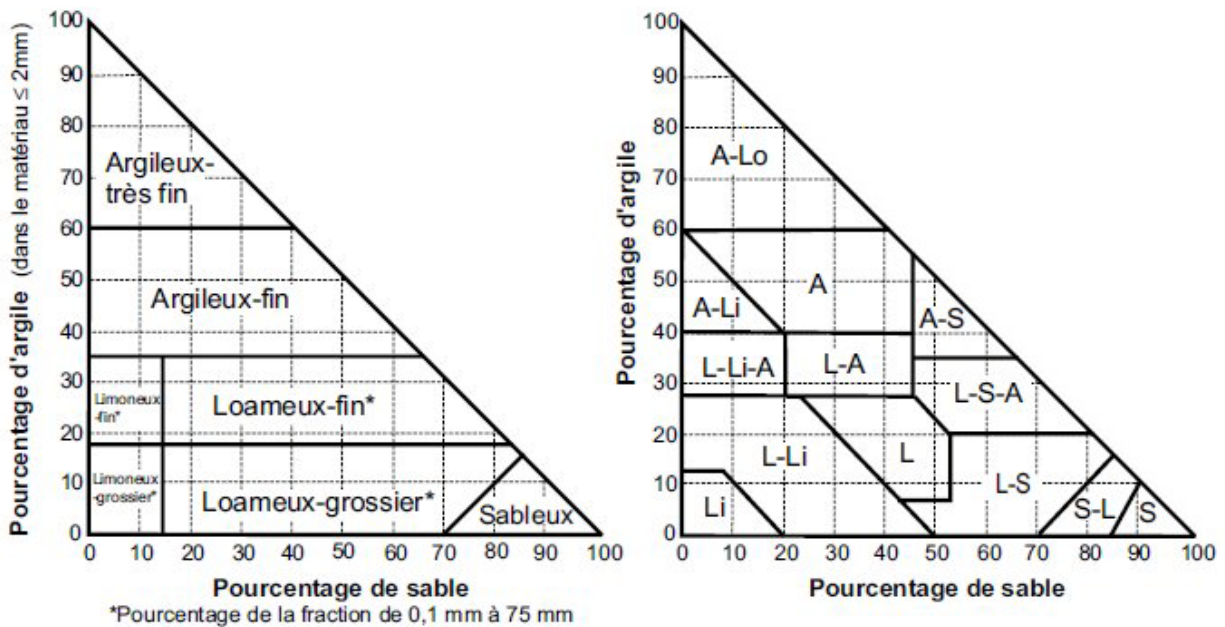


Figure 13. Abaque des classes granulométriques de la famille de sols (à gauche) et des classes texturales de sols (à droite). Les abréviations utilisées dans le triangle des textures sont : A-Lo, argile lourde; A-Li, argile limoneuse; A, argile; A-S, argile sableuse; L-Li-A, loam limono-argileux; L-A, loam argileux; L-S-A, loam sablo-argileux; L-Li, loam limoneux; L, loam; L-S, loam sableux; Li, limon; S-L, sable loameux; S, sable. Source : Système Canadien de Classification des Sols.

Échelles et classifications granulométriques

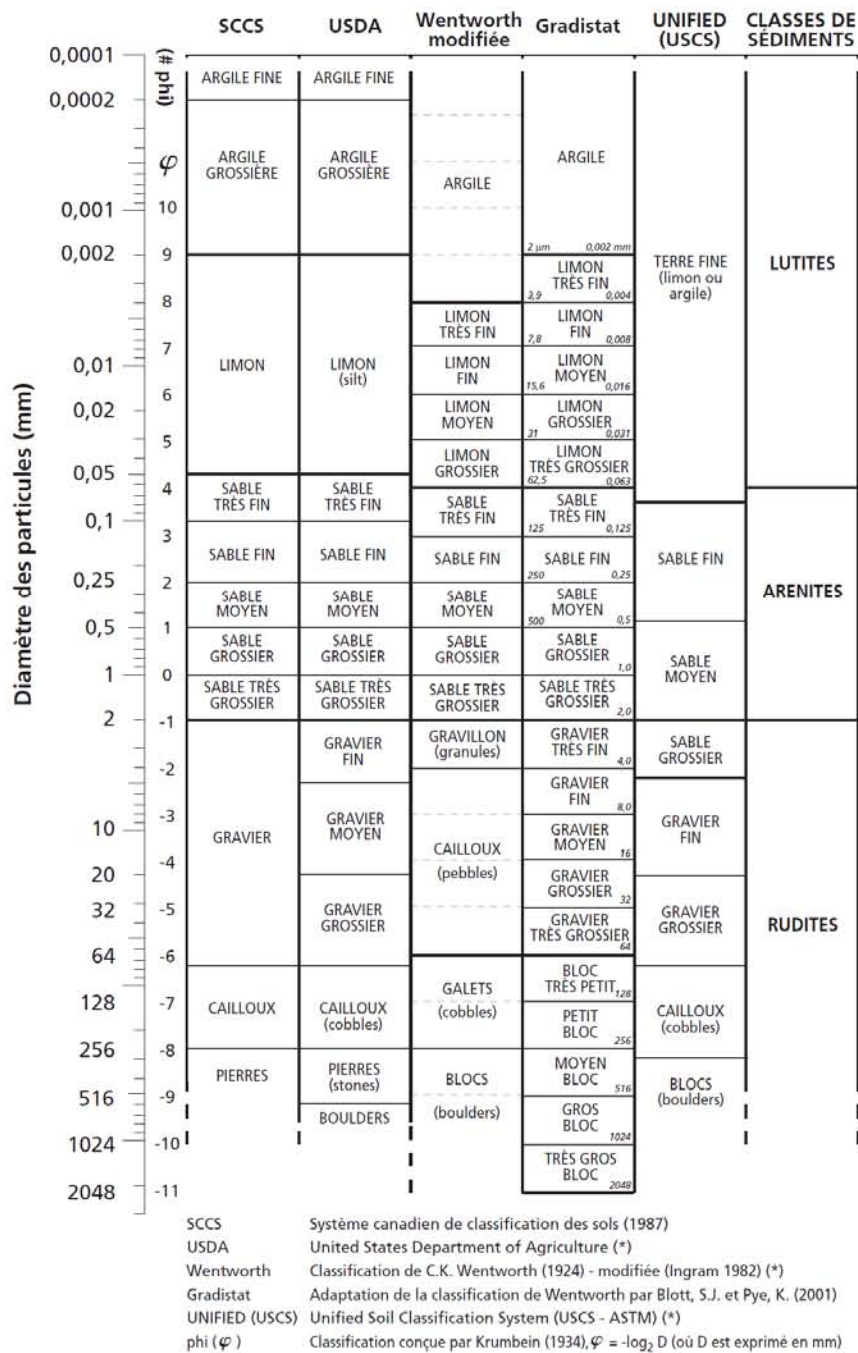


Figure 14. Classification granulométrique en fonction de différents systèmes de référence.

5.5. Attaques partielles Melich3

Des attaques partielles ont été effectuées sur les échantillons. Les résultats obtenus sont très dépendants des méthodes utilisées. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la méthode de référence Melich3, très utilisée au Québec et en Amérique du nord. La procédure utilisée est celle en vigueur dans les laboratoires du MDDEFP comme expliqué dans la section «standardisation des méthodes de prélèvement et d'analyse». Les standards utilisés pour valider les analyses étaient des échantillons de sols analysés par les laboratoires du MDDEFP.

Les analyses Melich3 permettent de doser les éléments échangeables des sols et en particulier les éléments majeurs. Les éléments échangeables sont ceux utilisés par les plantes. Leur présence détermine la fertilité des sols.

5.6. Attaques totales par digestion acide

Les échantillons devant servir aux attaques totales ont été tamisés à 2 mm puis réduits en poudre fine avec un broyeur excentrique avec des tores en acier inoxydable (shutterbox, 700 tours/minute pendant 3

minutes). Entre chaque échantillon, du quartz concassé a été broyé pour éviter toute contamination potentielle d'un échantillon vers un autre. La contamination de ce mode de préparation a été évaluée et a été jugée négligeable (contrôles menés par le personnel des laboratoires de l'INRS).

La mise en solution des échantillons a été réalisée dans des bombes en Teflon placées sur une plaque chauffante. Un couvercle de reflux était placé sur chacune des bombes. Les sous-échantillons de 0.2 g ont été attaqués avec des volumes de 5 ml d'acides concentrés (nitrique, perchlorique, fluorhydrique) de qualité trace métal sous des hottes ventilées prévues pour ce type d'attaque. La dilution finale a été réalisée dans une matrice d'acide nitrique 5%. Cette méthode très laborieuse a été retenue car elle offrait les meilleures limites de détection pour les éléments analysés (Fig. 15).

Les dosages des éléments ont été effectués sur ICP-MS. Des standards internationaux ont été utilisés pour vérifier la qualité des analyses. Les résultats des digestions totales ne sont pas reliés aux méthodes utilisées pour traiter les échantillons au contraire des attaques partielles.

Tableau Périodique des Éléments

The periodic table is color-coded by groups:

- Métaux alcalins (1A)
- Métaux alcalino-terreux (2A)
- Métaux de transition (3-10)
- Lanthanides (57-71)
- Actinides (89-103)
- Métaux pauvres (11-12)
- Non-métaux (13-16)
- Gaz rares (17-18)
- Artificiels (104-118)

 Elements are color-coded by state: Solide (blue), Liquide (green), Gaz (red), and Artificiel (black).

 A red box highlights the following elements: H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

 A red arrow points from the text 'isotopes du plomb 204, 206, (207), 208, 210' to the element Pb (Lead) in the periodic table.

Figure 15. Éléments analysés à l'ICP-MS.

6. Description qualitative des sols

6.1. Origine des dépôts et texture des sols

Les observations visuelles effectuées sur le terrain permettent de produire une description qualitative des textures des sols et de l'origine des dépôts de surface (Fig. 16). Le nombre de classes retenues est volontairement limité. L'objectif étant de dégager des grands ensembles pour vérifier l'influence potentielle sur les mesures de gaz. L'interprétation de la classe de texture des sols est effectuée sur les contrastes observés dans la zone d'étude. Ainsi, les sols de la catégorie « sols argileux » sont en fait des sols où les particules fines argileuses sont beaucoup plus importantes en proportion que dans les sols sableux ou sablo-limoneux. Leur comportement élastique au doigt les range dans cette catégorie.

L'organisation spatiale des textures des sols et l'origine des dépôts de surface correspondent à celles des rivières, du fleuve et de la topographie en général. Dans la partie nord-ouest de la zone étudiée, les sols rencontrés sont plus argileux. Le contraste est très marqué avec les sols sableux rencontrés plus au sud-est. Le long des rivières Bécancour et Gentilly on trouve des textures intermédiaires sablo-limoneuses.

L'organisation des dépôts de surface présente également une organisation simple. Des alluvions ont été déposées au nord-ouest et occupent les territoires de plus faible altitude. Les dépôts marins et lacustres, plus anciens, déposés par la mer de Champlain, s'étendent plus au sud-est. Des tills glaciaires, intercalés entre les deux ensembles sont aussi rencontrés.

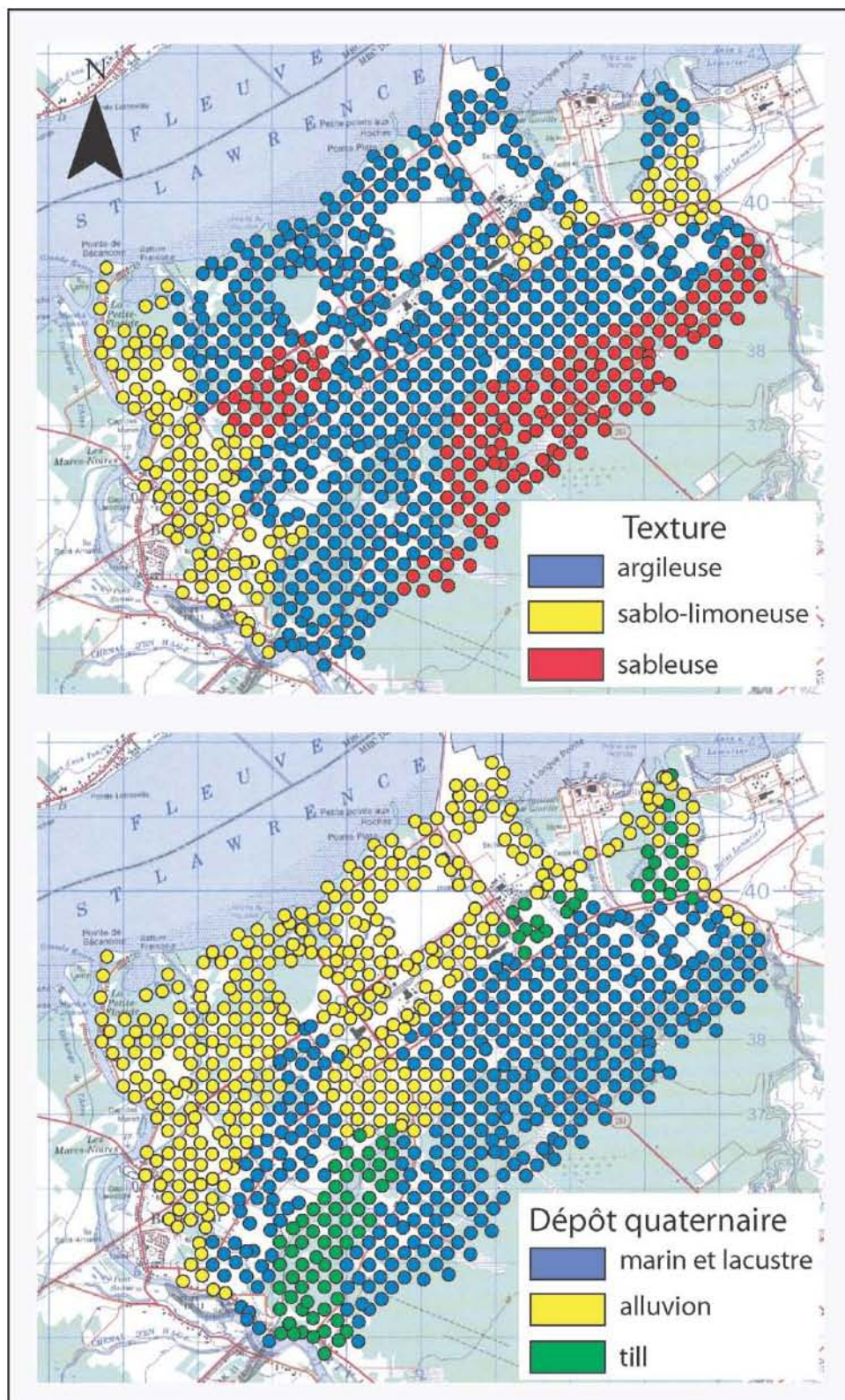


Figure 16. Cartes des textures des sols et de l'origine des dépôts quaternaires obtenues par observations qualitatives effectuées sur le terrain. Les points indiquent les sites visités.

