

REVUE DE LITTÉRATURE

Fentes de retrait du sol et amas de fumier



Rédigé par
Pierre-Luc Bégin, ing. jr
Denis Naud, ing.

**Direction de l'environnement et du
développement durable**

SEPTEMBRE 2007

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-49027-2

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	ii
Remerciements	iii
INTRODUCTION	1
1 – CONCEPTS DE BASE	2
Porosité	2
Pores	2
Types et dimensions des pores	2
Macropores	3
Fentes de retrait	4
Les caractéristiques de rétrécissement dans les sols gonflants	6
Méthodes de mesure	9
Mécanismes en cause	10
2 – TRANSPORT DE L’EAU EN SOLS FISSURÉS	14
Infiltration de l’eau dans les sols fissurés	14
Expansion/retrait de l’argile	17
Travail du sol	20
Digitation (Fingering Flow)	21
Facteurs augmentant le risque de présence de fentes de retrait	22
Travaux en cours	30
Bibliographie	31
Annexe 1 Horizons	34
Annexe 2 Cartes des teneurs en argile contenues dans les sols	41

Liste des figures

Figure 1. Fentes de retrait (Konrad et Ayad, 1997)	5
Figure 2. (a) Expansion en 3 dimensions. (b) Expansion en 1 dimension (Taboada, 2003)	8
Figure 3. Étapes de fissuration d'une argile St-Alban intacte (Konrad et Ayad, 1997)	10
Figure 4. Illustration du phénomène de la digitation	22
Figure 5. Schématisation du risque d'apparition de fentes de retrait....	26

Liste des tableaux

Tableau 1 : Noms des pores du sol selon leurs dimensions (Perret et al., 1999).....	3
Tableau 2 : Potentiel de gonflement et de rétrécissement des sols argileux (adapté de Taboada, 2003).....	9
Tableau 3 : Probabilité de trouver des fentes de retrait dans un sol selon trois facteurs.....	27

Remerciements

Au terme de ce travail, les auteurs tiennent à remercier les personnes qui ont contribué à la réalisation de la présente revue de littérature :

Robert Lagacé, Ph. D., ingénieur et agronome, professeur au Département des sols et de génie agroalimentaire de l'Université Laval.

Gilles Gagné, M. Sc., agronome, chercheur en pédologie à l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement.

Sylvain Tremblay, chef de service à la Direction de l'environnement et du développement durable du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Pierre Caron, technicien en arts appliqués et graphiques à la Direction de l'environnement et du développement durable du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Charles Savoie, agent de recherche et de planification socio-économique à la Direction de l'environnement et du développement durable du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Sylvie Pagé, agente de secrétariat à la Direction de l'environnement et du développement durable du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Luc Vallières, agent de recherche et de planification socio-économique à la Direction de l'environnement et du développement durable du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

INTRODUCTION

Le but de cette revue de littérature est de faire le point sur les fentes de retrait par rapport aux amas de fumier. Lors de l'élaboration du *Guide de conception des amas de fumier au champ*, certains spécialistes ont manifesté une préoccupation particulière sur ce sujet. Le présent document vise justement à définir si les fentes de retrait constituent un problème pour ce qui est du stockage.

Étant donné le peu d'informations disponibles et connues, ce document traitera : 1) des types de sols pouvant produire des fentes de retrait, 2) de l'épandage de fumier sur les sols pouvant se fissurer et 3) du stockage du fumier en amas au champ.

1 – CONCEPTS DE BASE

Porosité

Pourcentage du volume de la masse totale du sol qui n'est pas occupé par des particules solides.

Pores

Espace, dans la masse du sol, qui n'est occupé par aucune matière minérale solide. (Cet espace peut être occupé par de l'air, de l'eau ou d'autres matières gazeuses ou liquides.)

Types et dimensions des pores

Les ouvertures observées dans les sols peuvent être classifiées en fonction de leur dimension. Les micropores et les pores moyens ont généralement moins de 1 mm alors que les fentes de retrait (des macropores) qui peuvent être préoccupantes ont plusieurs millimètres et peuvent atteindre quelques centimètres. Elles sont souvent visibles à « l'œil nu » en surface du sol. Le tableau suivant (tableau 1) fait une revue des définitions des pores selon différents auteurs.

Tableau 1 : Noms des pores du sol selon leurs dimensions (Perret et al., 1999)

Terminology	ECD	Reference
Micropore	<30 μm	Jongerius (1957)
Mesopore	30 μm -100 μm	
Macropore	>100 μm	
Micropore	<30 μm	Marshall (1959)
Macropore	>30 μm	
Micropore	<75 μm	Johnson et al. (1960)
Very fine pore	75 μm -1000 μm	
Fine pore	1000 μm -2000 μm	
Medium pore	2000 μm -5000 μm	
Coarse pore	>5000 μm	
Cryptovoid	<0.1 μm	Brewer (1964)
Ultramicropore	<5 μm	
Microvoid	5 μm -30 μm	
Mesovoid	30 μm -75 μm	
Macrovoid	>75 μm	
Very fine pore	<2 μm	Russell (1973)
Fine pore	2 μm -20 μm	
Medium pore	20 μm -200 μm	
Coarse pore	>200 μm	
Micropore	<0.3 μm	McIntyre (1974)
Minipore	0.3 μm -30 μm	
Macropore	30 μm -300 μm	
Super pore	>300 μm	
Bonding pore	>0.005 μm	Greenland (1977)
Residual pore	<0.5 μm	
Storage pore	0.5 μm -50 μm	
Transmission pore	50 μm -500 μm	
Fissure	>500 μm	
Macropore	>1000 μm	Bouma et al. (1977)
Macropore	>60 μm	Bullock and Thomasson (1979)
Macrofissure	200 μm -2000 μm	Reeves et al. (1980)
Enlarged macrofissure	2000 μm -10 000 μm	
Macropore	>3000 μm	Beven (1981)
Micropore	<10 μm	Luxmoore (1981)
Mesopore	10 μm -1000 μm	
Macropore	>1000 μm	
Macropore	>1000 μm	Luxmoore et al. (1990)

Note : 1 μm = 0,001 mm

Macropores

Bevan et Germann (1982) font une énumération des types de macropores présents dans les sols :

- pores formés par la faune du sol,
- pores formés par les racines des végétaux,
- pores formés par les canaux naturels,
- pores formés par les fissures.

Ces derniers sont formés par le rétrécissement résultant de la dessiccation de sols argileux et sont désignés, dans ce document, comme étant des fentes de retrait. Les cycles de gel et de dégel peuvent aussi produire des fissures, tout comme certaines pratiques culturelles tels le sous-solage et la technique du drainage-taupe. Les sols argileux sont sujets, en gonflement et en rétrécissement, aux variations saisonnières qui déterminent les changements de la teneur en eau du sol. Lorsqu'une fissure est formée, elle peut revenir au même endroit au cours de plusieurs cycles d'humidification/dessiccation. Aussi, dans les sols drainés à forte teneur en argile, les fissures entre les agrégats naturels structuraux pourraient ne pas se refermer, même après une humidification prolongée. Cependant, dans un article de Wells et al. (2003), portant sur l'infiltration et la géométrie de surface d'un sol gonflant par suite de multiples averses simulées, il est mentionné que les fentes de retrait ne réapparaissaient pas dans la même position d'une averse à l'autre.

Fentes de retrait

Les sols argileux changent de consistance selon leur teneur en eau. Tout dépendant de sa teneur en smectite¹, un sol argileux gonflera avec une teneur en eau élevée et se rétractera lors de son dessèchement. Sous nos climats, les sols argileux sont souvent près de leurs états de saturation, et leur potentiel de gonflement est alors limité. Cependant, lors de

¹Minéraux argileux ayant un réseau cristallin 2:1 qui peut prendre de l'expansion. La substitution isomorphe donne naissance aux divers types de montmorillonite et crée une charge nette permanente équilibrée par des cations, de telle sorte que l'eau peut s'infiltrer entre les feuillets, produisant un échange réversible de cations et lui donnant des propriétés notables de plasticité (source : SISCan).

périodes de sécheresse prolongée, ces sols, ayant une teneur en eau plus faible, ont tendance à diminuer de volume et à créer des fentes de retrait. Les dimensions de ces fentes diminuent une fois le sol réhumidifié. Les fentes ainsi créées forment des chemins favorisant l'écoulement préférentiel de l'eau au travers du sol.

Dans le *Guide pour la description des sols* de Denis Baize et Bernard Jabiol (1995), les fentes de retrait sont décrites comme étant des macro-fissures qui affectent plusieurs horizons². Ces macro-fissures s'observent généralement dans les vertisols³ ou les sols très argileux smectitiques. Ces fissures, orientées verticalement, peuvent atteindre de 3 à 5 cm de largeur (figure 1) et un mètre de profondeur. Elles forment habituellement un réseau hexagonal de diamètre allant de 40 cm à un mètre.

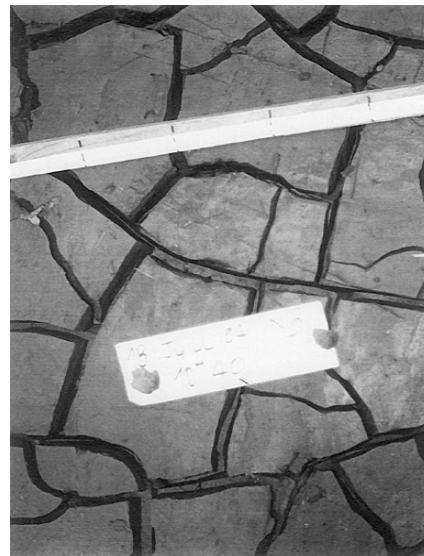


Figure 1. Fentes de retrait (Konrad et Ayad, 1997).

² Voir Annexe 1.

³ Argiles foncées riches en montmorillonite avec des caractéristiques d'expansion et de retrait. Ce groupe de sols a une haute teneur en argile (>30 % à au moins 50 cm de la surface) et, une fois sec, peut avoir des fentes de retrait qui ont au moins 1 cm de largeur et 50 cm ou plus de profondeur.

Selon la FAO (2002), « une fente de retrait est une séparation entre polyèdres grossiers (apparition de plusieurs surfaces de forme polygonale à la surface du sol qui sont en fait des polyèdres en trois dimensions et cette forme doit être perçue macroscopiquement). Si la surface est fortement autofoisonnante⁴, c'est-à-dire si elle est constituée d'une masse de granules (« *grumique* »), ou si le sol est cultivé lorsque ces fentes sont ouvertes, celles-ci peuvent se remplir, principalement de matériaux granulaires provenant de la surface ; cependant, elles restent ouvertes, c.-à-d. les polyèdres sont séparés. Une fente est considérée comme ouverte si elle permet l'infiltration et la percolation de l'eau dans un sol argileux sec (Soil Survey Staff, 1996). »

Un sol argileux qui a des propriétés d'expansion et de retrait formera lors de son assèchement des polyèdres de sol séparés entre eux par des fentes dites *de retrait*. Ces fentes peuvent laisser passer de l'eau et du matériel tant que le sol ne sera pas assez humide pour que l'argile se gonfle et les referment.

Les caractéristiques de rétrécissement dans les sols gonflants

Dans un exposé présenté en 2003, Taboada⁵ vulgarise les caractéristiques des sols gonflants. Les sols qui ont des propriétés gonflantes ont une masse volumique apparente qui change selon leur teneur en eau. Ils ont généralement une texture fine avec des argiles de

⁴ Qui augmente de volume.

⁵ Miguel Angel Taboada est ingénieur-agronome et professeur associé à la Faculté d'agronomie de l'Université de Buenos Aires en Argentine.

type smectite. Ils développent des fentes de retrait lors de leur assèchement.

Taboada résume aussi les processus qui interviennent lors de l'assèchement et de l'humidification de ces sols. Les sols qui s'assèchent diminuent de volume, et des fentes de retrait apparaissent en raison du stress interne dans le sol qui a réduit de volume. Ces fentes apparaissent dans les plans préexistants de faiblesse à l'intérieur des agrégats du sol⁶. Le sol se réduit donc aussi en hauteur. Lors de l'humidification, le sol augmente son volume en gonflant, les fentes de retrait se referment, et le niveau du sol remonte. Le gonflement est produit principalement par les molécules d'eau qui s'insèrent entre les plans de smectites.

La première phase de gonflement s'effectue en trois dimensions (figure 2a) et, ensuite, lorsque les fentes de retrait sont refermées, le gonflement s'effectue seulement en une dimension (figure 2b), causant ainsi une élévation du niveau du sol.

⁶ Aux endroits où il y a naturellement moins de cohésion dans le sol.

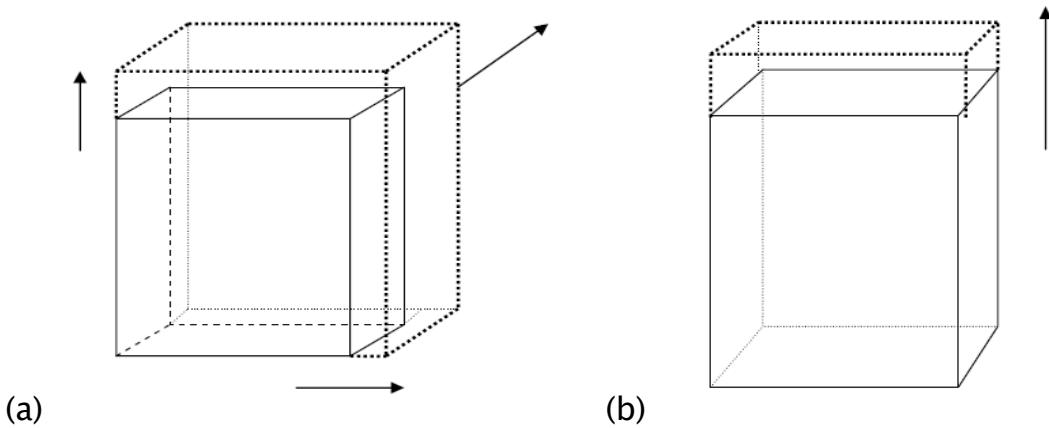


Figure 2. (a) Expansion en 3 dimensions. (b) Expansion en 1 dimension (Taboada, 2003).

Les effets indésirables en agriculture dus aux caractéristiques de rétrécissement et de gonflement sont le lessivage des fertilisants et des produits chimiques sous la zone racinaire par écoulement préférentiel (*by-pass flow*) dans les fentes de retrait. Ce lessivage est aussi fonction de l'intensité de la pluie, car le sol près des fentes doit être saturé d'eau pour qu'il y ait transport de l'eau dans les macropores et les fentes de retrait. Aussi, les fentes ne se referment pas nécessairement rapidement, et cela se traduira par un débit d'écoulement qui diminuera avec le temps (Messing 1990). Par contre, lorsque la densité de fentes de retrait sur une surface déterminée est très importante, cela peut diminuer le ruissellement sur un sol en pente.

Méthodes de mesure

Le potentiel de rétrécissement peut être mesuré par le *coefficient of linear extensibility* (COLE). Plus ce coefficient est élevé (tableau 2), plus le sol considéré présente des propriétés de rétrécissement et de gonflement importantes (il peut alors présenter une problématique au niveau des fentes de retrait). Le coefficient se détermine à l'aide de la formule :

$$COLE = (v_{1/3atm} - v_{dry})^{1/3} - 1$$

$v_{1/3atm}$: volume du sol à 1/3 atm (capacité au champ)

v_{dry} : volume du sol à l'étuve

Par exemple, la FAO (2002) stipule que : « Si le sol est irrigué, les 50 premiers cm ont partout un coefficient d'extensibilité linéaire (COLE) d'au moins 0,06. »

Tableau 2 : Potentiel de gonflement et de rétrécissement des sols argileux (adapté de Taboada, 2003).

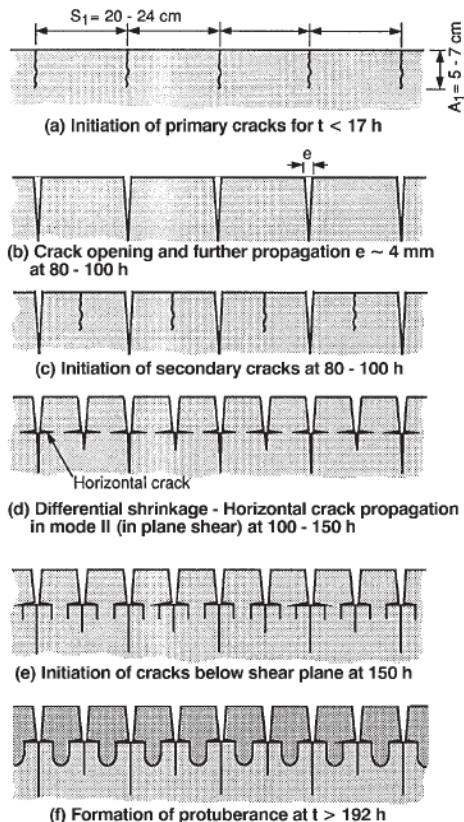
Potentiel gonflement-rétrécissement	COLE
Bas	< 0,03
Modéré	0,03–0,06
Haut	0,06–0,09
Très haut	> 0,09

Une autre méthode consiste à effectuer une courbe de rétrécissement. Cette méthode, un peu plus complexe (au niveau des manipulations), propose de construire une courbe de rétrécissement en présentant la

variation du volume spécifique du sol en lien avec sa teneur en eau durant un séchage à l'air.

Mécanismes en cause

Konrad et Ayad (1997) décrivent les mécanismes qui se produisent lors de la dessiccation. Pour comprendre ces mécanismes, il faut mesurer l'évolution de la teneur en eau, du tassement, de la succion en fonction de la profondeur, de la température et de l'humidité relative à la surface du sol. Voici un bref aperçu (figure 3) des étapes de fissuration d'une argile Saint-Alban intacte située à 80 km à l'ouest de la ville de Québec :



- (a) — Formation des fissures primaires (distance entre les fissures de 20 à 24 cm)
- (b) — Augmentation de la largeur des fissures ($e = 4$ mm)
- (c) — Formation de fissures secondaires
- (d) — Formation de fissures horizontales à l'intérieur des fissures existantes
- (e) — Formation de fissures sous les fissures horizontales
- (f) — Formation de protubérances sous les polygones produits

Figure 3. Étapes de fissuration d'une argile St-Alban intacte (Konrad et Ayad, 1997).

Lors d'expériences sur une argile de la série Windsor (au Royaume-Uni) pour une réhumidification du sol en automne, Reid et Parkinson (1984) ont fait les constats suivants en comparant l'assèchement et l'humidification d'un sol avec des animaux en pâturage et d'un sol sans animaux. Lorsque la structure de surface du sol est abîmée par le piétinement des animaux au pâturage, les fentes de retrait sont bien développées, et une portion des précipitations est dirigée vers ces fentes, sans ruissellement. Le piétinement amène une destruction de la végétation, et le sol est ainsi mis à nu. Cependant, dans le sol qui n'était pas soumis aux contraintes animales (piétinement), il n'y a pas eu de fentes de retrait dues au dessèchement saisonnier, et l'eau des précipitations s'est distribuée par diffusion en surface seulement. L'assèchement des sols argileux provoque une contraction des agrégats naturels (réduction de leur volume) ainsi que des changements dans la distribution et la grandeur des vides (pores). Les fentes de retrait sont surtout présentes aux endroits où la structure du sol a été modifiée par des pratiques comme le labour, et plusieurs s'étirent jusque dans le sous-sol. Ces fentes sont considérées comme étant d'importants canaux pour les eaux de précipitations lorsque la phase de réhumectation⁷ s'effectue en automne et au début de l'hiver. Reid et Parkinson constatent aussi que la teneur en eau du sol à plus de 100 cm n'est pas vraiment

⁷ Accroissement de la teneur en eau (humidité) dans un milieu non saturé (sol, échantillon), de la réserve d'eau du sol, notamment par rapport à un état initial stable : « humidification d'un sol sec ». Évolution correspondante du profil d'humidité.

touchée par l'évaporation saisonnière, peu importe les conditions. Ils notent aussi que le patron d'humidification des sols argileux est très lent. De plus, lorsque le sol se réhumidifie après une précipitation, la réhumidification se situe à la surface du sol et au fond des fentes de retrait. Ils ont démontré que la phase d'évaporation pouvait facilement être prédictive à l'aide de l'équation de Penman, mais que la phase de réhumectation n'était pas un processus simple. Pour les cas où la structure de surface d'un sol argileux est « affectée » par des animaux en pâturage, ils font état que les fentes de retrait de forme polygonale sont communes après l'évaporation estivale et que les précipitations automnales sont dirigées vers le sous-sol en passant directement par les fentes de retrait.