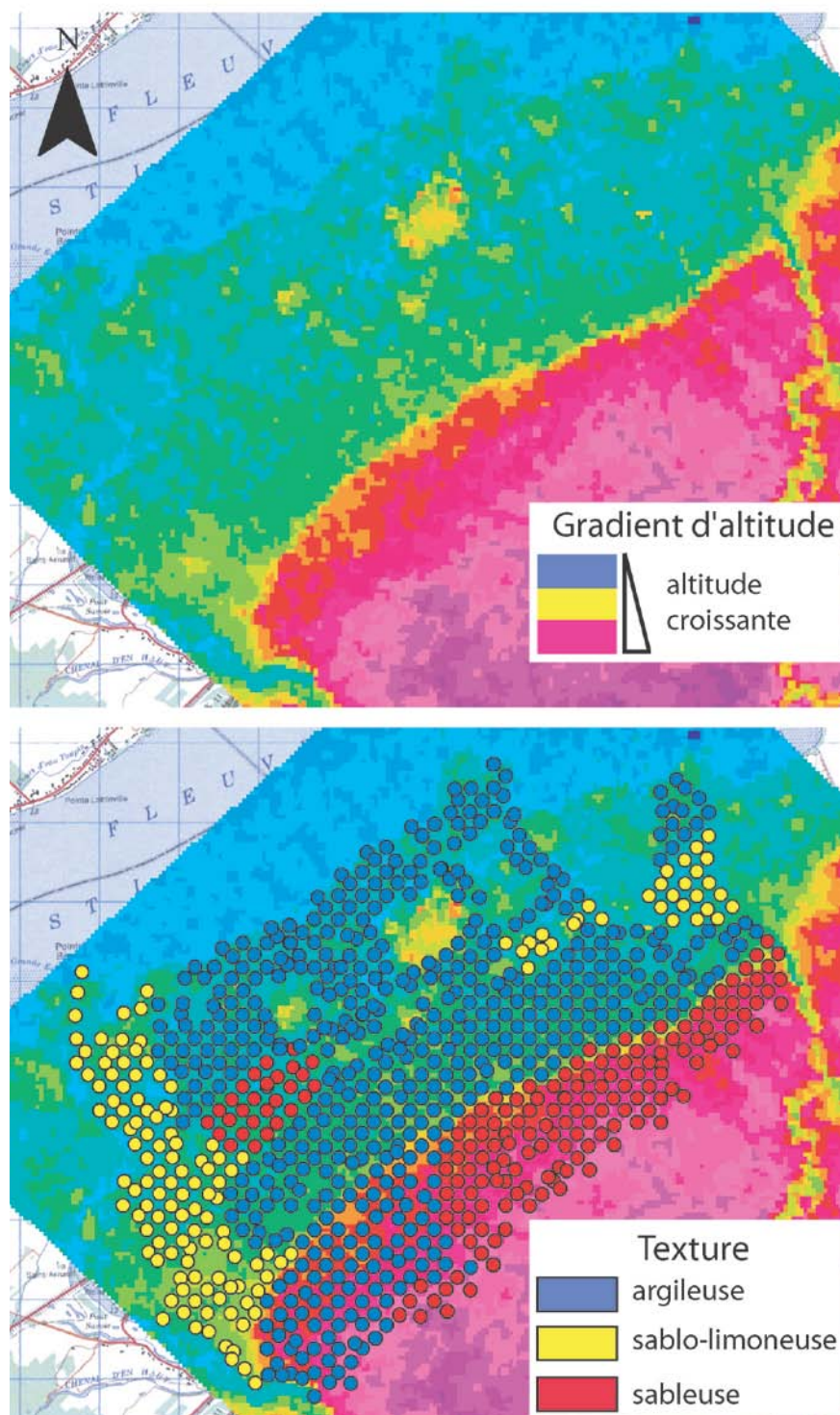


Figure 17. Altitude dans la zone d'étude et relation avec la texture des sols. Le gradient d'altitude est fourni par un modèle numérique de terrain régional

(Données numériques d'élévation du Canada, 031B, OGDENSBURG, 1991).

6.2. Relations avec l'altitude

Dans la zone d'étude, l'altitude suit également un gradient nord-ouest – sud-est. Il existe donc une relation entre la topographie et les sols. Elle est particulièrement visible pour les textures (Fig. 17). Les zones sableuses correspondent à une rupture dans le gradient d'altitude.

6.3. Relations avec la cartographie pédologique de 1943

Il est intéressant de relier les observations effectuées dans le cadre de cette étude aux travaux pédologiques réalisés dans le passé (1943) pour la zone. Pour ce faire, la carte pédologique a été découpée et géoréférencée. Les textures sont projetées sur le fond de la carte dans la figure suivante (Fig. 18).

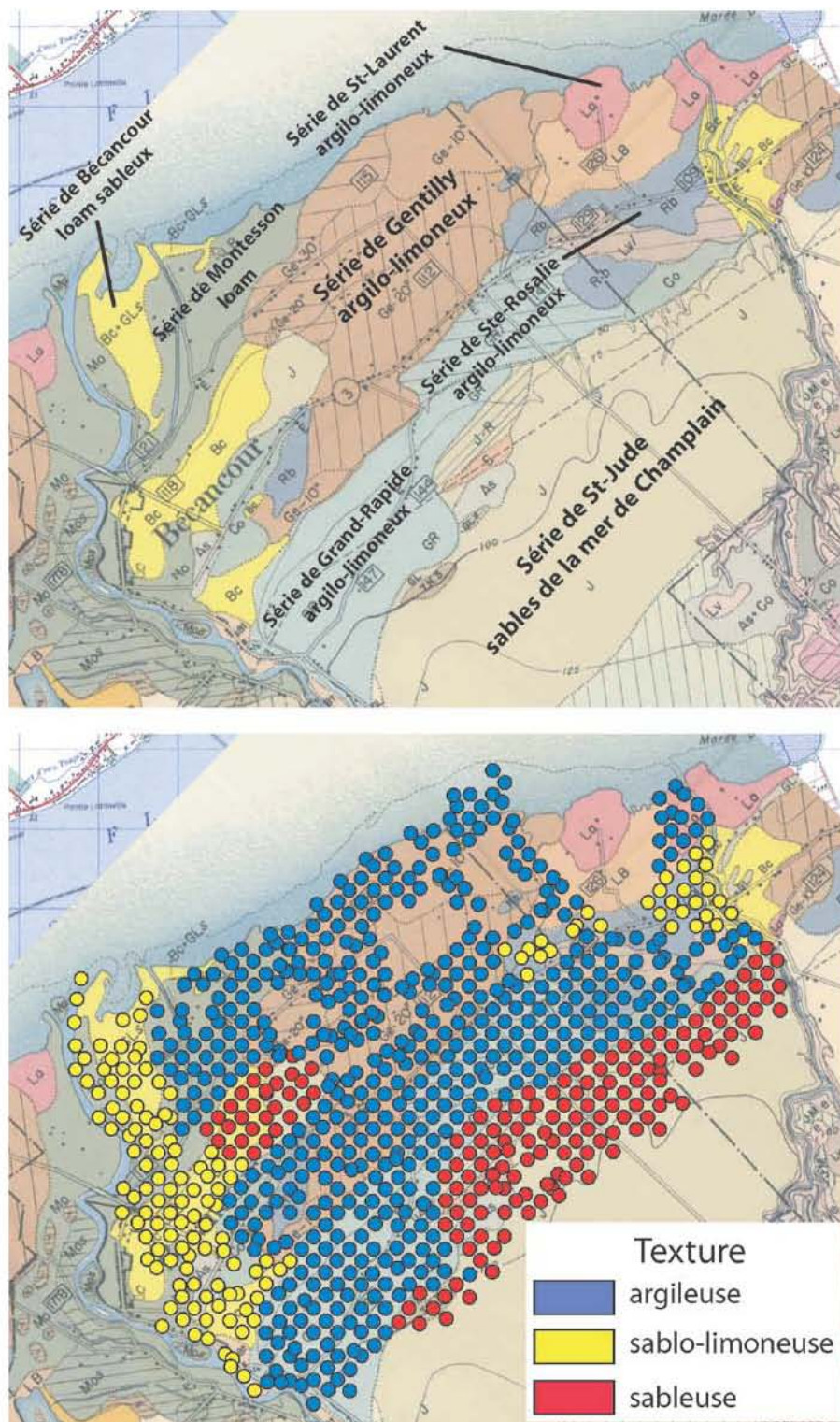


Figure 18. Comparaison entre la cartographie pédologique réalisée en 1943 et les textures des sols décrites sur le terrain au cours de cette étude.

Une bonne correspondance générale est observée entre les travaux pédologiques réalisés par le passé et les descriptions réalisées dans le cadre de cette étude. Les textures plus sableuses au sud, correspondent aux sols sableux de la série de St-Jude déposés par la mer de Champlain. Les sols plus au nord ont des textures plus fines essentiellement argilo-limoneuses (séries de Grand Rapide, St-Laurent, Gentilly, St-Rosalie) ou limoneuses (séries de Bécancour et de Montesson). Dans le détail, les textures argileuses (argilo-limoneuses) s'étendent légèrement plus au sud que sur la carte pédologique.

La bonne relation entre les cartographies effectuées en 1943 et nos données permet de valider le travail réalisé dans le cadre de cette étude mais aussi montre qu'il est possible d'utiliser les informations pédologiques existantes.

6.4. Relations avec des observations ponctuelles

De nombreux forages ont été réalisés dans l'enceinte de la centrale nucléaire de Gentilly. La stratigraphie de ce territoire est décrite dans des rapports produits pour Hydro-Québec. On note en surface la présence d'une couche organique de 5 à 150 mm d'épaisseur. Sous cet horizon, se rencontre « du silt argileux avec des traces de sable » sur une épaisseur de plus de 50 cm (Hydro-Québec Production, 2002). Ces

données de forages semblent bien correspondre à nos descriptions de la texture des sols effectués dans le voisinage. En particulier, les sols au nord de la zone ne sont pas sableux même s'ils en contiennent une certaine proportion.

6.5. Importance des textures des sols pour les échantillonnages de gaz

Les textures des sols sont particulièrement intéressantes à considérer car elles décrivent la perméabilité aux gaz des sols. Il est postulé que les sols plus argileux permettent moins la migration des gaz vers la surface que les sols sableux. Si des concentrations en gaz sont plus importantes vers le sud de manière systématique, cela pourrait provenir d'une meilleure porosité des sols.

Le radon, un gaz rare mesuré dans cette étude, provient de la désintégration radioactive de l'uranium. Sa présence en surface peut provenir de remontées de gaz profonds mais aussi d'un enrichissement des dépôts de surface en uranium. Il est souvent postulé que les sols argileux agissent comme une barrière à la remontée de radon. On devrait observer par conséquent de plus faibles concentrations en radon vers le nord de la zone.

7. Chimie des sols

7.1. pH

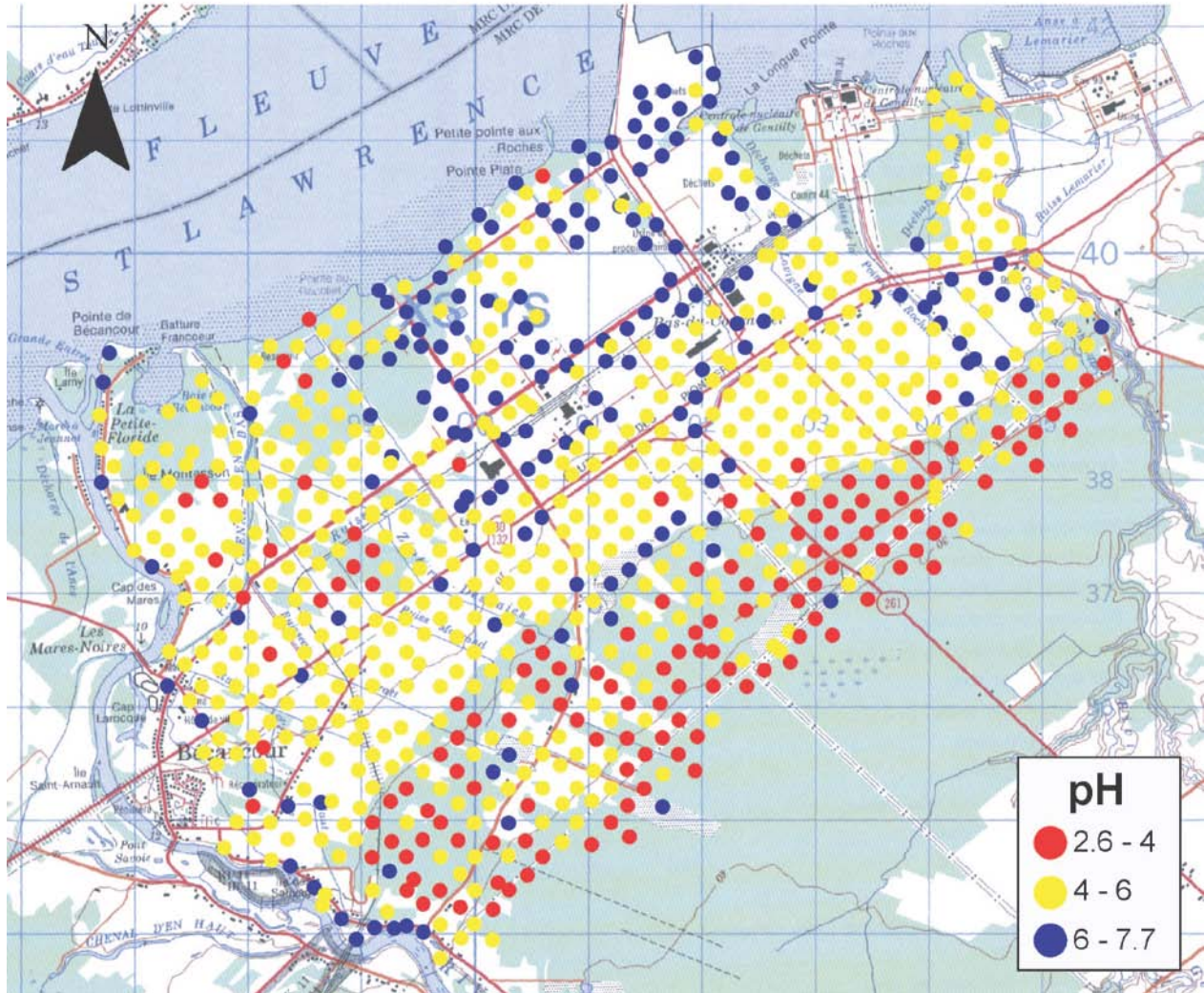


Figure 19. pH mesurés dans les sols.