Lors d'une expérience portant sur la recharge en eau dans un sol présentant des fentes de retrait, Blake et al. (1973), ont ajouté du tritium (radio-isotope de l'hydrogène) à 100 litres d'eau dans un sol relativement sec (pélosol). Ce sol était caractérisé par un COLE de 0,115 et de petites fentes de retrait (aucune dimension n'est mentionnée dans l'article) entre les agrégats⁸ naturels. Les résultats font voir que le tritium et l'eau se sont écoulés dans les fentes de retrait des horizons A et B (0 à 55 cm) comme de l'eau libre. Le tritium et l'eau se sont aussi imbibés sur la surface des agrégats naturels (*ped walls*) et ont même migré jusqu'à

⁸ Un groupe de particules de sol retenu ensemble par cohésion de telle manière qu'ils se comportent mécaniquement comme unité.

l'horizon C (+ de 55 cm). Dans l'horizon Bva (11–24 cm), la concentration de tritium était beaucoup plus grande sur la surface des agrégats naturels (*peds*) que dans le sol provenant de l'intérieur des agrégats naturels (le tritium ne pénétrait pas ou peu à l'intérieur des agrégats). Lors de l'application de la solution aqueuse, les auteurs ont remarqué que le taux d'infiltration était de l'ordre de 9 cm/min. Aussi, le sol au-dessus du niveau de 50–55 cm est resté beaucoup plus sec que la capacité au champ ce qui indiquait que le débit massique au travers des fentes de retrait était plus dominant que le flux d'infiltration.

2 – TRANSPORT DE L’EAU EN SOLS FISSURÉS

La recherche documentaire n'a pas permis de déceler d'études concernant la mise en amas de fumiers sur un sol fissuré. Ainsi, dans cette section, les études présentées porteront davantage sur le transport de l'eau en milieu poreux, sur la contamination de l'eau et sur l'épandage du lisier. Ces axes de recherche ont été choisis étant donné leur complémentarité avec le matériel qui est déposé au champ et son comportement dans le sol. Bien que le lien entre les fentes de retrait et les amas au champ ne soit pas explicite dans les études, les contaminants et leur comportement (lors des épandages de lisier) sont vraisemblablement les mêmes dans un sol présentant des fentes de retrait.

Infiltration de l'eau dans les sols fissurés

Novák et al. (2000) ont effectué une étude portant sur l'infiltration de l'eau dans un sol présentant des fentes (soit sur une surface de 1 m² ayant une porosité réelle des fentes de 0,046 m²/m² et une longueur spécifique des fissures de 11,1 m/m², ce qui donnerait des fissures de largeur moyenne de 4 mm). Cette étude associe l'infiltration dans les fentes avec un transport accéléré des solutés, qui pénètrent plus profondément dans le sol et qui présentent alors des risques pour la pollution du sol et de la nappe phréatique. Ces solutés contiennent notamment des nutriments qui se déplacent rapidement sous la zone

racinaire des cultures agricoles. La capacité d'infiltration de ce type de sol (présentant des fentes de retrait) peut donc être majorée de 34 % par rapport à un sol argileux ne présentant pas de fentes de retrait. Les taux d'infiltration de ces sols ont été évalués pour l'irrigation.

Dans l'étude de Chadwick et Chen (2002), on rapporte que l'application de nutriments peut passer rapidement au travers de la matrice du sol si ce dernier possède des canaux d'écoulement préférentiel. Ces canaux seraient d'ailleurs la cause majeure de la contamination des eaux souterraines selon ces auteurs. La vitesse de contamination est attribuée aux fissures (dans le sol) qui causent l'écoulement préférentiel. Le travail du sol (labour par exemple) est proposé comme solution, car il détruit la continuité des pores entre l'épaisseur du labour et les horizons sous-jacents. Si aucun travail n'a été effectué sur le sol, ce dernier sera propice au développement de haute densité de canaux verticaux relativement larges. De plus, l'application de fumier pourrait encourager une plus grande activité des vers de terre ce qui pourrait produire une plus grande continuité des macropores. Il y aurait donc un transfert des contaminants plus rapide dans un type de sol donné intact (sans travail ou travail réduit) que dans un sol travaillé, car les contaminants s'écouleraient en étant moins filtrés par la matrice du sol.

Dans un article, Dexter (1988) explique que, pour emmagasiner de l'eau pour un usage ultérieur par les plantes, un sol doit avoir un système de pores continus avec la surface du sol. Ce système doit être configuré ainsi pour être en contact avec les précipitations ou l'irrigation. Les pores doivent être d'une grandeur suffisante pour que l'infiltration soit aussi grande que le taux d'application de l'eau. Si l'infiltration n'est pas assez grande, il y aura du ruissellement et, probablement, de l'érosion. Par contre, l'auteur rapporte différentes citations portant sur l'infiltration dans les sols argileux comportant des macropores. Lorsque les fentes de retrait atteignent la surface du sol, l'eau ruisselée peut s'infiltrer à l'intérieur de ces craques et « court-circuiter » la matrice du sol. Dans ce cas, l'humidification du sol se produira dans les macropores verticaux et à la surface des agrégats naturels plutôt qu'à la surface du sol. Le même effet se produit avec les canaux creusés par les vers de terre. Cette eau qui traverse la matrice du sol au-delà de la zone racinaire ne sera donc pas disponible pour l'usage de la plante. Le transport rapide dépassant la zone racinaire pourrait aussi transporter des fertilisants, des herbicides, des pesticides, des micro-organismes, etc., presque directement jusqu'à la nappe phréatique.

Expansion/retrait de l'argile

Dans une étude de Nemati et al. (2002), une expérience a été menée pour évaluer la contamination des eaux souterraines sur un loam argileux présentant des propriétés de rétrécissement (espace de 5 mm entre le sol sec et le cylindre d'échantillonnage lors du processus de séchage). Cette expérience a été menée avec différents traceurs et différents taux d'humidification du sol. Les traceurs étaient le brome (qui a un comportement similaire aux nitrates), et le césium 137 (qui se comporte comme le phosphore). Les taux d'humidification étaient les suivants : rapide (potentiel de l'eau : 0 kPa), moyen (-0,2 kPa) et lent (-1,0 kPa). Les résultats de l'expérience sont les suivants :

- Pour le césium 137, un traceur fortement adsorbé, plus les chercheurs humidifiaient le sol rapidement, plus le traceur se faisait transporter rapidement et en grande quantité dans le profil de sol. Les auteurs de l'étude ont remarqué aussi que les contaminants adsorbés sur la surface des agrégats pouvaient être transportés dans le profil du sol plus rapidement et en plus grande quantité que ce qui aurait pu être prédict avec les modèles classiques (stochastique-convectif et convectif-dispersif). En fait, la contamination était plus grande en situation réelle qu'avec les modèles classiques.

- Pour le brome, un traceur mobile, lorsque le sol est mouillé rapidement, l'effet du transport des contaminants de la zone d'écoulement rapide (gros pores) à la zone d'écoulement lent (petits pores) est diminué (effet de goulot). Les auteurs sont d'avis que les pores se sont colmatés par suite de l'hydratation rapide du sol et que la tortuosité⁹ des pores a augmenté. Cette tortuosité pourrait aussi mener à une augmentation de la masse des contaminants dans le sol et à une diminution de la vitesse du transport de l'eau au travers du profil de sol.

Dans le nord de l'Italie, Mantovi et al. (2005) ont étudié le lessivage des nitrates au travers de la zone non saturée suivant l'application de lisier de porc. Ils ont réalisé que, dans un sol avec une texture fine, les propriétés de rétrécissement/gonflement des argiles déterminent des conditions de drainage rapide (macroporosité). Ils ont aussi constaté que, durant les premières périodes de précipitation, les nitrates ont été lessivés au travers des premiers mètres de la zone non saturée, à au moins 4 mètres de profondeur. Il est à noter que ce sol possédait une forte teneur en argile (de 39 % à 53 % sur les 150 premiers centimètres) et que la nappe se trouvait à une profondeur qui oscillait entre 10 et 17 mètres.

⁹ Allongement des trajectoires réelles des particules d'eau en mouvement dans les interstices d'un milieu perméable, par rapport aux lignes de courant théorique qui schématisent l'écoulement convectif régi par la loi de Darcy à travers ce milieu considéré macroscopiquement comme continu. La tortuosité peut s'exprimer quantitativement par le carré du rapport entre la longueur (moyenne) des trajectoires réelles et la longueur des lignes de courant théoriques.

En faisant un parallèle avec le Québec, pour avoir des conditions semblables à celles en Italie, il faudrait retrouver une catégorie de sol dénommée *vertisol*. Lamontagne et Cossette (1994) décrivent cependant pourquoi nous n'avons pas de vertisols au Québec, mais qu'il est possible d'y retrouver des fentes de retrait. Nos sols peuvent contenir une quantité importante d'argile (type smectite/vermiculite), mais il n'y a pas de dominance des argiles de type montmorillonites. Aussi, au niveau du climat, nos précipitations sont réparties assez uniformément tout au long de l'année, et cela empêche la création de périodes de sécheresse prolongée. Certaines régions, sous des conditions de cultures particulières et sur des sols gleysoliques ou luvisoliques, peuvent présenter des propriétés vertiques¹⁰ avec des fentes de retrait plus ou moins profondes. Ces fentes sont habituellement observées lors des années les plus sèches. Ces auteurs mentionnent aussi que De Kimpe et Laverdière (1980) ont étudié les effets du drainage souterrain dans les régions de Montréal, de Québec et du Lac-Saint-Jean; ceux-ci ont observé que, dans les horizons B, les cycles de dessiccation-humectation créaient un réseau de fentes verticales. De Kimpe et Mehuys (1979) font état que, dans les sols à forte teneur en argile, l'horizon C est généralement humide sur de longues périodes durant l'année et que, lors de la prise d'échantillon, ils ont remarqué la présence de fractures

¹⁰ Ayant certaines propriétés d'un vertisol.

conchoïdales¹¹ attribuées au phénomène de dessiccation lorsque la nappe était basse. Finalement, De Kimpe et al. (1990) concluent que la problématique est surtout située dans la région de la plaine de Montréal; cela est dû au climat plus chaud et aux périodes de temps sec plus prolongées durant l'été. Les fentes de retrait qui y ont été observées avaient de 75 à 90 centimètres de profondeur avec un pourcentage de retrait approximatif de 10 % (en termes de volume). Un autre fait à noter est que la couverture de neige est beaucoup plus faible dans cette région, ce qui peut accentuer les cycles de gel-dégel. Le froid allant plus profondément, cela peut avoir une incidence sur la distribution des pores, la présence de vides planaires et de fentes de retrait.

Travail du sol

Selon Gupta et al. (1997), le travail du sol (labour par exemple) est une pratique qui peut réduire l'apport d'azote et de phosphore aux eaux de surface et souterraines. Après épandage de lisier sur un sol loam limoneux avec labour ou sans labour, les chercheurs ont déterminé que le labour brise l'orientation des agrégats du sol. Il affecte alors le transport dans le sol en induisant des changements physiques aux structures des micropores et des macropores. De plus, selon M. Marcel Giroux¹², agr., M.Sc., chercheur à l'IRDA, pour une parcelle sans travail du

¹¹ Qui a l'aspect d'une coquille; une cassure conchoïdale est une cassure franche souvent brillante, à surface lisse et courbe, un peu onduleuse, les ondulations s'arrangeant concentriquement à partir du point du choc ayant produit la fracture : elles correspondent au déplacement de l'onde de choc dans le solide.

¹² Communication personnelle.

sol, une infiltration plus importante serait due, en partie, à la présence de macropores ou de canaux préférentiels qui ne seraient pas perturbés ou détruits par le travail conventionnel.

Digitation (Fingering Flow)

La digitation est un écoulement préférentiel qui se produit dans un sol non saturé lorsqu'une couche de sol à texture fine repose sur une couche de sol à texture grossière (figure 4). Ce phénomène ne se produira pas si l'ordre des couches est inversé. Quand le front de mouillage du sol à texture fine entre en contact avec le sol à texture grossière, l'absorbance et la capillarité de ce dernier sont souvent insuffisantes pour attirer l'eau de l'autre côté de l'interface. Alors, l'eau s'accumule à la surface supérieure de l'interface jusqu'au point où la tension de l'eau diminue suffisamment pour pouvoir s'écouler dans le sol grossier (dans ce cas, il n'y a probablement pas de fentes de retrait en profondeur). Si la perméabilité du sol grossier est beaucoup plus élevée que le taux d'infiltration dans le sol fin, la pénétration dans le sol grossier surviendra en des points isolés le long de l'interface plutôt que sur toute sa surface (il n'y aura pas de front mouillant). L'eau s'écoule alors rapidement au niveau des points de pénétration en créant de minces doigts d'eau. Comme les doigts sont minces, l'eau et toutes les substances chimiques qu'elle contient peuvent potentiellement se déplacer rapidement à de grandes profondeurs dans le sol à texture grossière. La digitation constitue donc un mécanisme important qui, même en l'absence de

fentes de retrait ou de macropores, entraîne les pesticides et les engrais solubles à se déplacer rapidement d'une couche supérieure de sol à texture fine vers la rhizosphère d'une culture et dans l'eau souterraine (Bowman et Renolds 2006). Cependant, ce type de superposition (texture fine sur texture grossière) est peu commun au Québec.

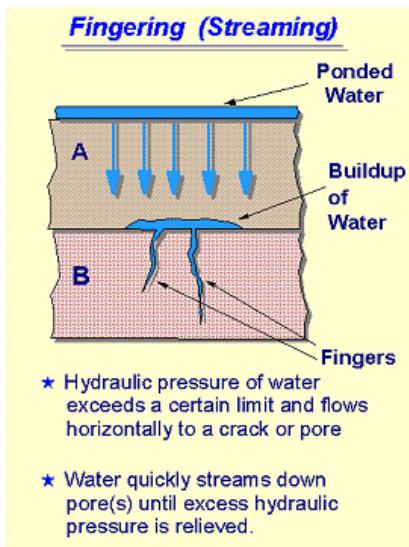


Figure 4. Illustration du phénomène de la digitation¹³

Facteurs augmentant le risque de présence de fentes de retrait

Après rencontre avec MM. Michel C. Nolin, agr. Ph.D., et Luc Lamontagne, M. Sc., des Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, des facteurs qui pourraient augmenter le risque de présence de fentes de retrait au Québec ont été soulevés. Ces facteurs ne signifient pas qu'il y aura nécessairement des fentes de retrait, mais qu'il y a possibilité de développement de fissures dans certaines conditions. Ces facteurs permettront éventuellement de

¹³ Source : http://sci.agr.ca/london/faq/water-leau_e.htm, consulté le 27 février 2007.

déterminer certaines zones agricoles sensibles à ce phénomène. Les quatre principaux facteurs généraux dont MM. Nolin et Lamontagne ont fait allusion sont : le facteur pédologique, le facteur agroclimatique, l'utilisation du sol et la période de l'année.

Au niveau de la pédologie, trois classes permettent de porter un jugement sur la probabilité d'un sol de présenter des fentes de retrait. La classe la plus sensible contient les sols qui ont un contenu en argile de plus de 35 % (argileux très fin et argileux fin). En présence de cette classe, il n'y a pas de certitude de trouver des fentes de retrait, mais la probabilité de développement reste élevée. Il y a ensuite la classe de sensibilité moyenne qui comprend les sols ayant un contenu en argile qui se situe entre 18 % et 35 % (limoneux fin). Ces sols n'ont pas toutes les conditions requises pour présenter des fentes de retrait, mais peuvent, combinés avec d'autres facteurs, devenir problématiques. Finalement, les sols de moins de 18 % de contenu en argile ne semblent pas problématiques (limoneux grossier, loameux grossier et sableux).

Pour considérer le facteur agroclimatique, l'index de l'humidité climatique d'Agriculture et Agroalimentaire Canada a été utilisé. Les données sont exprimées sous forme Précipitation-Évapotranspiration Potentielle (soustraction P-ETP en mm) et représentent, sur une base annuelle, le surplus ou le déficit en eau (en mm) subi par les végétaux.

Ce facteur a aussi été divisé en trois catégories. La catégorie la plus sensible a été déterminée en fonction de l'indice P-ETP de la plaine de Montréal étant donné que Lamontagne et Cossette (1994) ont observé le développement de fentes de retrait dans cette région. Donc, les conditions sont plus critiques là où le déficit en eau est le plus élevé. Ainsi, un déficit supérieur à 150 mm est favorable au développement de fentes de retrait. Vient ensuite la zone de sensibilité transitoire comprenant un déficit entre 150 et 100 mm. Puis finalement, la zone la moins problématique comprend les régions qui ont un déficit inférieur à 100 mm. Ces déficits montrent à quel point l'évapotranspiration peut être plus élevée que les précipitations : l'assèchement du sol peut devenir problématique. Cet assèchement pourrait causer des fentes de retrait dans les zones à sensibilité élevée.

L'utilisation d'un sol peut aussi être un facteur causant l'apparition des fentes de retrait. En effet, le niveau de couverture végétale du sol contribue à l'assèchement ou non du sol. Par exemple, pour un même type de sol, le sol ayant une couverture moindre deviendra sec plus rapidement qu'un sol davantage couvert. Ainsi, l'utilisation du sol a été divisée en trois catégories allant de la couverture¹⁴ moindre à une haute couverture. Il est à noter qu'une prairie qui est établie depuis plusieurs années peut, malgré tout, devenir problématique au niveau des fentes de

¹⁴ Ensemble des plantes (petits arbrisseaux, herbes, mousses, etc.) qui couvrent un sol, le protégeant des variations de température et d'humidité et de l'érosion.

retrait. Le dernier facteur concerne le moment de l'année pendant lequel l'amas est au champ. Le moment qui peut être le plus problématique se situe autour des mois de juillet et d'août, car la possibilité est plus grande qu'il y ait une période de sécheresse. Pour la zone de sensibilité moyenne, les mois de juin et de septembre peuvent être problématiques selon les variations du climat à chaque année. Les autres mois (octobre à mai) sont beaucoup moins problématiques, car le sol est souvent saturé en eau et les fentes de retrait n'ont pas tendance à se développer sous ces conditions. Cependant, le climat est sujet à changement à chaque année et ces périodes peuvent varier.

Donc, pour un site donné, plus est élevé le nombre de facteurs présents, plus est grande la probabilité de retrouver des fentes de retrait (figure 5 et tableau 3).

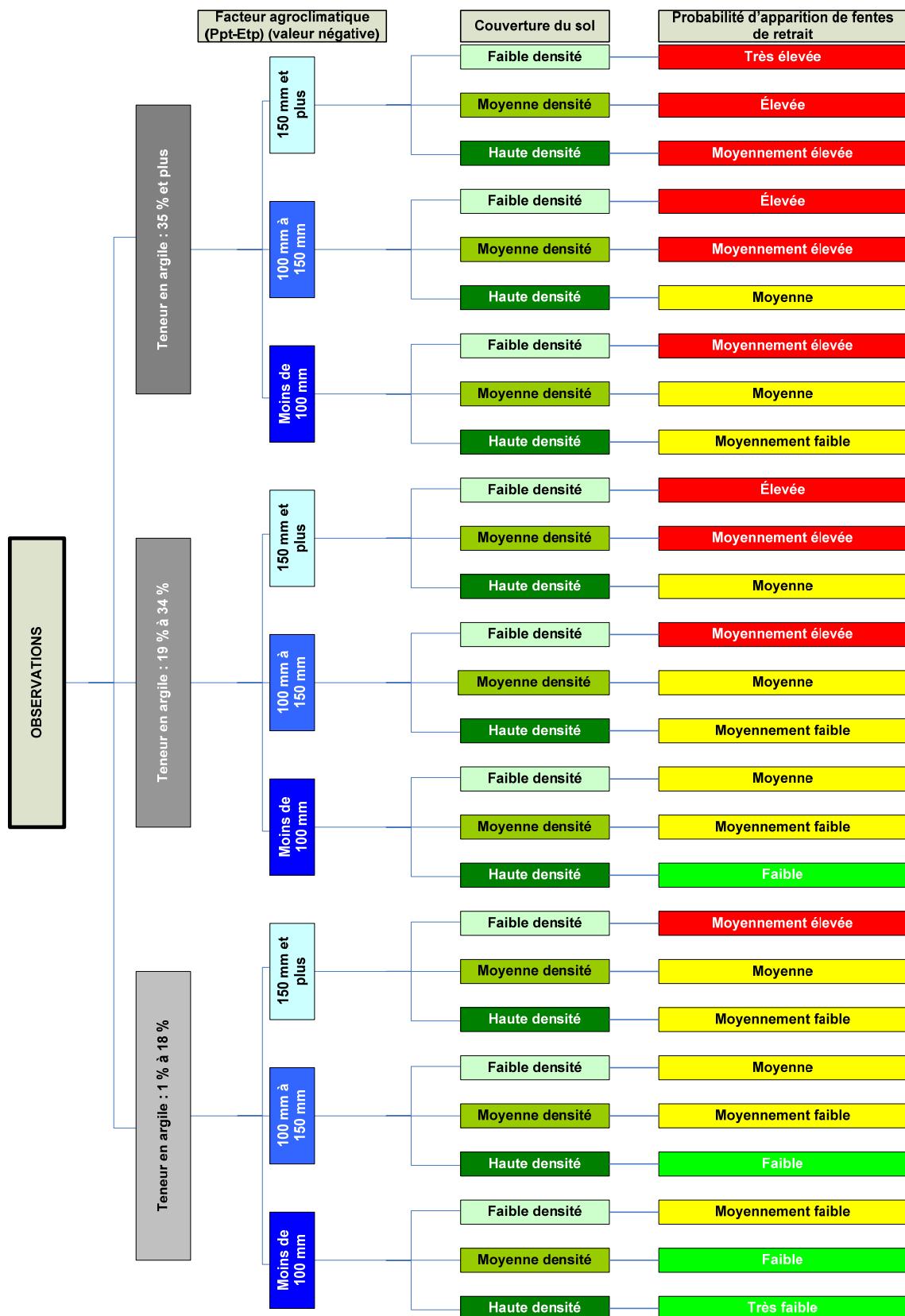


Figure 5. Schématisation du risque d'apparition de fentes de retrait.