Les sols plus sableux situés au sud-est sont en général plus acides que ceux plus argileux situés au nord-ouest (Fig. 19). Cette organisation spatiale correspond bien aux descriptions visuelles des sols (cf. section « Description qualitative des sols »).

Les valeurs minimum et maximum sont de 2.6 et 7.7 respectivement. La gamme de valeurs de pH est donc assez importante (Tab. 3).

Les sols plus acides sont des sols qui retiennent moins les cations et les autres éléments. Il est documenté dans certaines études que la percolation de CO₂ dans les sols peut potentiellement diminuer le pH. Ces valeurs peuvent donc être utilisées comme valeurs de référence pour vérifier la présence ou l'absence de modification des valeurs de pH après l'injection de CO₂ en profondeur. Il est important de noter que les pH ont été mesurés dans une solution de CaCl₂. Des

pH mesurés dans l'eau pourraient présenter des valeurs différentes.

7.2. Taux de matière organique

Le taux de matière organique des sols échantillonnés a été mesuré par perte au feu. On ne note pas

d'organisation générale nette dans le taux de matière organique des sols (Fig. 20). Ce paramètre est très variable dans les sols et peut varier considérablement d'un site à l'autre.

Tableau 3. Statistiques descriptives des pH des sols

N	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart type
812	2.64	7.73	5	4.8	1.15

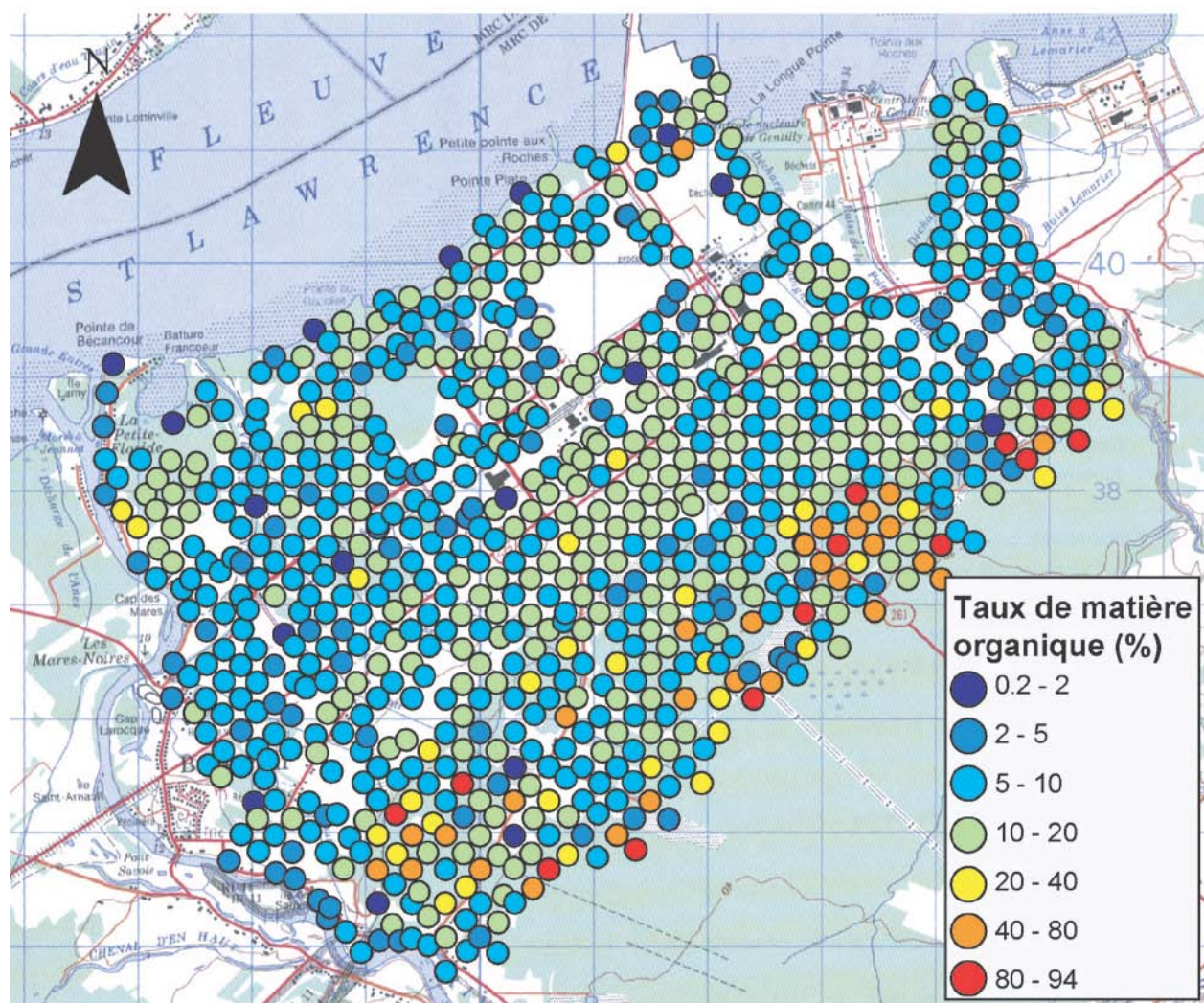


Figure 20. Taux de matière organique des sols. La mesure a été obtenue par perte au feu.

Tableau 4. Statistiques descriptives des taux de matière organique des sols

N	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart type
830	0.2	94	13	9	15.41

Les taux les plus forts se rencontrent dans les sols forestiers (Tab. 4).

Les sols présentant des pourcentages de matières organiques >40% sont des sols résultant de l'accumulation et de la mauvaise décomposition de la matière organique en conditions hydromorphiques

sévères. Dans ces sols, la décomposition de la matière organique peut libérer des quantités importantes de méthane. Un effet du taux de matière organique peut être recherché sur cette variable. De la même façon, les valeurs de concentrations de CO₂ dans les sols, sont liées au cycle du carbone dans les sols.

7.3. Concentrations en éléments échangeables dans les sols

Les données collectées dans le cadre de cette étude permettent de dresser un portrait des éléments échangeables présents superficiellement dans les sols (Fig. 21). Ces données peuvent servir à contrôler les

variations de concentrations en éléments majeurs et traces (valeurs de référence), dresser des bilans agronomiques ou servir de données d'entrée dans des modélisations (Tab. 5).

Des corrélations fortes ont été obtenues pour certains éléments : Fe-Bi : R= 0.9; Li-Ca : R = 0.89; Na-S : R=0.72. Pour le dernier couple (Na-S), cette valeur est toutefois très fortement influencée par un couple de valeurs extrêmes. La relation est nette pour les deux autres couples d'éléments. Ces résultats ne sont pas discutés dans le cadre de ce rapport.

Tableau 5. Statistiques descriptives des concentrations (ppm) en éléments échangeables dans les sols. L'extraction a été effectuée selon la procédure Melich-3.

Variable	N	Moy	Std	Min	Max	p95
Al	1213	813.2	375.8	24	2727	1533
Ba	1214	32.2	21.7	1.7	219.2	65.4
Be	797	0.1	0.0	0.008	0.581	0.145
Bi	659	0.6	0.4	0.063	7.1	1.074
Ca	1214	1727.5	1780.0	23	27358	3880
Cd	880	0.1	0.1	0	0.96	0.283
Co	1198	0.4	0.2	0.024	3.372	0.713
Cr	1186	0.3	0.1	0.014	1.43	0.525
Cu	1182	2.3	3.0	0.028	54.803	6.32
Fe	1214	277.9	184.6	22	3839	508
K	1214	146.3	96.5	8	646	331
Li	1192	3.5	2.6	0.35	37.49	6.76
Mg	1214	186.0	124.0	3	956	389
Mn	1214	41.5	43.0	0.1	579.7	105.8
Na	1196	18.2	52.9	0.35	1391.79	41.76
Ni	1206	0.9	1.7	0.056	55.498	2.053
P	1214	39.8	35.2	1.8	338.8	109
Pb	1196	4.6	14.1	0.1	390.04	13.43
S	1212	24.2	54.9	1.6	1673	55.79
Sr	1214	13.7	16.7	0.14	194.84	36.43
Ti	1214	2.6	2.2	0.13	21.48	6.625
Zn	1211	5.2	10.2	0.31	167.8	16.76
Zr	1175	1.2	0.8	0.02	7.375	2.62

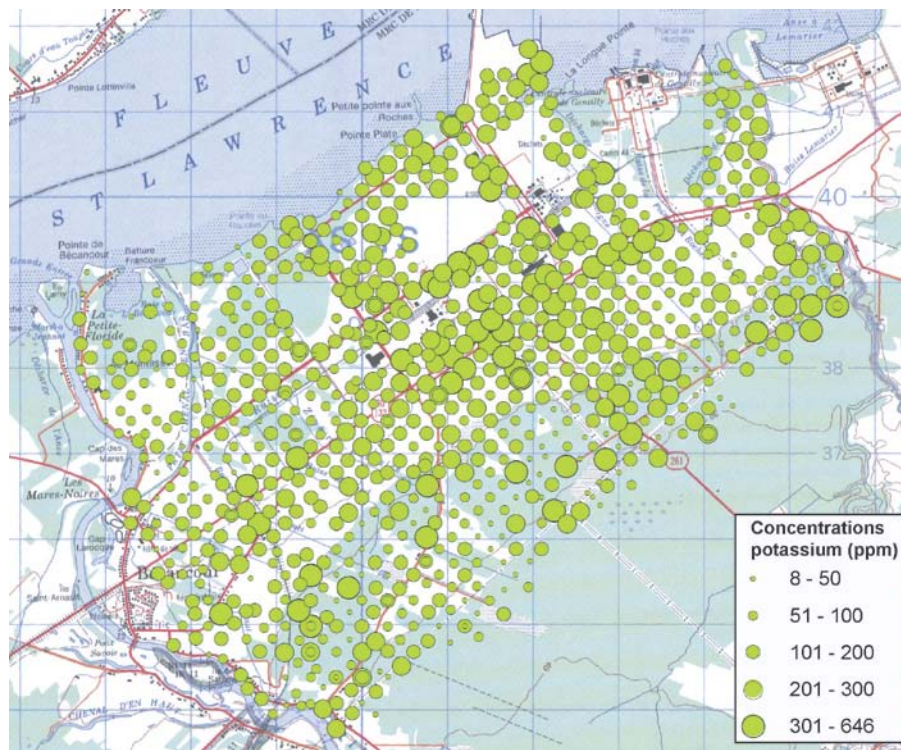


Figure 21. Potassium présent dans le sol (ppm). Extractions Melich-3.

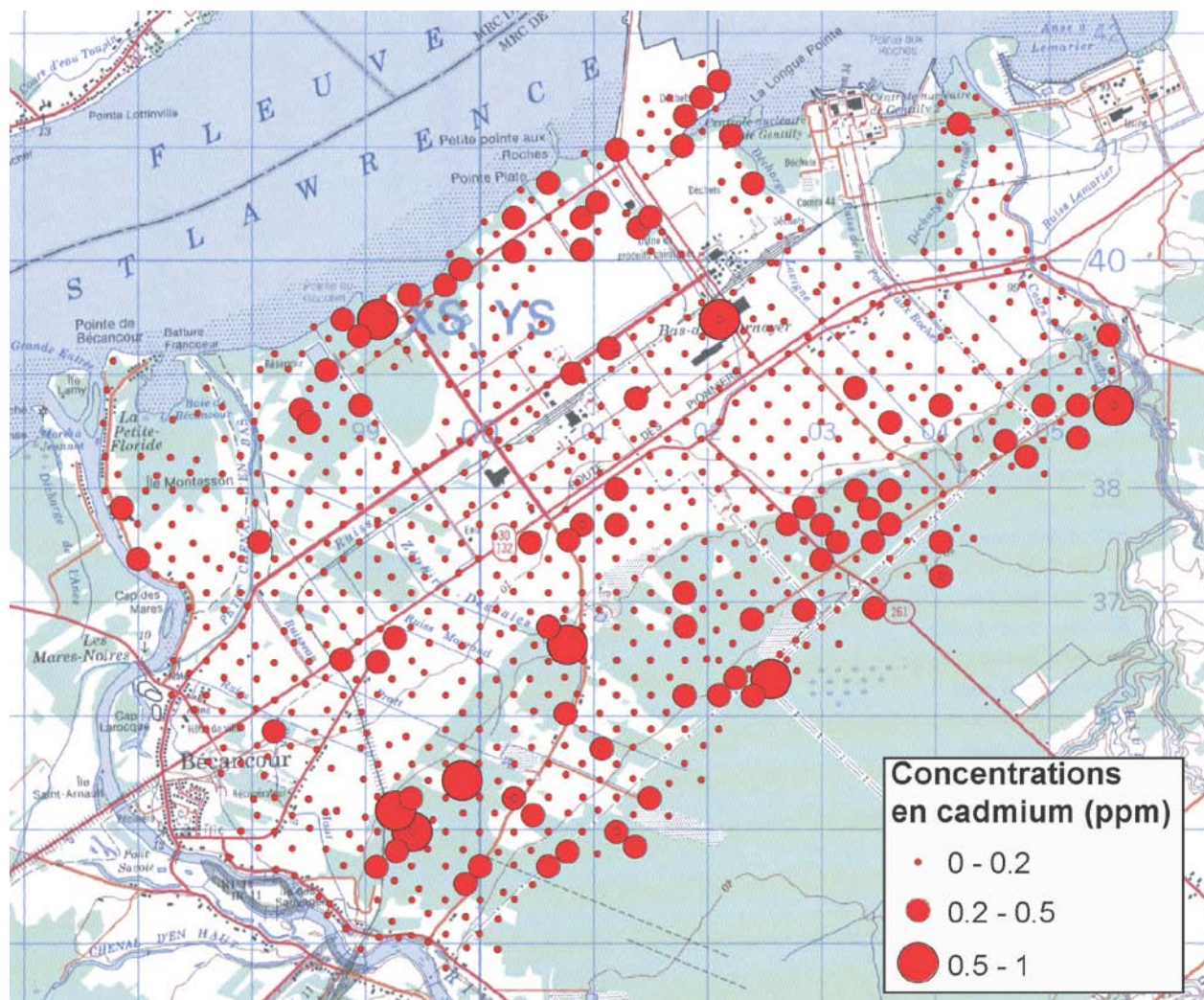


Figure 22. Concentrations en cadmium échangeable dans les sols (ppm). Extractions Melich-3.

Elles permettent aussi d'identifier des sites présentant des niveaux de contamination plus importants (Fig. 22). En cas de percolation du CO₂, il est postulé que le pH des sols diminuerait et que les éléments toxiques accumulés dans les sols pourraient être libérés à un rythme supérieur. Ces flux de contaminants pourraient rehausser les concentrations enregistrées dans les aquifères superficiels. Ces données sont donc particulièrement indiquées pour identifier des zones sensibles au point de vue chimie des sols et procéder à des suivis ultérieurs.

Le fait de posséder des données de métaux échangeables et totaux augmentent aussi les

possibilités de cibler des zones d'enrichissements superficiels et de vulnérabilité. Le cadmium échangeable est transférable dans les chaînes alimentaires car phytodisponible. Les variations du rapport entre la fraction totale et échangeable au cours du temps permettent de montrer des modifications dans la chimie du sol et donc une augmentation de la libération des éléments traces métalliques.

7.4. Mercure total

Le mercure total mesuré dans les sols est cartographié ci-dessous (Fig. 23).

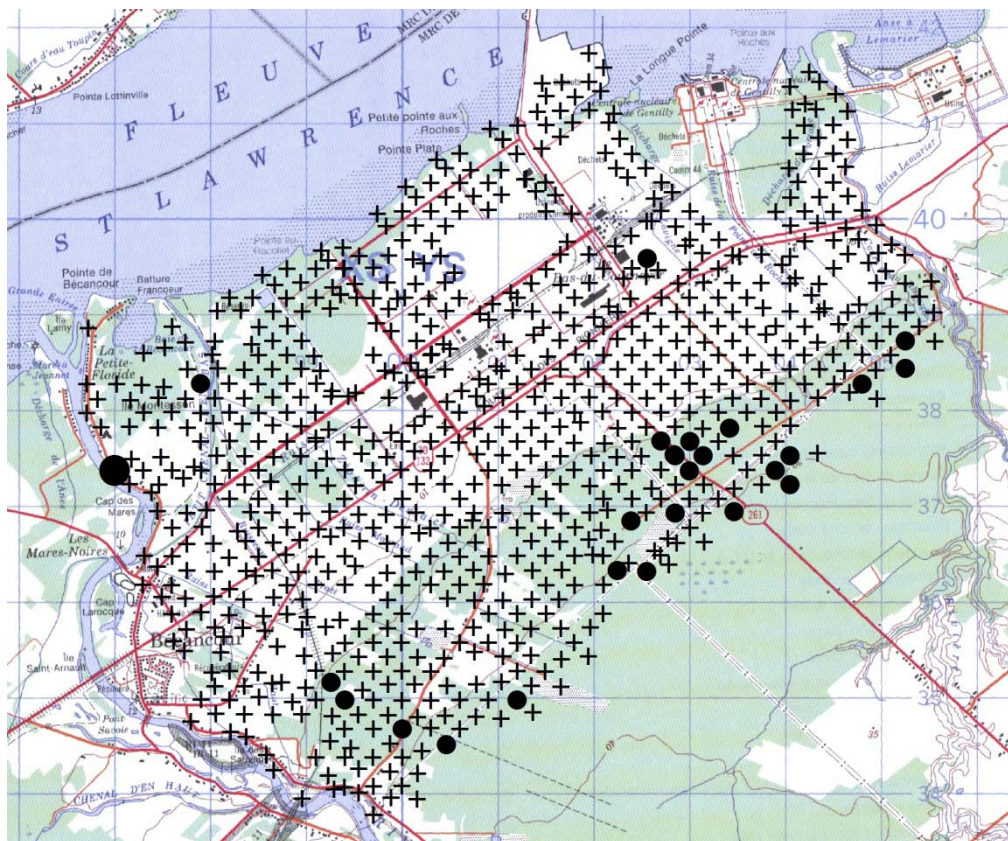


Figure 24. Sites dépassant les critères A (petits points noirs) et B (gros points noirs) du MDDEFP pour le mercure total. Les sites échantillonnés avec des concentrations inférieures au critère A sont indiqués avec des croix.

Comme pour les autres contaminants, la rétention du mercure total est reliée aux conditions physicochimiques des sols. En cas de modification de ces conditions, le mercure accumulé pourrait être libéré. Les critères A, B et C du MDDEFP pour le mercure au Québec dans notre zone est de 0.2 ppm, 2 ppm et 10 ppm respectivement. Ces concentrations correspondent aux critères génériques modulés selon l'usage (récréatif (A), résidentiel (B), commercial et industriel (C)). Les sites où le mercure excède ces valeurs de référence sont indiqués dans la carte suivante (Fig. 24).

La majorité de ces sites contaminés sont situés dans des contextes forestiers au sud-est de la zone. Cependant, la plus forte valeur de concentration est rencontrée à proximité de la ville de Bécancour (concentration de 2.6 ppm). Le tableau suivant résume les valeurs de concentration rencontrées dans la zone d'étude (Tab. 6).

Certains auteurs ont postulé aussi que les remontés de gaz profond pouvaient enrichir les sols superficiels de mercure (Schlüter, 2000). Cet élément peut être considéré comme un traceur des événements ou des chemins de migration des gaz profonds vers la surface.

Tableau 6. Statistiques descriptives des concentrations (ppb) en mercure total dans les sols

N	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Écart type
782	3.2	2647	51.3	33.3	108

8. Modèle d'occupation du sol

8.1. Information satellitaire

L'information satellitaire utilisée dans cette étude provient d'une orthoimage Landsat7 fournie en libre accès par le gouvernement fédéral canadien (Géogratis, Product_id 014028_0100_010608_L7). L'imagerie Landsat a été choisie car elle permet de produire des classifications relativement robustes de l'occupation des territoires à une résolution suffisante (30 m) pour les objectifs de cette étude. La portion de l'image influencée par les nuages était inférieure à 10%. Les corrections usuelles (rééchantillonnage et orthorectification) ont été réalisées par le fournisseur du produit et il n'a pas été nécessaire de procéder à des traitements préliminaires complémentaires. L'image a été acquise au mois de juin 2001 (2001/06/08/ à 15:27), c'est-à-dire 10 ans plus tôt que nos mesures sur le terrain. Des tests au sol ont été réalisés pour juger de l'obsolescence potentielle des données. Il a été vérifié en particulier que la variabilité des réflectances correspondait à l'actuelle occupation du sol observée sur des points d'observations également répartis sur la zone d'étude. La bonne orthorectification de l'image a été vérifiée en comparant le positionnement de points précis (bâtiment, croisements de routes) sur l'image Landsat et sur les bases de données vectorielles du gouvernement (feuilles Canvec, Géogratis).

8.2. Établissement du modèle

Au cours de l'échantillonnage mené sur le terrain, une description de l'occupation du sol a été réalisée sur 548 points. La classification de l'image de télédétection disponible et les points d'observation au

sol ont permis de dégager un modèle d'occupation du sol simplifié adapté aux besoins de cette étude. La méthodologie utilisée est la même que celle utilisée précédemment. Quatre classes ont été retenues : les zones d'eau libres (EAU), les zones de végétations basses (VB), les forêts (F) et les zones urbanisées (U). Les zones agricoles n'ont pas été distinguées des zones de végétation basse pour deux raisons principales. Les zones de végétation basses observées dans la région sont essentiellement des terrains industriels ou des friches agricoles autrefois cultivées. Les zones de végétation basses ne correspondent pas en particulier à des différences pédologiques qui pourraient induire des valeurs différentes pour les variables mesurées (radon, hydrocarbures...) par rapport aux terrains cultivés. Au contraire, dans cet espace largement colonisé par l'homme, les zones boisées sont installées sur des terrains moins fertiles. La classification du territoire retenue est essentiellement binaire en terme de surface occupée (F versus VB), les autres catégories (U et EAU) représentent peu de surface. Elle reflète des différences pédologiques marquées qui pourraient expliquer des variations importantes des variables mesurées.

Une seconde raison est d'ordre plus pratique. Il n'était pas possible de séparer avec l'information disponible les zones de VB et les zones agricoles avec une bonne précision. De nombreux terrains agricoles sont en effet des prairies de pâturage ou de fauche et leurs réflectances sont les mêmes que des zones de végétation basse ayant colonisé des terrains industriels inoccupés, ou des friches agricoles. Les images disponibles étaient anciennes (10 ans) et l'occupation du sol a parfois changé, en particulier, des végétations arbustives basses sont devenues des zones boisées au cours de cette période.

Tableau 7. Correspondance entre l'occupation du sol observée sur le terrain et le modèle de classification du sol obtenu grâce aux images de télédétection.

		Modèle d'occupation du sol				
		EAU	F	U	VB	Total
Observations au sol	F	0	120	7	59	186
	U	0	0	3	5	8
	VB	2	8	13	331	354
	Total	2	128	23	395	548

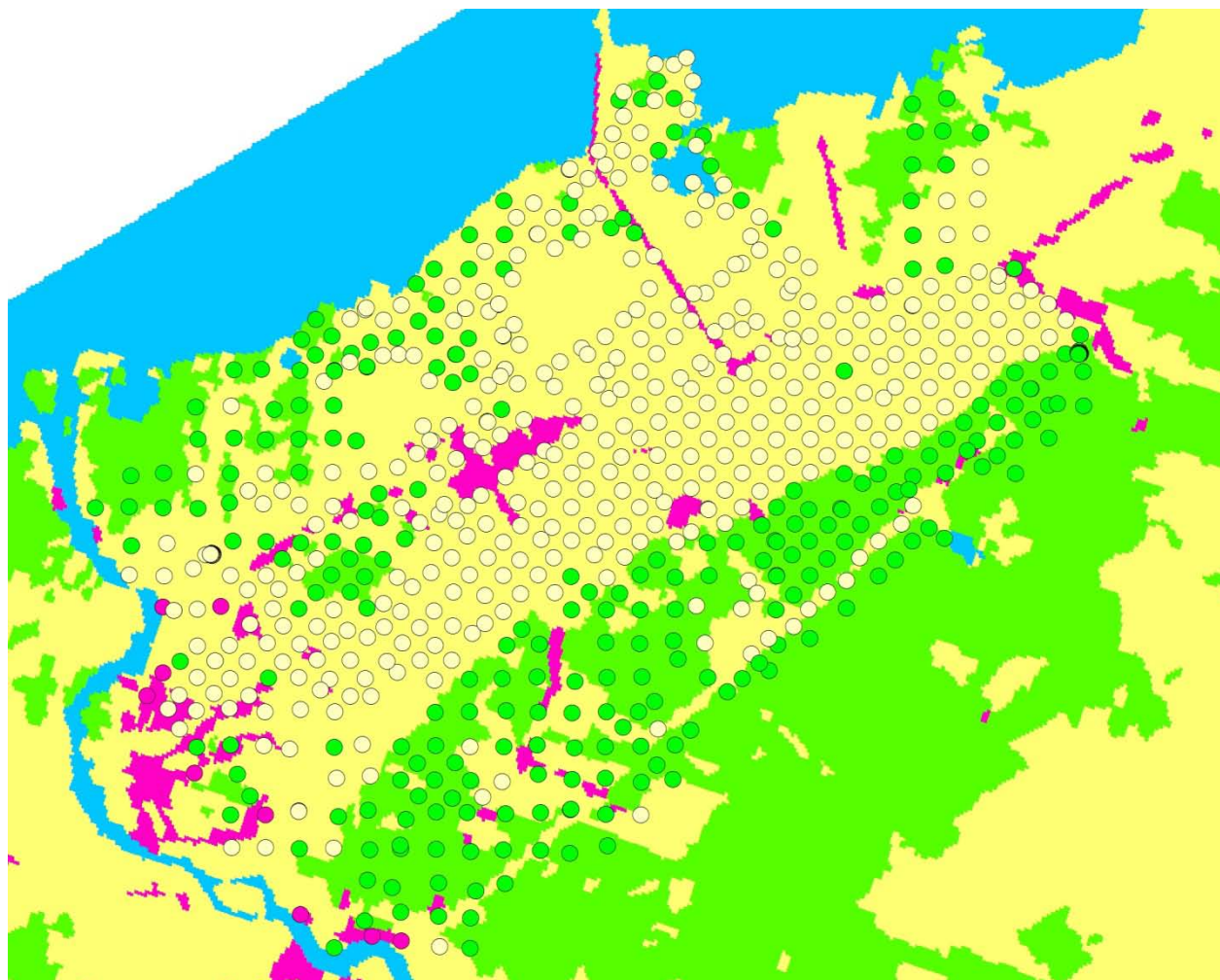


Figure 25. Relations entre l'occupation du sol observée au sol (cercles) et prédite par le modèle (fond de carte).

La classification obtenue est bonne pour la VB avec 331 points sur 354 (93.5%) classés dans la bonne catégorie (Tab. 7). La classification des F sous-estime sa couverture réelle. Cent-vingt points sur 186 (64.5%) sont bien classifiés. Comme expliqué ci-dessus, cette différence provient de terrains qui étaient des friches agricoles colonisées par des VB au moment de l'acquisition des images et qui sont désormais boisés. Cette sous-estimation n'est pas forcément problématique pour l'objectif de notre étude, car ces zones, d'un point de vue pédologique, se rapprochent plus des terrains agricoles (Fig. 25).

En définitive, le modèle d'occupation du sol obtenu permet de bien classer 82% du territoire, ce qui représente une relativement bonne classification pour tester son effet sur les variables mesurées (Fig. 26).

L'extension du modèle est volontairement supérieure à la zone d'étude. Cette demande avait été effectuée pour pouvoir tester la relation entre l'occupation du sol et des variables collectées sur de larges territoires (levés gamma aéroportés). L'extension de la zone permet d'obtenir plus de points de comparaison entre le levé gamma et le modèle d'occupation du sol.

8.3. Relations avec la texture des sols et l'origine des dépôts

Dans les territoires humanisés, il existe bien souvent une relation entre l'occupation du sol et la pédologie. En particulier, dans les territoires agricoles, les zones boisées résiduelles sont souvent installées sur des terrains impropres à l'agriculture (humides, trop en pentes, non fertiles).