Tableau 3 : Probabilité de trouver des fentes de retrait dans un sol selon trois facteurs.

Probabilité	Pédologie % d'argile	Probabilité	Agroclimatique Déficit annuel (Ppt-évapotranspiration)	Probabilité	Utilisation du sol Couverture
Élevée	≥ 35 %	Élevée	> 150 mm	Élevée	Sol nu ou faible (ex. maïs)
Moyenne	19 % à 34 %	Moyenne	100 à 150 mm	Moyenne	Moyenne (ex. petites céréales)
Faible	≤ 18%	Faible	< 100 mm	Faible	Dense (ex. prairies)

Toujours suite à la rencontre avec MM. Nolin et Lamontagne, la Direction de l'environnement et du développement durable du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec a élaboré des cartes pour chacune des régions administratives du Québec. Ces cartes illustrent deux des facteurs accentuant la probabilité de trouver des fentes de retrait en milieu agricole : le facteur agroclimatique et le facteur pédologique.

Les cartes schématisent le facteur agroclimatique à l'aide d'isocourbes tirées de l'index de l'humidité climatique de SISCan. Ces lignes représentent le déficit hydrique, soit la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (P-ETP). À partir de ces renseignements (pour une saison de croissance définie, toutes les valeurs sont négatives), des courbes (50, 100, 150, 200) ont été tracées sur la carte du Québec (annexe 2). Plus le chiffre sur la courbe est grand, plus l'évapotranspiration potentielle risque d'être élevée comparativement aux précipitations.

Cette humidité climatique illustre, en quelque sorte, le facteur agroclimatique, proposé par MM. Nolin et Lamontagne, qui pourrait causer l'apparition des fentes de retrait. Sur les cartes produites par le MAPAQ, les zones qui présentent une haute probabilité au niveau du facteur agroclimatique (déficit de plus de 150 mm) sont situées dans les régions administratives de l'Abitibi-Témiscamingue, de l'Outaouais, des Laurentides, de Lanaudière, de la Montérégie (secteur est et ouest), de Laval et de Montréal. Les régions possédant une probabilité moyenne (déficit de 100 mm à 150 mm) sont l'Abitibi-Témiscamingue, l'Outaouais, le Nord-du-Québec, les Laurentides, Lanaudière, le Centre-du-Québec, la Montérégie (secteur est et ouest), la Mauricie, ainsi que de petites parties des régions de Chaudière-Appalaches et du Bas-Saint-Laurent.

Une compilation des différentes proportions d'argile dans le sol est illustrée sur la carte pour le facteur pédologique. Ces cartes ont été développées à partir des différents rapports pédologiques produits pour les sols du Québec. Une autre carte illustre la couverture cartographique des rapports pédologiques pour les régions administratives du Québec.

Les teneurs en argile des sols ont été divisées en trois classes dans le but d'évaluer la probabilité d'apparition de fentes de retrait dans une région donnée. Les classes sont :

- de 1 % à 18 % d'argile, faible probabilité d'apparition de fentes de retrait, zones vertes ;
- de 19 % à 34 % d'argile, probabilité moyenne, zones jaunes ;
- 35 % et plus d'argile, probabilité élevée, zones rouges.

Les cartes donnent une vue d'ensemble des différentes régions administratives du Québec. En combinant les courbes d'humidité climatique avec le taux d'argile dans le sol, il devient plus simple de cerner les régions qui pourraient représenter un risque plus important au niveau de l'apparition des fentes de retrait.

Il est important de comprendre que les cartes illustrent une probabilité d'apparition de fentes de retrait. Dans ses recommandations de mise en amas de fumier au champ, le conseiller devrait toujours bien évaluer la situation réelle selon la connaissance qu'il a du terrain. Ainsi, pour tenir compte de la probabilité d'apparition des fentes de retrait, il doit considérer la pédologie du site (teneur en argile), le facteur agroclimatique (période de mise en amas et de reprise) ainsi que le type de couverture du sol du site.

Les fentes de retrait dans les sols argileux causeront une problématique plus importante lorsqu'elles seront profondes. Pour ce faire, toujours selon M. Lamontagne, il faut observer la composition complète du profil pédologique jusqu'à une profondeur de 120 cm. La teneur en argile devrait alors être évaluée sur la coupe témoin d'un profil pédologique qui comprend généralement les horizons A, B et C. Sur les cartes de l'annexe 2, seulement la texture de surface est représentée. Le conseiller devra alors consulter les rapports pédologiques pour avoir un aperçu du contenu en argile de l'ensemble du profil (0-120 cm) de sol de chaque série et type de sol de la carte.

Travaux en cours

Charlotte Sullivan, étudiante à la maîtrise du Nova Scotia Agricultural College, effectue présentement des recherches sur l'impact du stockage des fumiers en amas au champ sur le ruissellement de surface et le drainage souterrain sur une période de 12 mois. Cependant, à ce jour, les résultats de ses travaux n'ont pas encore fait l'objet d'une publication.

L'Ordre des agronomes présentera à ses membres une ligne directrice concernant le choix de l'emplacement des amas au champ en lien avec les fentes de retrait.

Bibliographie

Baize, D. et Jabiol, B., 1995. Guide pour la description des sols. INRA Éditions, France, 376 p.

Beven, D. E. and Germann, P., 1982. Macropores and Water Flow in Soils. Water Resources Research, 18 : 1311–1325.

Blake, G., Schlichting, E. and Zimmermann, U., 1973. Water Recharge in a Soil With Shrinkage Cracks. Soil Science Society of America Proceedings, volume 37, n° 5, p. 669–672.

Bowman, B. T. and Reynolds, W. D., 2006. FAQ – L’écoulement de l’eau dans les sols. Agriculture et Agroalimentaire Canada, http://res2.agr.ca/london/faq/leau-water_f.html .

Côté, D., 2005. Guide de conception des amas de fumier au champ. IRDA, Québec, 71 pages.

Dexter, A. R., 1988. Advances in Characterization of Soil Structure. Soil & Tillage Research, 11, p. 199–238.

Electorowicz, M., 1992. Mesure de l’incidence des amas de fumier sur les eaux souterraines, de surface. Rapport interne no 3331,05,10. PAAGF au ministère de l’Environnement du Québec.

FAO, 2002. World Reference Base for Soil Resources. <http://www.fao.org/ag/agL/agll/wrb/keyfr.stm> .

Gupta, R. K., Rudra, R. P., Dickinson, W. T. and Wall, G. J., 1997. Surface Water Quality Impacts of Tillage Practices Under Liquid Swine Manure Application. Journal of the American Water Resources Association, vol. 33, n°. 3, p 681–687.

Konrad, J.-M. et Ayad, R., 1997. Desiccation of a Sensitive Clay : Field Experimental Observations. Canadian Geotechnical Journal, n°34, p. 929-942.

Lamontagne, L. et Cossette, J-M., 1994. Guide de terrain pour l'excursion sur les sols vertiques dans l'est du Canada (Section Québec). Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, 40 pages.

Mantovi, P., Fumagalli, L., Beretta, G. P. and Guermandi, M., 2006. Nitrate Leaching Through the Unsaturated Zone Following Pig Slurry Applications. *Journal of Hydrology*, n°316, p. 195-212.

Messing, I. and Jarvis, N. J., 1990. Seasonal Variation in Field-Saturated Hydraulic Conductivity in Two Swelling Clay Soils in Sweden. *Journal of Soil Science*, vol. 41, p. 229-237.

Nemati, M. R., Banton, O., Caron, J. and Delaporte, L., 2003. Contamination by Slaked Fragments with Sorbed Compounds in a Structured Soil. *Soil Science Society of America Journal*, n°67, p. 694-702.

Novák, V., Šimůnek, J. and van Genuchten, M. Th., 2000. Infiltration of Water Into Soil With Cracks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 126, n°1, p. 41-47.

Perret, J., Prasher, S.O., Kantzias, A. and Langford, C., 1999. Three-Dimensional Quantification of Macropore Networks in Undisturbed Soil Cores *Soil Science Society of America Journal*, n°3, p. 1530-1543.

Reid, I. & Parkinson, R. J., 1984. The Wetting and Drying of a Grazed and Ungrazed Clay Soil. *European Journal of Soil Science* 35 (4), p. 607-614.

Service national d'information sur les terres et les eaux (SISCan). Glossaire. http://res.agr.ca/siscan/glossary/montmorillonite_group.html.

Taboada, M.A., 2003. Soil Shrinkage Characteristics in Swelling Soils. Lecture given at the College on Soil Physics Trieste, 3–21 March 2003.

Wells, R. R., DiCarlo, D. A., Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y., Römkens, M. J. M. et Prasad, S.N., 2003. Infiltration and Surface Geometry Features of a Swelling Soil following Successive Simulated Rainstorms. Soil Science Society of America Journal, n° 67, p. 1344–1351.

Annexe 1 Horizons¹⁵

Les horizons organiques contiennent 17 % ou plus de carbone organique. Ces horizons ont été classés à partir de mousses, de roseaux et de débris ligneux.

O

Horizon organique formé surtout à partir de mousses, de roseaux et de débris ligneux.