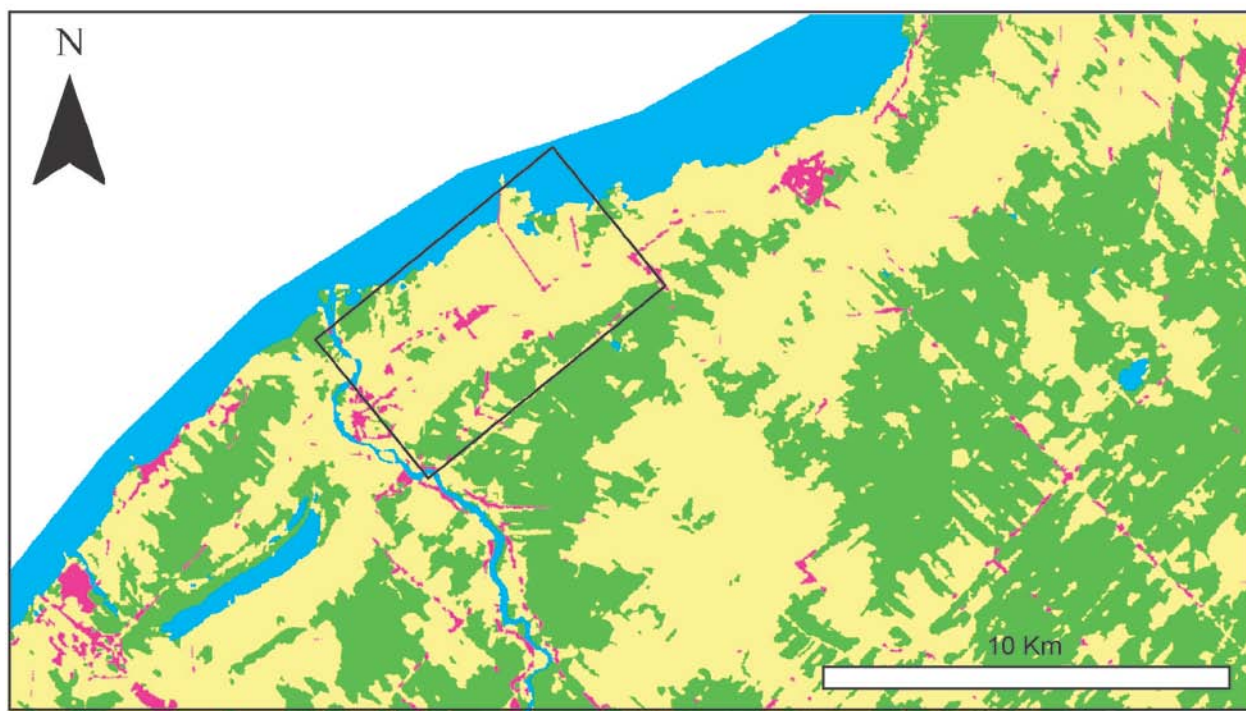


Figure 26. Modèle d'occupation du sol. Quatre classes ont été retenues : forêts (en vert), zone de végétation basse et zones agricoles (jaune), zone urbaines et construites (violet) et eau (bleu). La résolution du modèle est de 30 m. Le rectangle noir indique la zone d'étude approximative.

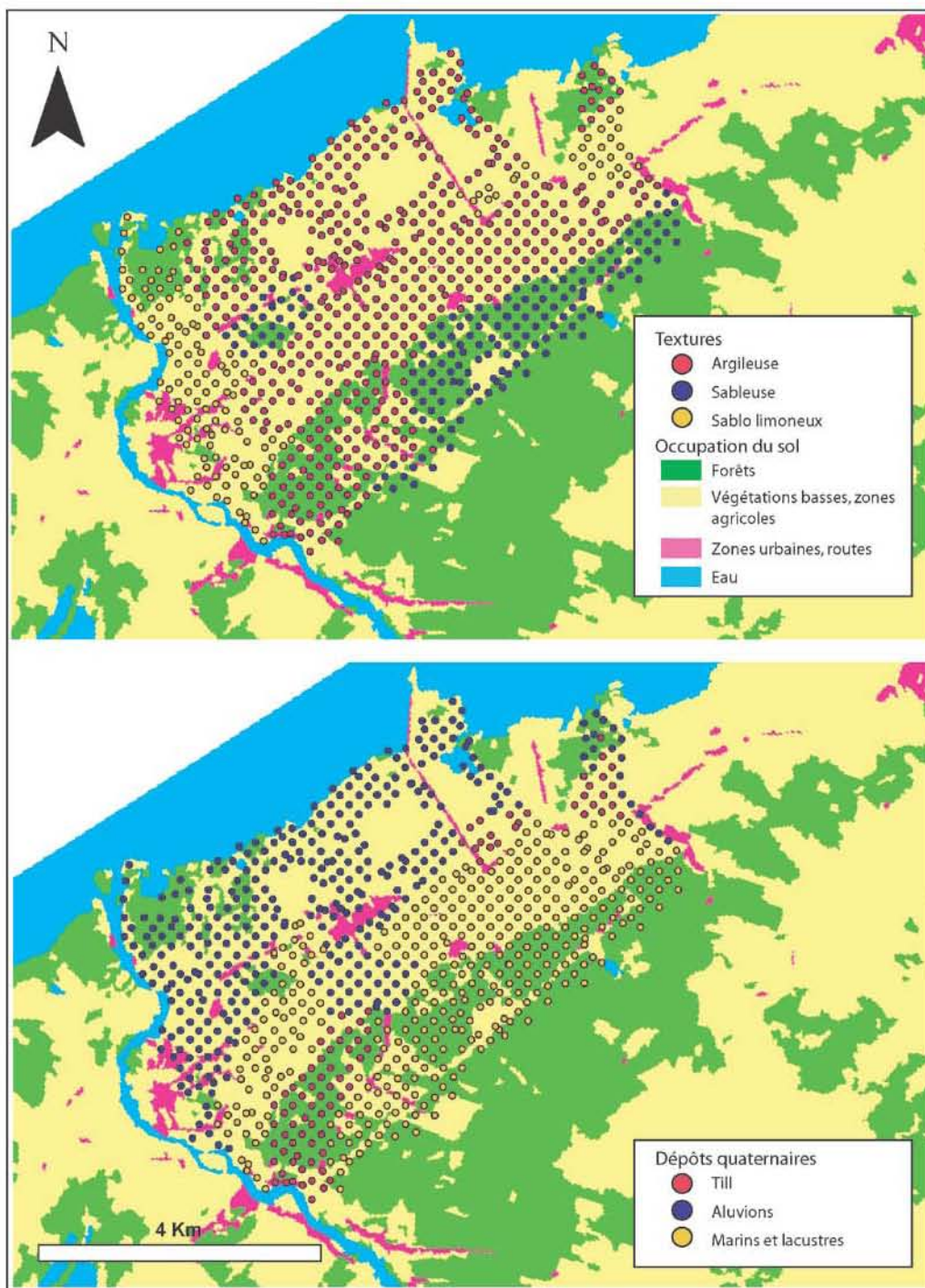


Figure 27. Relations entre la texture des sols, l'origine des dépôts et l'occupation du sol.

Dans notre zone d'étude, au sud, les zones de boisés correspondent à des dépôts marins et lacustres de la mer de Champlain et à des textures sableuses (Fig. 27).

Ce point est important à considérer car les éventuelles relations entre des concentrations en gaz et l'occupation du sol, peut traduire, par exemple, une relation directe avec le couvert mais aussi, indirectement, des relations avec la nature des sols.

8.4. Relation avec le pH des sols

Le modèle d'occupation du sol est aussi relié au pH des sols (Fig. 28).

Les terrains boisés, situés comme précédemment sur des sols plus sableux, ont des pH généralement acides. Au contraire, les zones de végétation basse et agricoles (en jaune) ont des pH plus forts. Sur la carte, cela se traduit par un gradient d'acidité orienté NO-SE, les pH les plus acides se trouvant au SE. Le modèle d'occupation du sol traduit donc, en plus des différences physiques (texture), les différences chimiques des sols.

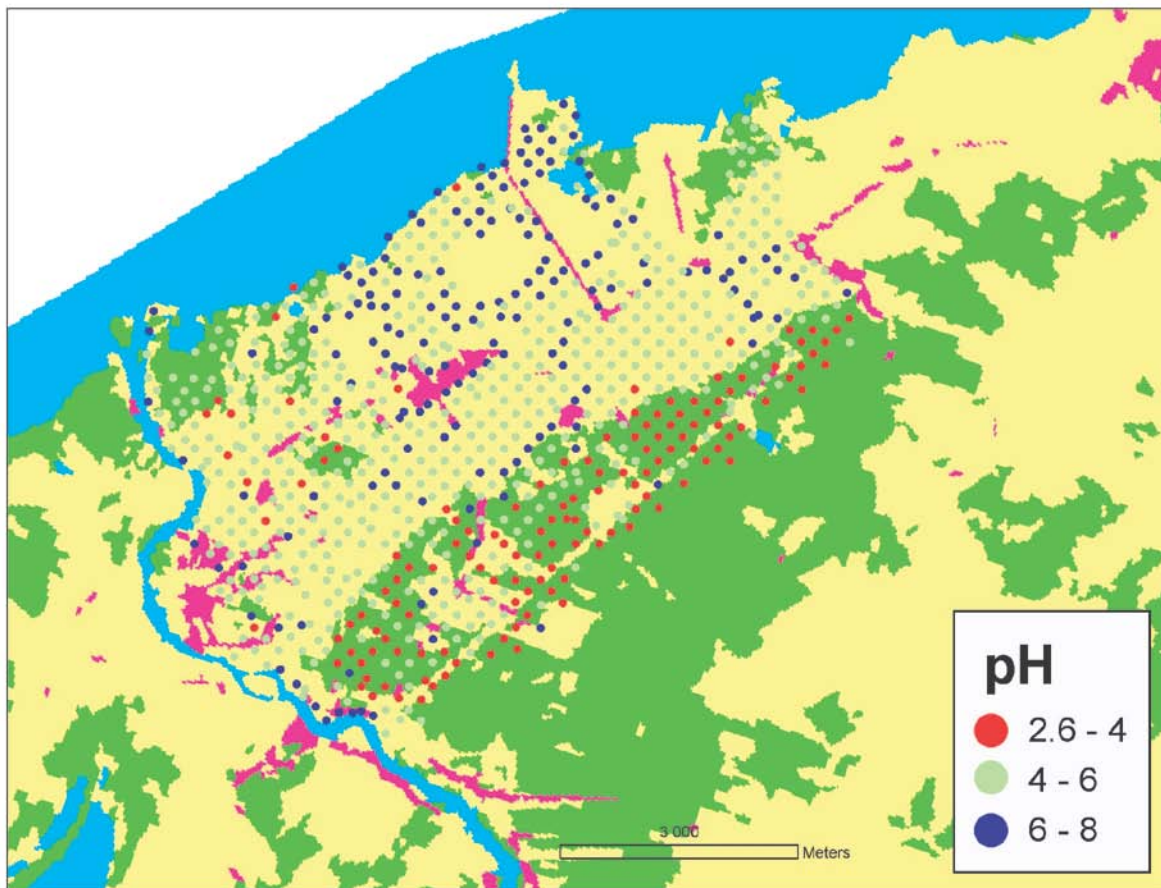


Figure 28. Relation entre le pH du sol et l'occupation du sol.

9. Optimisation des mesures d'hydrocarbures gazeux à partir du CO₂ et du CH₄ mesuré dans les sols et de la télédétection

9.1. Méthode

9.1.1. Données de gaz utilisées

Les méthodes utilisées pour échantillonner les gaz de sol et les analyses préliminaires de ces variables ne sont pas développées dans ce document. Elles le sont largement dans d'autres rapports ayant trait plus spécifiquement aux gaz de sol.

Deux types de gaz sont considérés. Les hydrocarbures gazeux sont nos variables principales. Ce sont des données plus coûteuses à obtenir mais aussi celles qui sont les plus robustes. Le CO₂ et le CH₄ sont des gaz dont les mesures sont plus faciles à obtenir. Par contre, l'activité biologique de surface peut être responsable de certaines fortes concentrations détectées. Ce sont des variables moins robustes,

secondaires qui sont utilisées pour prédire les territoires susceptibles de contenir des anomalies en hydrocarbures gazeux.

9.1.2. Relation spatiale entre les données principales et secondaires

Les concentrations de CO₂, de CH₄ et d'hydrocarbures mesurées dans les gaz de sol présentent des caractéristiques particulières. Les mesures répétées effectuées sur des stations de référence ont montré en particulier qu'elles sont non répétables dans le temps. C'est-à-dire que sur un même site peut alterner des faibles et des fortes valeurs de concentration. Les absences sont non-significatives alors que les présences d'anomalies le sont. Les relations spatiales entre différents gaz ne peuvent pas en particulier être appréciées sur des sites où les mesures sont colocalisées. Il n'est pas rigoureux par exemple de chercher à extraire des relations entre le CO₂ et l'éthane sur un ensemble de sites où les deux gaz ont été mesurés. Il s'agit plutôt de vérifier si les anomalies des deux gaz se distribuent spatialement sur les mêmes territoires (Fig. 29).

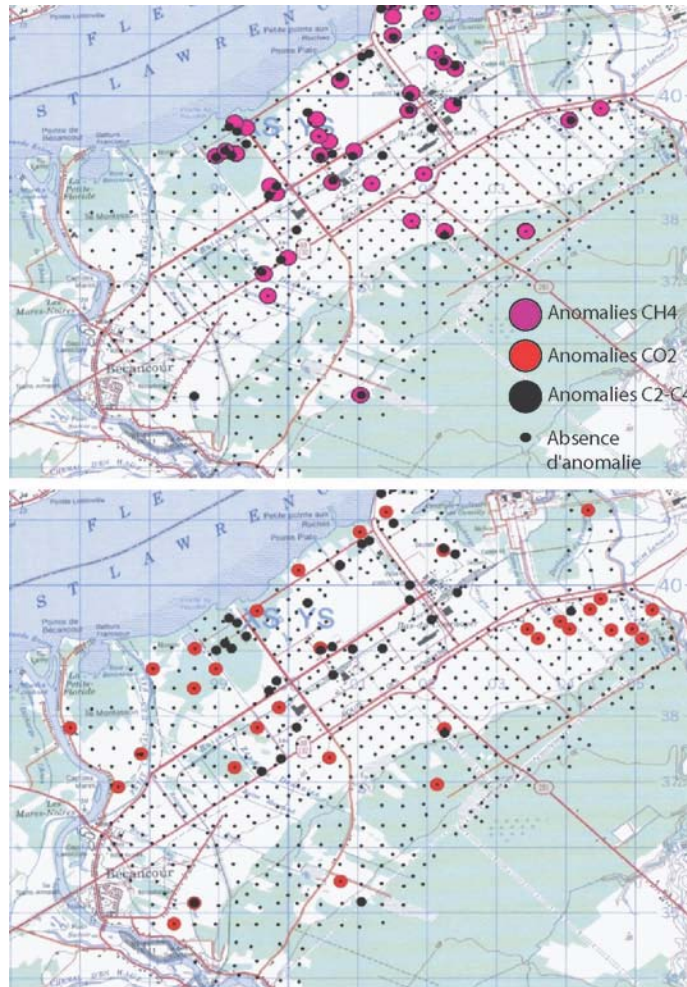


Figure 29. Relation spatiale entre les anomalies de CO₂, de CH₄ et d'hydrocarbures gazeux. Les anomalies correspondent aux 5% des valeurs les plus fortes (95^{ème} percentile).

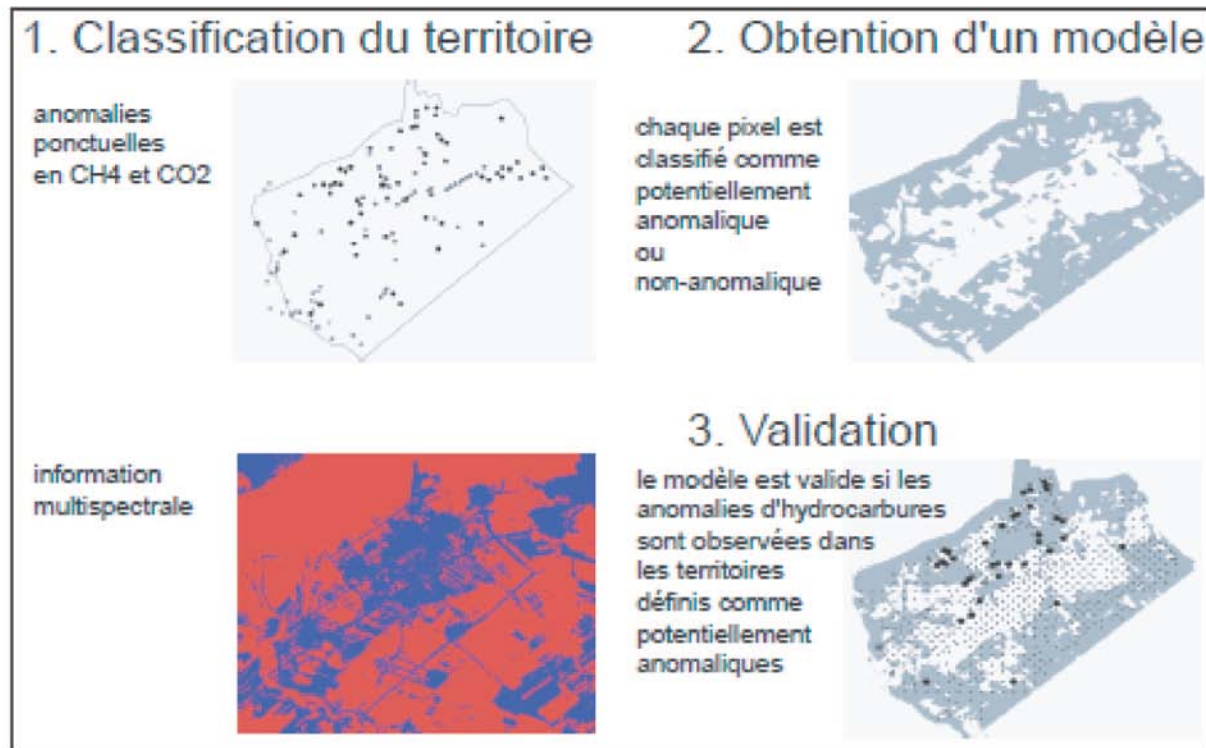


Figure 30. Vue synthétique de la méthode utilisée pour établir et valider un modèle prédictif des territoires où des anomalies en hydrocarbures gazeux peuvent être rencontrées.

Visuellement, cela semble être le cas. Les anomalies de CO₂, de CH₄ et d'hydrocarbures semblent être distribuées dans les mêmes zones de la carte. Cette observation tend à valider l'hypothèse d'une relation spatiale entre les variables principales et secondaires.

9.1.3. Analyses

L'information satellitaire utilisée dans cette partie est la même que précédemment (section modèle d'occupation du sol, information utilisée). La stratégie d'analyse adoptée consiste en trois étapes (Fig. 30).

La première étape consiste à combiner les anomalies en CH₄ et CO₂ et l'information multispectrale satellitaire afin de classer les territoires en termes de présences ou d'absences potentielles d'anomalies en hydrocarbures gazeux. Un modèle de présence potentielle est ainsi obtenu. Finalement, une dernière étape consiste à valider le modèle en vérifiant que les anomalies en hydrocarbures mesurées sur le terrain

sont observées préférentiellement sur les territoires définis comme potentiellement anormaux.

Dans notre cas, cette dernière étape est facilitée par le fait qu'un échantillonnage dense des hydrocarbures a été réalisé sur la zone d'étude.

La classification de chaque pixel de 30 m par 30 m est réalisée en projetant sur l'information spectrale réduite à deux composantes les anomalies en CH₄ et CO₂. La probabilité d'observer une anomalie en fonction des valeurs des composantes multispectrales est définie par un kernel bivarié. Ce sont des ellipsoïdes d'isoprobabilité.

9.2. Résultats

9.2.1. Classification à partir du CO₂ et du CH₄ mesuré à une profondeur de 50 cm

Réduction de l'information contenue dans les bandes

Les deux premières composantes de l'ACP (PC1 et PC2) expliquaient respectivement 75 et 14% de la variance contenue dans les 7 bandes de l'image Landsat (Fig. 31). La troisième composante expliquait seulement 7% de la variance totale. Notre choix de retenir uniquement les deux premières composantes était donc justifié.

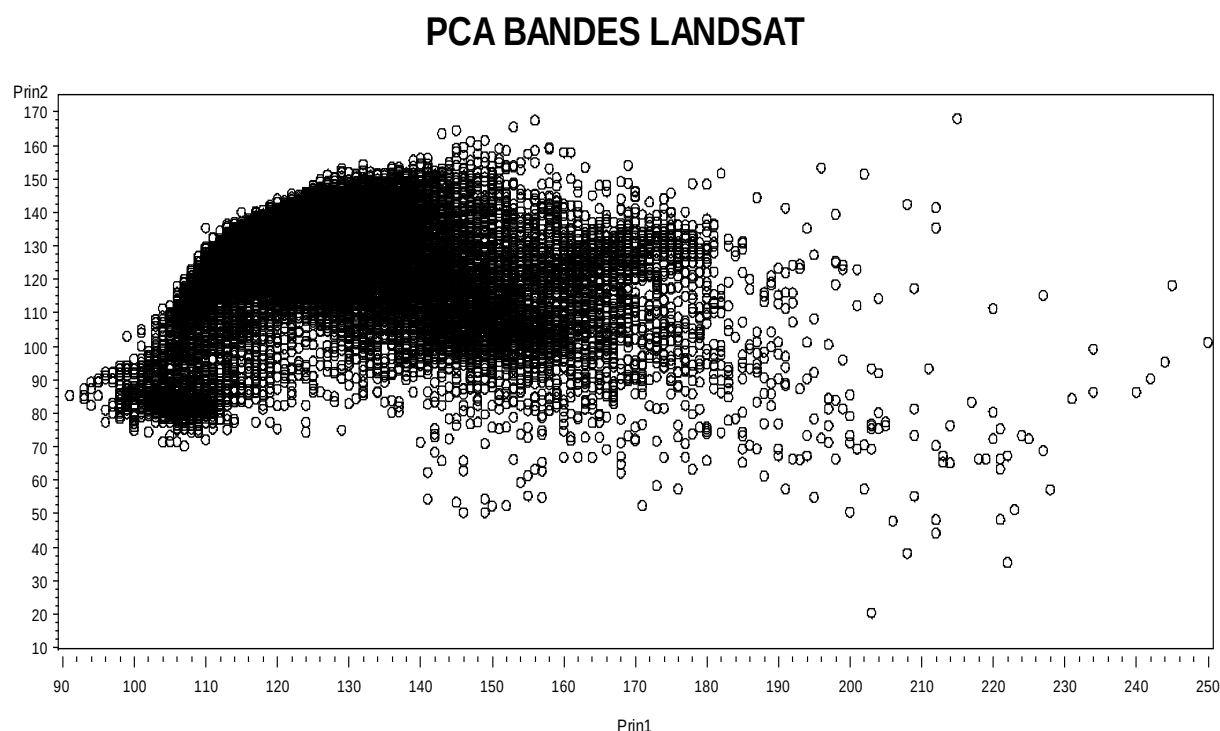


Figure 31. *Projection des scores des deux premières composantes principales de l'analyse factorielle des correspondances effectuée sur les 7 bandes de l'image Landsat.*

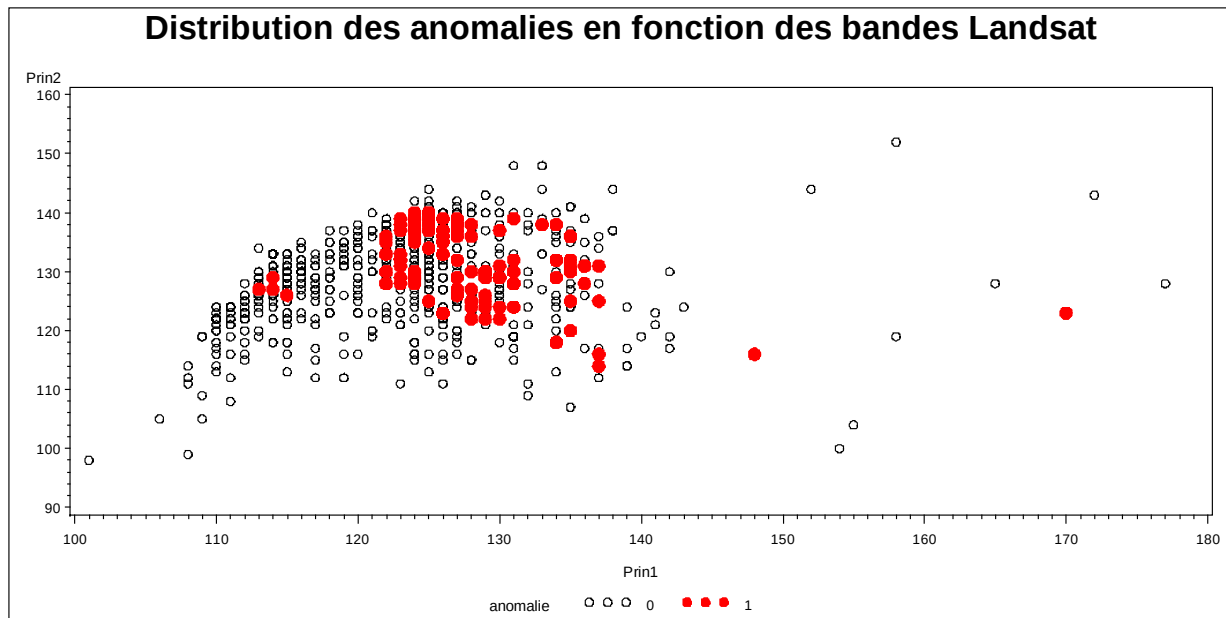


Figure 32. Distribution des anomalies en CO₂ et CH₄ (points rouges) par rapport aux valeurs des deux premières composantes de l'ACP effectuée sur les 7 bandes de l'image Landsat.

Les bandes contribuant le plus à la définition de la première composante correspondaient aux couleurs rouges (corrélation de Pearson entre les scores de la première composante et les réflectances de la bande Landsat : $R = 0.92$) et moyen infrarouge II ($R = 0.97$). Pour la seconde composante, il s'agissait du proche infrarouge ($R = 0.73$) et moyen infrarouge I ($R = 0.58$).

Relation entre la présence d'anomalies et les composantes de l'ACP

Les corrélations entre les mesures de concentrations en hydrocarbures gazeux et les réflectances de ces bandes sont faibles ($R < 0.15$ quel que soit le gaz considéré). L'absence de relation générale implique que les méthodes classiques de cartographie (comme le cokrigage) s'appuyant sur une variable secondaire dérivée de la télédétection reliée linéairement à une variable principale d'hydrocarbure gazeux n'étaient pas envisageable dans notre cas. Par contre, l'identification des sites anomaux sur la carte des deux premières composantes montrait une

distribution essentiellement regroupée dans une partie de la distribution des valeurs des deux composantes (Fig. 32).

L'observation du regroupement des données suggérait la bonne adéquation des processus de classement subséquents.

Estimation des densités de probabilité par kernel bivariée

Les sites où la présence d'anomalies de CO₂ et de CH₄ était détectée ont été extraits du jeu de données et conservés. Ces sites ont permis de rechercher dans quelle gamme de valeur de PC1 et PC2 se retrouvaient ces anomalies et de définir ainsi un ellipsoïde de densité minimale à partir de laquelle une présence d'anomalie était prédite.

Les ellipsoïdes d'isodensités montraient que les plages de valeurs pour les composantes PC1 et PC2 propices aux anomalies étaient réduites (Fig. 33)



Figure 33. Représentation du kernel de densité pour les anomalies de CO₂ et de CH₄ en fonction des deux premières composantes de l'ACP effectuée sur les 7 bandes de l'image Landsat



Figure 34. Localisation des anomalies en CO₂ et CH₄ observées (astérisques) et superposition aux anomalies prédites comme absentes (pixels gris) et présentes (pixels blancs).

Le seuil de densité à partir duquel on pouvait considérer avoir une présence d'anomalie a été établi au 5^{ème} percentile ce qui correspondait à une densité de valeur égale à 0.00058. Sur la figure 33, cela correspond à une ellipsoïde de dimension réduite et il était donc prévisible que seule une partie du territoire serait classifiée comme anomalique.

Cartographie

Le calcul des densités pour l'ensemble des pixels de l'image se trouvant à l'intérieur de la zone d'étude montrait que la classification est intéressante pour optimiser l'échantillonnage des hydrocarbures

gazeux. Un peu moins de la moitié (45.7%) de la zone d'étude est classifiée comme propice aux anomalies de gaz (Fig. 34).