Of

Couche organique la moins décomposée, contenant de grandes quantités de fibres végétales non décomposées : couche fibrique.

Om

Couche organique moyennement décomposée, contenant moins de fibres végétales que la couche Of : couche mésique.

Oh

Couche organique la plus décomposée, ne contenant que de faibles quantités de fibres brutes : couche humique.

L-F-H

Horizons organiques formés surtout à partir de feuilles, de brindilles et de débris ligneux avec une moindre quantité de mousses.

L

Les formes originelles de la matière organique sont facilement reconnaissables.

F

La matière organique accumulée est partiellement décomposée.

H

Les formes originelles de la matière organique ne sont plus perceptibles.

¹⁵ Agriculture et Agroalimentaire Canada, http://res.agr.ca/siscan/glossary/horizon_soil.html, 2006.

Les horizons minéraux contiennent moins de 17 % de carbone organique.

A

Horizon minéral formé à la surface ou près de la surface, dans la zone de perte des matériaux en solution ou en suspension, ou d'accumulation *in situ* maximale de carbone organique, ou horizon possédant ces deux caractères.

B

Horizon minéral possédant un ou plusieurs des caractères suivants:

1. Accumulation d'argile silicatée, de fer, d'aluminium ou d'humus.
2. Structure prismatique ou colonnaire présentant des enrobements ou des taches très marqués, de même que des quantités notables de sodium échangeable.
3. Altération, par hydrolyse, réduction ou oxydation, qui établit une différence de couleur ou de structure par rapport à l'horizon supérieur ou l'horizon inférieur, ou les deux.

C

Horizon minéral relativement peu touché par le processus pédogénétique en cours dans les horizons A et B, sauf qu'il peut y avoir gleyification et accumulation de carbonates et de sels plus solubles.

R

Roc sous-jacent consolidé, trop dur pour être brisé à la main ou creusé à la pelle à l'état humide.

Un chiffre romain placé devant le nom de l'horizon indique une discontinuité lithologique dans les matériaux non consolidés du profil. Le chiffre I, généralement non indiqué mais sous-entendu, désigne la couche supérieure. Les autres couches contrastantes sont numérotées consécutivement dans l'ordre descendant dans lequel elles apparaissent, c'est-à-dire II, III, etc.

Suffixes minuscules

b

Horizon enfoui.

c

Horizon pédogénétique cimenté (irréversiblement). Les horizons ortstein, placiques et duriques en sont des exemples.

ca

Horizon d'accumulation secondaire de carbonates, dans lequel la concentration en chaux excède celle du matériau originel non enrichi.

e

Horizon caractérisé par la perte de l'argile, du fer, de l'aluminium et de la matière organique, isolément ou en association, et par un indice de luminosité d'une ou de plusieurs unités plus élevées, à l'état sec, que l'horizon B sous-jacent. S'applique à l'horizon A (Ae).

f

Horizon enrichi en matériaux amorphes constitués principalement de Fe et d'Al combinés aux matières organiques. Les caractéristiques des horizons f, à l'exception de l'horizon Bgf, sont : une teneur en Fe et Al extractibles au pyrophosphate d'au moins 0,6 % dans les matériaux plus fins que la sable et d'au moins 0,4 % dans le sable, un rapport de Fe et Al extractibles au pyrophosphate à l'argile (moins de 2 μm) supérieur à 0,5 %; une teneur en carbone organique supérieure à 0,5%. On différencie ces horizons suivant leur teneur en carbone organique: Bf contient de 0,5 % à 5 % de carbone organique; Bhf contient plus de 5 % de carbone organique.

g

Horizon caractérisé par une coloration grise, ou des marbrures prononcées indiquant le fait d'une réduction intense, permanente ou périodique, ou un horizon présentant ces deux caractères à la fois; par exemple, Aeg, Btg, Bg et Cg.

gf

(employé avec B) -- La teneur en Fe extractible à la dithionite de cet horizon excède d'au moins 1 % celle de l'horizon IC, et la teneur en Al extractible à la dithionite n'excède celle de l'horizon IC que de 0,5 % au plus.

h

Horizon enrichi de matières organiques.

Ah

Horizon A d'accumulation de matières organiques. Il contient moins de 17 % de carbone organique. L'indice de luminosité, du code Munsell, est d'une unité plus foncé que celui de la couche sous-jacente, ou la teneur en carbone organique est d'au moins 0,5 % plus élevée que celle de l'horizon IC, ou l'horizon présente ces deux caractères à la fois.

Ahe

Horizon dégradé reconnaissable aux traînées et aux taches de matériaux gris clair et gris foncé, et présentant souvent une structure lamellaire.

Bh

Horizon contenant plus de 1 % de carbone organique et moins de 0,3 % de Fe extractible au pyrophosphate : le rapport de carbone organique de Fe extractible au pyrophosphate est d'au moins 20.

j

Suffixe modifiant les suffixes e, g, n et t, et indiquant que les caractères définis par ces suffixes, quoique présents, ne satisfont pas aux limites établies; par exemple, Aej indique un horizon éluvial qui est cependant mince, discontinu ou à peine visible.

- k**
Indique la présence de carbonates.
- m**
Horizon légèrement altéré par hydrolyse, oxydation ou solution, ou par une combinaison de ces trois phénomènes, produisant un changement de couleur ou de structure, ou les deux à la fois.
- n**
Horizon dont le rapport Ca échangeable/Na échangeable est d'au plus 10.
- p**
Couche anthropique; par exemple, Ap.
- s**
Horizon contenant des sels solubles en quantités décelables.
- sa**
Horizon d'enrichissement secondaire de sels plus solubles que les carbonates de Ca et de Mg, et dans lequel la teneur en sels excède celle du matériau originel non enrichi.
- t**
Horizon enrichi d'argile silicatée, caractérisé par une teneur en argile plus élevée (teneurs spécifiées) que celle de l'horizon éluvial sus-jacent, une épaisseur d'au moins 5 cm, de l'argile orientée, soit dans certains pores ou à la surface des pedes, ou des deux à la fois, et généralement par un rapport de la fraction fine (moins de 0,2 μm) à l'argile totale plus élevé que celui de l'horizon IC.
- x**
Horizon présentant les caractères du fragipan.
- y**
Horizon modifié par la cryoturbation.
- z**
Horizon gelé d'une année à l'autre.

Annexe 2

Cartes des teneurs en argile contenues dans les sols

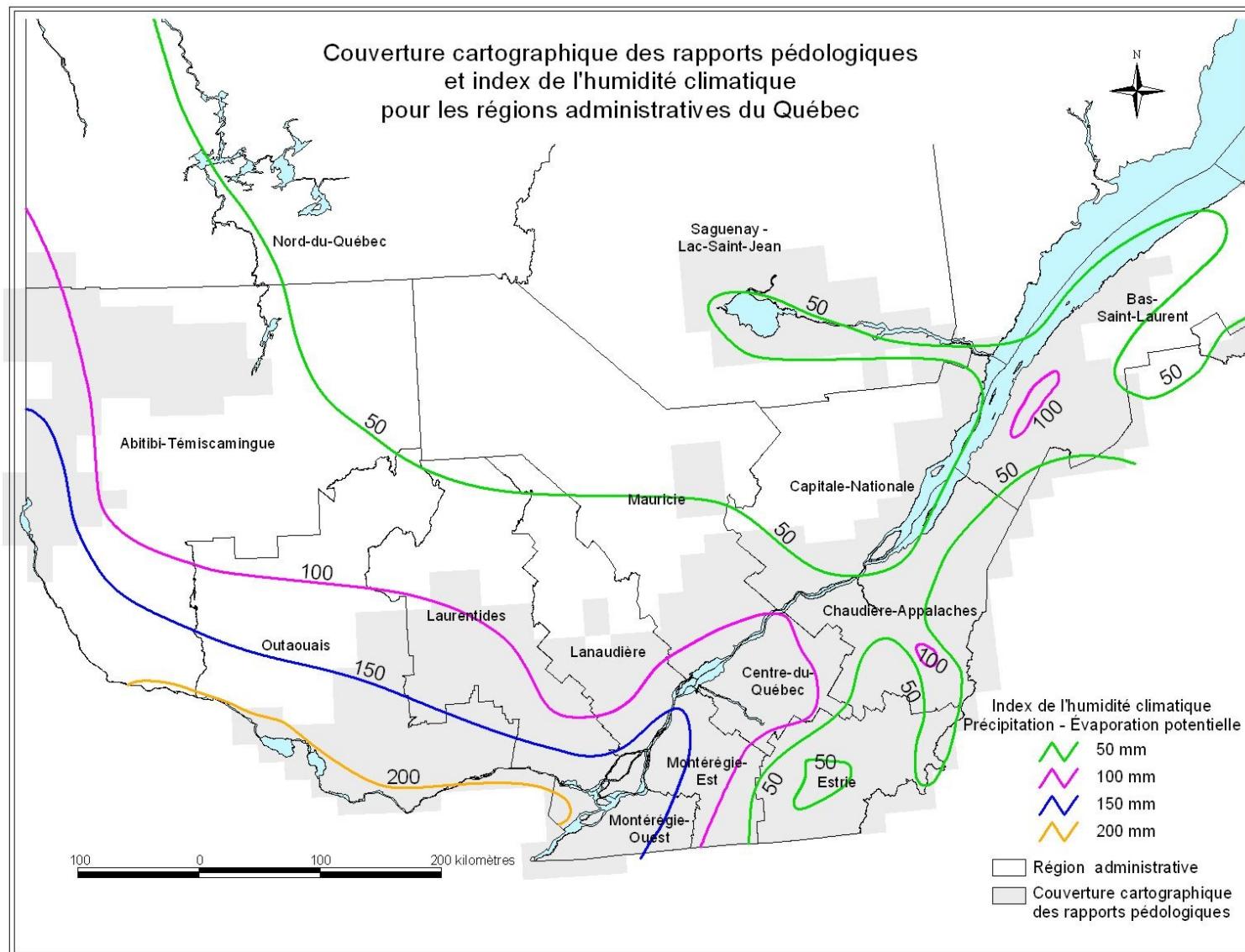
Superficies des sols argileux pour les régions administratives du Québec										
Région administrative	Teneur en argile des sols		Teneur en argile des sols		Teneur en argile des sols		Teneur en argile des sols supérieure à 1%		Total	
	1% à 18%		19% à 34%		plus de 35%		Total			
	Tous les sols	Sols cultivés	Tous les sols	Sols cultivés	Tous les sols	Sols cultivés	Tous les sols	Sols cultivés		
Bas-Saint-Laurent	1	31572	26601	26811	17330	23039	22791	81422	66721	
Saguenay - Lac-Saint-Jean	2	143922	31202	61382	49948	44819	39680	250123	120830	
Capitale nationale	3	83827	31287	24083	19400	10613	9930	118523	60616	
Mauricie	4	134560	55562	18700	16114	33332	30641	186592	102317	
Estrie	5	571675	163423	24697	8761	0	0	596372	172183	
Montréal	6	2609	435	13651	315	5280	33	21540	783	
Outaouais	7	167380	59706	16450	12040	26990	20444	210820	92190	
Abitibi - Témiscamingue	8	8197	7651	10312	10191	77465	75706	95974	93548	
Côte Nord	9	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Nord du Québec	10	0	0	0	0	2369	2057	2369	2057	
Gaspésie - Îles-de-la-Madeleine	11	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Chaudière - Appalaches	12	379847	155417	124372	68506	34034	33159	538253	257082	
Laval	13	4243	714	7698	1996	3132	1851	15073	4561	
Lanaudière	14	110313	61342	8342	6794	64206	61910	182861	130046	
Laurentides	15	124345	33334	6498	4423	40587	35351	171430	73108	
Montérégie - Est	16	205257	139172	94744	60428	87373	85996	387374	285596	
Centre-du-Québec	17	367419	192713	56518	36625	15595	15431	439532	244769	
Montérégie - Ouest	18	105901	77171	52557	45441	115230	106792	273688	229404	
Total provincial										
Total régional		2441067	1035729	546815	358311	584064	541773	3571946	1935813	
		ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	