Par transparence, il est possible de voir sur la carte que les astérisques sont positionnés sur un fond blanc essentiellement le centre de l'astérisque est blanc).

L'échantillonnage des hydrocarbures gazeux, selon cette approche pourrait être centré sur les zones prédites comme anomaliques apparaissant en blanc sur la figure. La superposition des anomalies en hydrocarbures gazeux sur le même fond permettrait de la valider cette hypothèse (Fig. 35).



Figure 35. Localisation des anomalies en hydrocarbures gazeux observées (étoiles) et superposition aux anomalies prédites comme absentes (pixels gris) et présentes (pixels blancs).

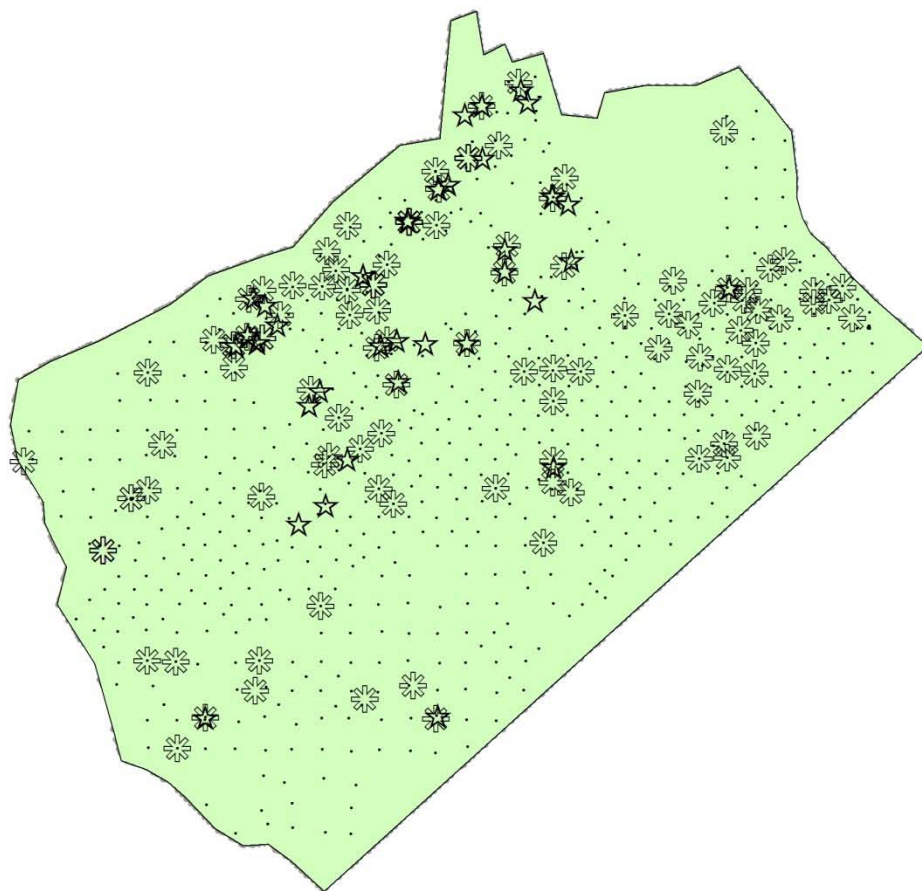


Figure 36. Superposition des anomalies en hydrocarbures gazeux observées (étoiles) et en CO₂ et CH₄ (astérisques). Les petits points noirs représentent les sites échantillonnés mais où aucune anomalie n'a été détectée.

On retrouve le même résultat que précédemment. Les astérisques sont superposés à des pixels essentiellement blancs, c'est-à-dire à des présences d'anomalies prédites à partir des concentrations de CO₂ et de CH₄. Cette observation visuelle est confirmée par la comparaison entre les anomalies en hydrocarbures gazeux observées et les anomalies prédites. Elle montrait que la classification était bonne car 41 anomalies en hydrocarbures gazeux sur 46, soit 89% des anomalies totales, se trouvaient contenues dans des pixels identifiés comme potentiellement propices aux anomalies.

L'utilisation de cette approche aurait donc permis de réduire de moitié les coûts associés à l'échantillonnage des hydrocarbures gazeux.

Il est intéressant finalement de superposer les anomalies de CO₂, de CH₄ et d'hydrocarbures gazeux pour vérifier leur relation spatiale (Fig. 36).

Les anomalies en hydrocarbures gazeux même si elles ne se superposent pas exactement aux anomalies en CO₂ et CH₄ se retrouvent spatialement sur les mêmes territoires. Cette observation confirme l'intérêt d'utiliser ces données plus largement.

9.2.2. Classification à partir du CO₂ mesuré en surface

Relation entre la présence d'anomalies et les composantes de l'ACP

La même démarche a été utilisée avec les données de CO₂ recueillies en surface. Les anomalies en CO₂ ont

permis d'attribuer à chaque pixel de l'image une présence ou une absence attendue d'anomalie.

à celle obtenue à partir des données de CO₂ et de CH₄ (Fig. 37).

Visuellement, la projection des anomalies de CO₂ sur les deux premières composantes est très ressemblante

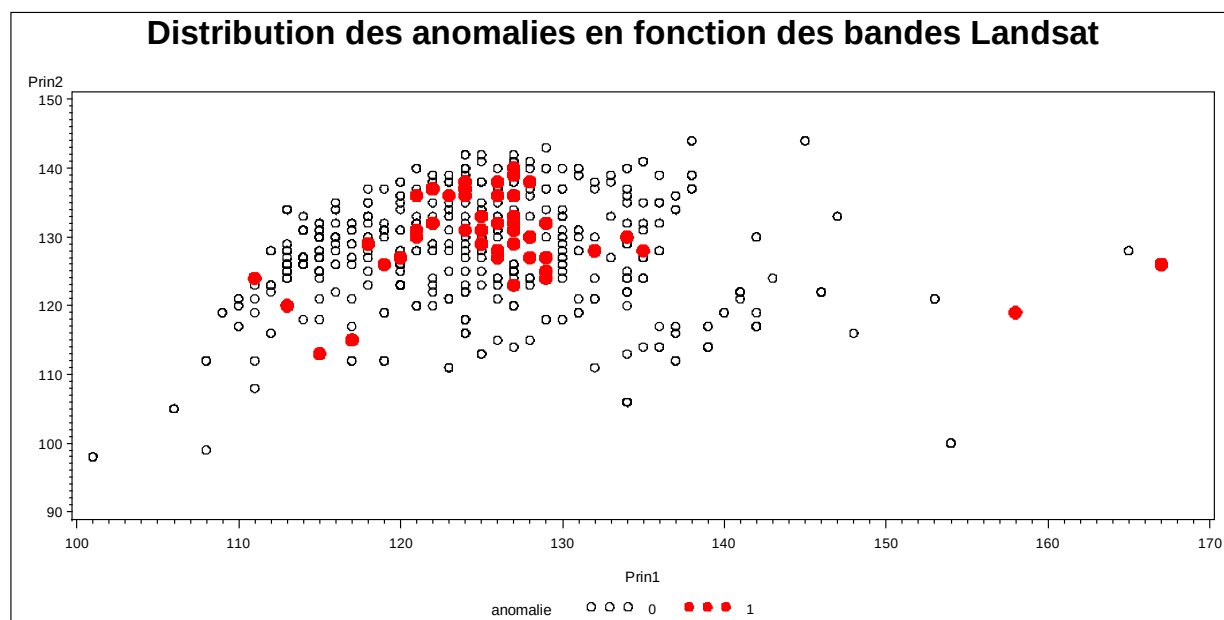


Figure 37. Distribution des anomalies en CO₂ (points rouges) par rapport aux valeurs des deux premières composantes de l'ACP effectuée sur les 7 bandes de l'image Landsat.



Figure 38. Représentation du kernel de densité pour les anomalies de CO₂ en fonction des deux premières composantes de l'ACP effectuée sur les 7 bandes de l'image Landsat

Les points sont essentiellement concentrés dans une gamme de valeur centrale des deux composantes principales mais quelques valeurs divergentes en sont éloignées.

Estimation des densités de probabilité par kernel bivariée

Les courbes d'iso-densité obtenue avec le kernel localisent les plus fortes valeurs de densité correspondant aux présences d'anomalies au centre du diagramme (Fig. 38). Le seuil à partir duquel une densité pouvait être assimilée à une présence était de 0.00041 (95^{ème} percentile). Ce seuil permettait d'éliminer 5 anomalies divergentes. Soixante-seize anomalies observées étaient bien prédites.

Cartographies

La fraction du territoire classifiée comme anomalique était de 50%, ce qui était là-encore particulièrement intéressant pour une optimisation de l'échantillonnage (Fig. 39).

La présence des anomalies en hydrocarbures gazeux observées se superpose relativement bien avec les anomalies prédites avec les concentrations de CO₂ obtenues en surface des sols (Fig. 40).

Trente-neuf anomalies sur 46 sont contenues dans la zone identifiée comme potentiellement propice aux anomalies soit 84%. Ce résultat est un peu moins bon que ceux obtenus avec les concentrations en CO₂ et CH₄ échantillonnées à 50 cm.

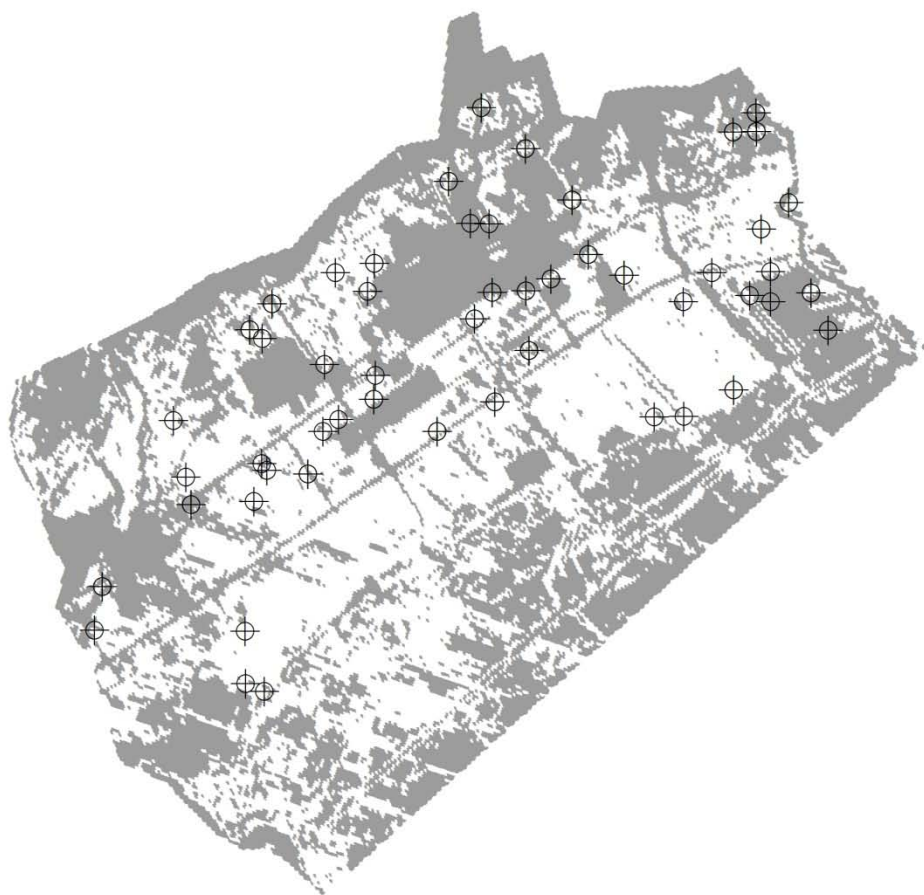


Figure 39. Localisation des anomalies en CO₂ observées (cibles) et superposition aux anomalies prédites comme absentes (pixels gris) et présentes (pixels blancs).



Figure 40. Localisation des anomalies en hydrocarbures gazeux observées (étoiles) et superposition aux anomalies prédites comme absentes (pixels gris) et présentes (pixels blancs).

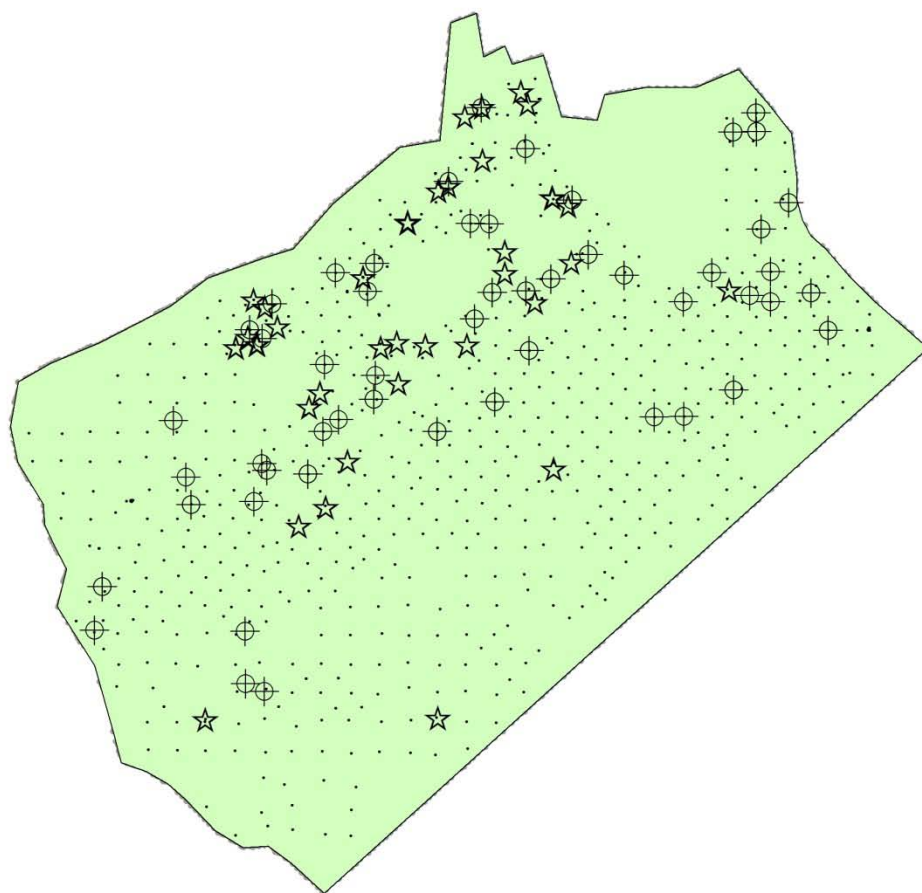


Figure 41. Superposition des anomalies en hydrocarbures gazeux observées (étoiles) et en CO₂ (cibles). Les petits points noirs représentent les sites échantillonnés où aucune anomalie n'a été détectée.