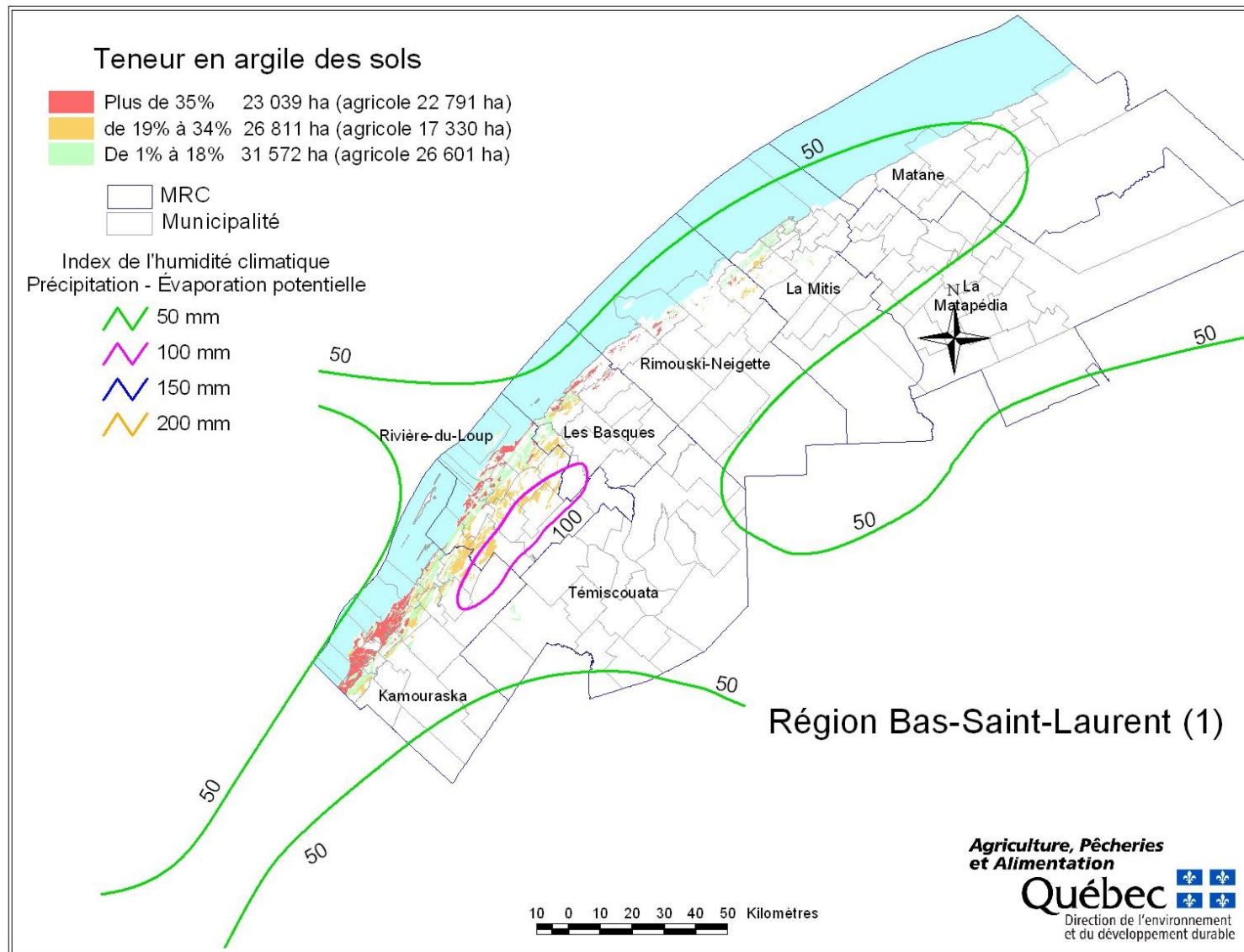
Le taux en argile est issu des études pédologiques du Québec et représente la texture de surface.

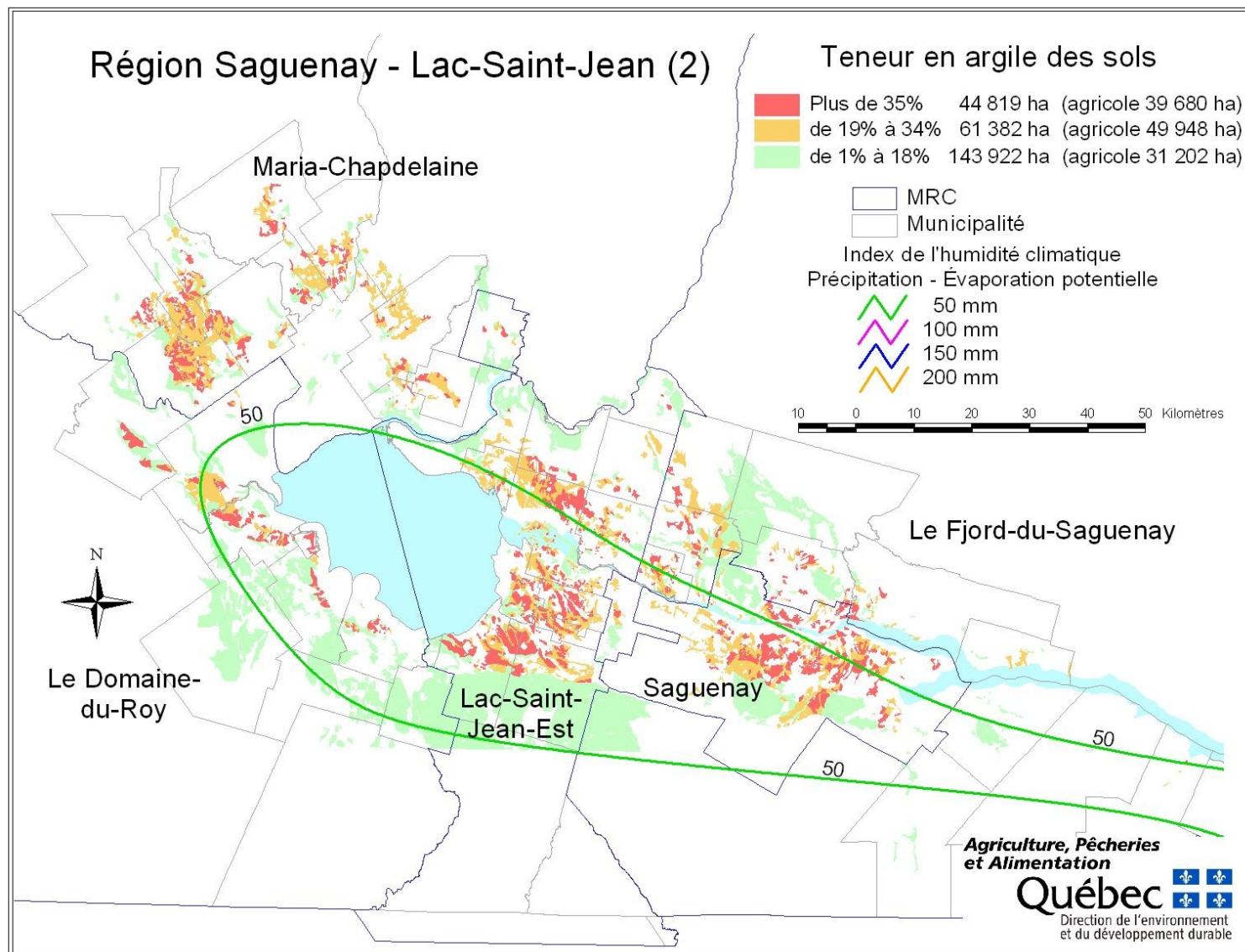
Les régions de la Gaspésie - îles-de-la-Madeleine et de la Côte Nord n'ont pas d'étude pour leur territoire.