Sans surprise, les anomalies en hydrocarbures gazeux étaient spatialement corrélées avec celles du CO₂ (Fig. 41).

9.2.3. Relation entre les classifications obtenues avec le CO₂ mesuré en surface et le CO₂ et le CH₄ mesuré en profondeur

La comparaison des zones prédites comme anomaliques permet de juger de l'intérêt des concentrations en CO₂ obtenues à la surface des sols

par rapport au CO₂ et CH₄ échantillonnés à 50 cm de profondeur.

Visuellement, les résultats sont très comparables (Fig. 42). Les zones cartographiées comme potentiellement anomaliques couvrent un territoire plus important dans le cas de l'utilisation des données de CO₂ ce qui suppose une moins bonne discrimination. Ce résultat suggère que même si elles sont sujettes à des phénomènes de dilution atmosphérique, les concentrations en CO₂ recueillies en surface des sols pourraient être de grand intérêt.

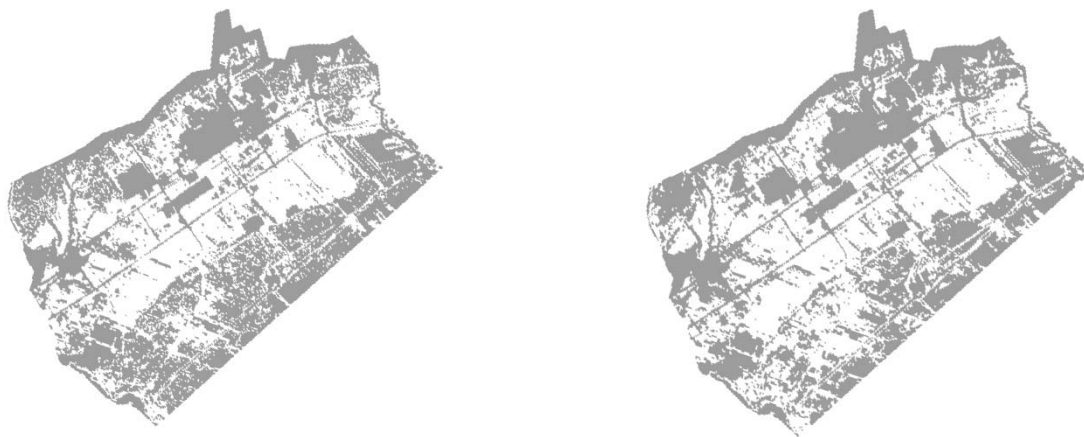


Figure 42. Comparaison des zones prédites comme anormales à partir des concentrations en CO₂ recueilli à la surface des sols et les concentrations de CO₂ et de CH₄ échantillonné à 50 cm de profondeur.

10. Discussion

Les mesures de gaz de sols et atmosphériques utilisées dans le volet géochimie de surface du projet de séquestration géologique du CO₂ doivent être accompagnées par la caractérisation des milieux dans lesquels ils sont échantillonnés. Ces données sont indispensables pour interpréter les résultats obtenus et pour juger de l'influence de facteurs qui pourraient biaiser les interprétations. Les données présentées dans ce rapport répondent à cet objectif. Le soin apporté à leur acquisition permet d'envisager également une utilisation future à des fins comparatives ou pour d'autres travaux.

L'imagerie satellitaire a permis de réaliser un modèle d'occupation du sol qui servira à tester l'effet de facteur confondant sur les gaz mesurés dans les sols. Le fort potentiel que possède la télédétection pour classer les territoires a également été mis à profit pour tester une méthode d'optimisation de l'échantillonnage des hydrocarbures gazeux. Les concentrations de CO₂ et de CH₄ sont influencées potentiellement par les processus biologiques de respiration et de décomposition. On pourrait alors être tenté d'éliminer ces données. Pourtant, notre étude montre que ce sont de bons indicateurs des zones anomaliques en hydrocarbures et permettent donc d'optimiser les levés de gaz. Ces gaz pourraient donc être tout à la fois biogéniques et thermogéniques (Gole, 1985). Des auteurs ont en effet montré que les dégazages profonds sont quantitativement non-négligeables, non seulement dans les zones volcaniques mais aussi par libération des gaz piégés dans les formations géologiques (Mörner et Etiope, 2002).

Un avantage des données de CO₂ et de CH₄ est qu'elles sont faciles à obtenir. Les gaz collectés en surface des sols (10 cm) pourraient être mesurés avec un levé aéroporté. En effet, des données de CH₄ peuvent être acquises aujourd'hui rapidement en hélicoptère sur l'ensemble d'un territoire avec des instruments comme les systèmes de détection au laser fabriqués par Boreal Laser (www.boreal-laser.com). Les sociétés gazières et pétrolières utilisent d'ailleurs cette technologie pour surveiller leurs gazoducs et vérifier l'absence de fuites. Les levés aéroportés de CH₄ permettraient de cibler plus rapidement des zones d'intérêt où des travaux complémentaires au sol pourraient être envisagés.

L'intérêt de l'imagerie Landsat pour identifier les zones de dégazage volcanique (Patrick et al., 2004), les zones de géothermalisme (Qin et al., 2011), les taux de carbone total des sols (Huang et al., 2007), et

plus généralement les propriétés du sol (Bishop et McBratney, 2001) a déjà été démontré. Des auteurs avaient même pointé l'intérêt des méthodes de télédétection pour l'identification des zones d'événements relatifs aux gisements d'hydrocarbures gazeux (Yatabe et Fabbri, 1986). Dans cette étude, l'information secondaire dérivée essentiellement des bandes rouges et moyen-infrarouges ont permis d'identifier les zones plus susceptibles de révéler des anomalies lors de l'échantillonnage. Ces territoires correspondent à une certaine occupation du sol (les zones de végétation basse non-agricole) et une zone spatiale (la zone industrielle et les bords du fleuve). Ces résultats ne doivent pas être interprétés comme une relation de cause à effet. En particulier, l'identification des zones de libération de gaz profonds par l'imagerie Landsat n'est pas montrée. Une interprétation prudente de ce résultat est que les bandes rouges et infrarouges fournissent une classification du sol permettant de détecter les zones les plus susceptibles de révéler des anomalies lors de l'échantillonnage des gaz des sols.

Pour aller plus avant dans l'interprétation des résultats, il serait nécessaire de comprendre l'origine des gaz recueillis en surface des sols. La mesure des concentrations en uranium dans les sols fournit une piste de réflexion en ce qui concerne le radon. Une analyse pourra être menée pour vérifier si les anomalies en radon se retrouvent préférentiellement dans les formations pédologiques les plus uranifères.

La géochimie élémentaire peut servir également à identifier la présence d'événements de gaz. Une étude réalisée au Manitoba a montré que la présence d'événements modifiait la composition géochimique des sols (Mann et al., 2005; Fedikow et al., 2009). Les éléments corrélés avec les événements étaient: Mo, Tl, Co, Ni, S, Th, Ca, Sb et Br. Pour ces auteurs, la proportion relative de ces éléments constitue même une signature des réservoirs de gaz. De la même façon, les fortes concentrations en mercure dans les sols ont été associées à des zones de libération de gaz profonds (Schlüter, 2000).

Les mesures de concentration en éléments dans les sols montrent que des rehaussements localisés existent dans la zone d'étude. Des travaux complémentaires devraient être envisagés pour évaluer le devenir de ces contaminants en cas de percolation du CO₂. Un scénario envisagé en cas de libération de CO₂ est que le pH des sols diminuerait entraînant une mobilité plus importante de certains éléments trace métalliques comme l'arsenic, le cadmium ou le plomb. L'augmentation des flux de contaminants vers les chaînes trophiques ou vers les

aquifères risque-t-elle de poser des problèmes toxicologiques? Des études seraient nécessaires pour évaluer la probabilité de ce scénario, c'est-à-dire : évaluer les modifications de la physicochimie des sols sous l'effet de la percolation du CO₂, évaluer les conséquences quant à la mobilité des éléments dans les sols et évaluer le risque de transfert vers les nappes phréatiques ou l'homme via les chaînes trophiques.

Les risques de libération potentielle d'éléments toxiques accumulés et immobilisés dans les sols illustrent que la surveillance des activités de séquestration géologique du CO₂ ne peut être basée uniquement sur la surveillance des nappes phréatiques superficielles. Les modifications au niveau de l'interface sol-atmosphère, c'est-à-dire dans le milieu où se concentre la vie, doivent être considérées et évaluées de manière prioritaire. Les milieux humides, particulièrement importants dans la région d'un point de vue écologique, devraient faire l'objet d'une forte attention. Comme pour d'autres milieux, il serait nécessaire de comprendre quelles seraient les modifications engendrées par une augmentation des concentrations de CO₂. La diminution du pH des eaux de surface serait-elle dommageable pour la faune et la flore de ces milieux?

Un des objectifs des mesures de gaz dans les sols est d'obtenir des traceurs de fuites de gaz profonds. Les comparaisons entre les valeurs de référence et les

compositions relatives de chacune des espèces avec les valeurs mesurées dans le futur devraient permettre d'identifier des libérations de gaz profonds. De la même façon, la chimie des éléments dans les sols pourraient fournir des traceurs des flux de gaz. Pour ce faire, la première étape serait de comprendre les modifications qu'entraîne la libération du CO₂ sur la physicochimie des sols.

Une limite des données présentées dans ce rapport est qu'elles ne dressent qu'un portrait superficiel des sols dans lesquels ont été échantillonnés les gaz. Par exemple, des dépôts décrits comme sableux peuvent en fait recouvrir des lits d'argiles mis en place précédemment. La texture de sols ne rend pas compte de la perméabilité de la totalité de la colonne stratigraphique. Les données présentées pourraient être utilement complétées par d'autres recueillies sur des échantillons collectés lors des forages.

11. Remerciements

L'équipe de recherche tient à remercier le personnel de l'INRS-ETE et en particulier MM René Rodrigue et Stéfane Prémont pour leur collaboration durant les phases de travaux au laboratoire. Sur le terrain ou au laboratoire, Mme Claire Kernin, MM. Louis Males et Fabian Cabascango ont contribué à collecter les données présentées ou à préparer les échantillons. Ce projet a été financé par le MDDEFP dans le cadre de la chaire de séquestration géologique du CO₂ à l'INRS-ETE.

Références

- Armelin, A. et Mousseau, P., 1998. Synthèse des connaissances sur les communautés biologiques du secteur d'étude Trois-Rivières-Bécancour. Zones d'intervention prioritaire 12 et 13. Environnement Canada, Conservation et Protection – région du Québec. Centre St-Laurent.
- Bider, J.R. et Matte, S., 1994. Atlas des amphibiens et des reptiles du Québec. Société d'histoire naturelle de la vallée du St-Laurent et Ministère de l'Environnement et de la Faune.
- Bishop, T. F. A. et McBratney, A. B., 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma* 103:149-160.
- Choinière, L. et Laplante, L., 1948. Étude des sols du Comté de Nicolet. Bulletin technique numéro 1. Division des Sols, ministère provincial de l'agriculture.
- Fedikow, M.A.F., Bezys, R.K., Nicolas, M.P.B. et Prince, P. 2009: Preliminary results of soil geochemistry surveys in support of shallow gas exploration, Manitou area, Manitoba (NTS 62G2); in Report of Activities 2009, Manitoba. Innovation, Energy and Mines, Manitoba Geological Survey, p. 193–206.
- Gole, M. J. B., C. R. M. 1985. Biogenic-Thermogenic Near-Surface Gas Anomaly Over Gingin and Bootine Gas Fields, Western Australia. *AAPG Bulletin* 69.
- Huang, X., Senthilkumar, S., Kravchenko, A., Thelen, K. et Qi, J., 2007. Total carbon mapping in glacial till soils using near-infrared spectroscopy, Landsat imagery and topographical information. *Geoderma* 141:34-42.
- Huijts, N.M.A., Midden, C.J.H. et Meijnders, A.L., 2007. Social acceptance of carbon dioxide storage. *Energy Policy* 35, 2780-2789.
- Hydro-Québec Production, 2002. Évaluation des risques écotoxicologiques et toxicologiques associés à l'exploitation des centrales de Gentilly-2 et de Bécancour. Service d'analyse de risque SAR inc, International Safety Research.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Jones, V.T. et Pirkle, R.J., 2007. Application of exploration geochemical methodology to CO₂ monitoring.
- Klusman, R.W., 2011. Comparison of surface and near-surface geochemical methods for detection of gas microseepage from carbon dioxide sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 5, 1369-1392.
- Mann, A.W., Birrell, R., Fedikow, M.A.F. et de Souza, H., 2005. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration; *Geochemistry: Exploration, Environment and Analysis*, 5, 3, 201–210.
- Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec (MDDEP), 2009. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5 – Échantillonnage des sols, Québec, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec.
- Mörner, N.-A. et Etiope, G., 2002. Carbon degassing from the lithosphere. *Global and Planetary Change* 33:185-203.
- Moutenet, J.-P., Bédard, K. et Malo, M., 2012. Public awareness and opinion on CCS in the Province of Québec, Canada, *Greenhouse Gases: Science and Technology*, vol. 2, p. 126-135, DOI:10.1002/ghg.1278.
- Nove Environnement inc., 2002. Inventaire des espèces fauniques et floristiques d'intérêt du site de Gentilly.
- Patrick, M., Dean, K. et Dehn, J., 2004. Active mud volcanism observed with Landsat 7 ETM+. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 131:307-320.
- Qin, Q., N. Zhang, Nan, P., et Chai, L., 2011. Geothermal area detection using Landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis – A case study in Tengchong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13:552-559.
- Sabourin, A., 2001. Rapport d'étape de l'inventaire des plantes menacées ou vulnérables ou susceptibles d'être ainsi désignées sur le territoire de la centrale Gentilly-2.
- Schlüter, K. 2000. Review: evaporation of mercury from soils. An integration and synthesis of current knowledge. *Environmental Geology* 39:249-271.
- Sharma, S., Cook, P., Robinson, S. Et Anderson, C., 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.
- Song, C., 2006. Global challenges and strategies for control, conversion and utilization of CO₂ for

sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing. *Catalysis Today* 115: 2-32.

Yatabe, S. M. et A. G. Fabbri., 1986. The application of remote sensing to Canadian petroleum exploration: promising and yet unexploited. *Computers & Geosciences* 12:597-609.