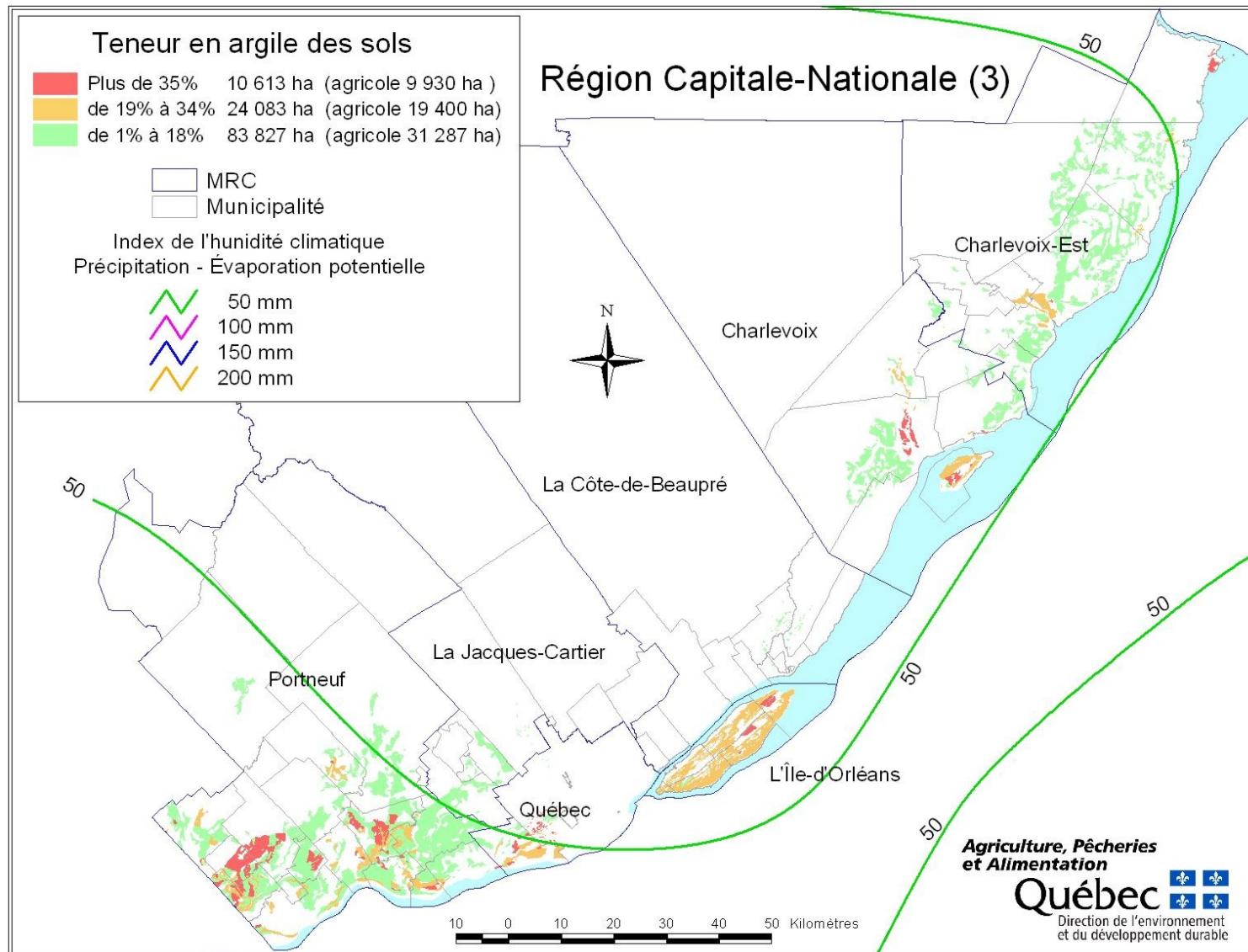
Les superficies du territoire agricole proviennent de la carte de l'utilisation du sol produite à partir d'images du satellite LANDSAT-ETM acquises entre 1996 et 2002.

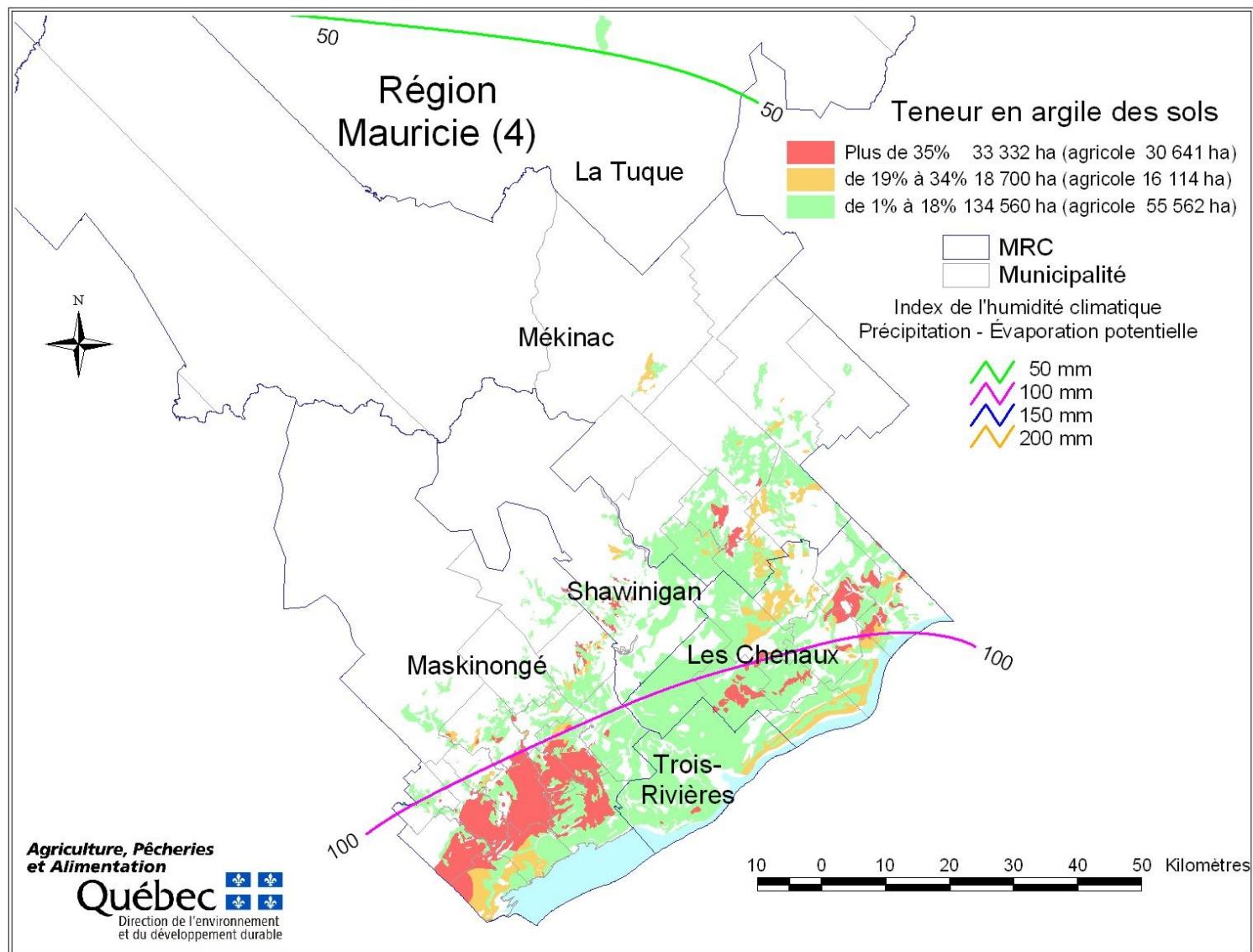
L'utilisation du sol a tendance à surévaluer les superficies agricoles en raison de la faible résolution de l'image satellite (pixels à 30 m de côté)

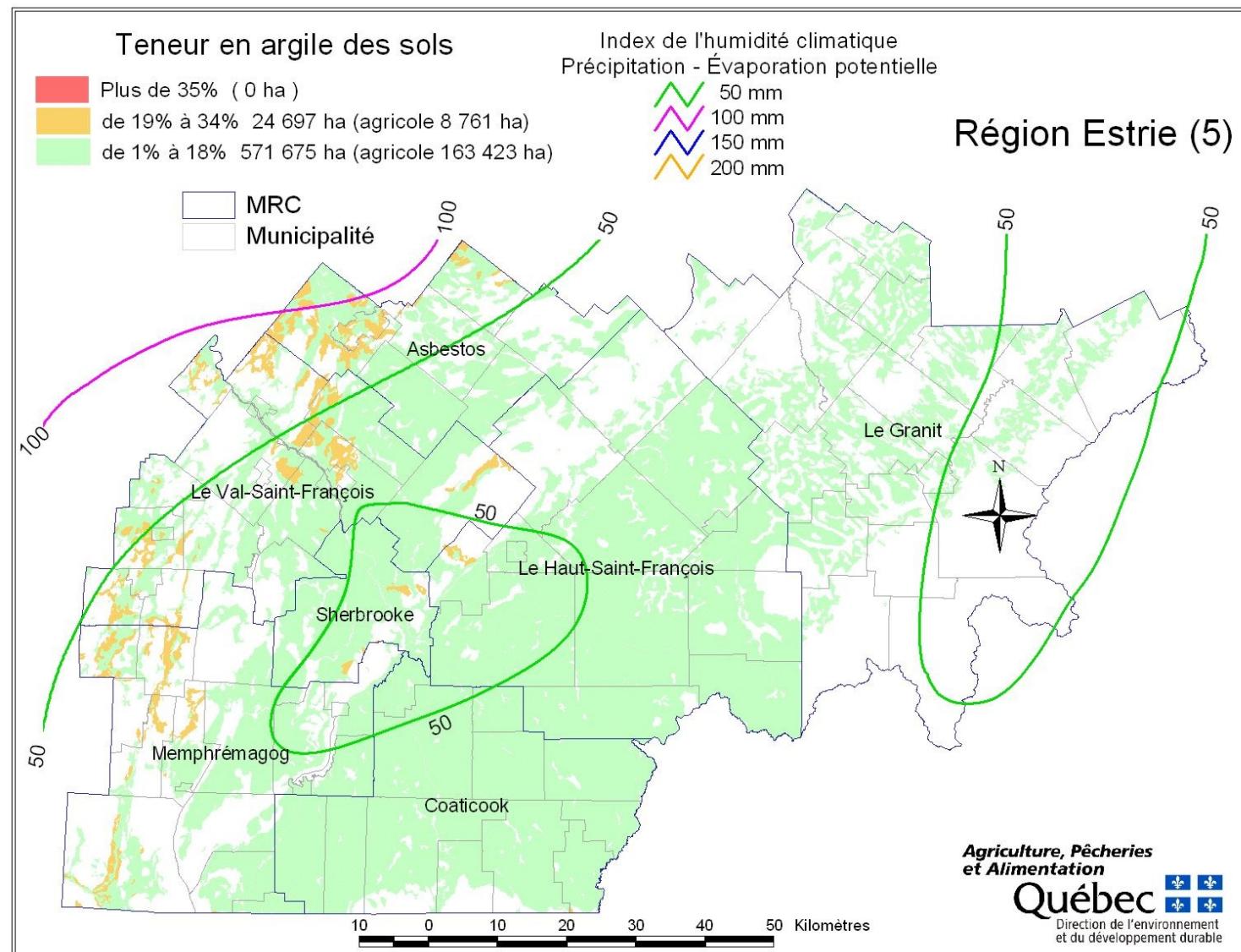


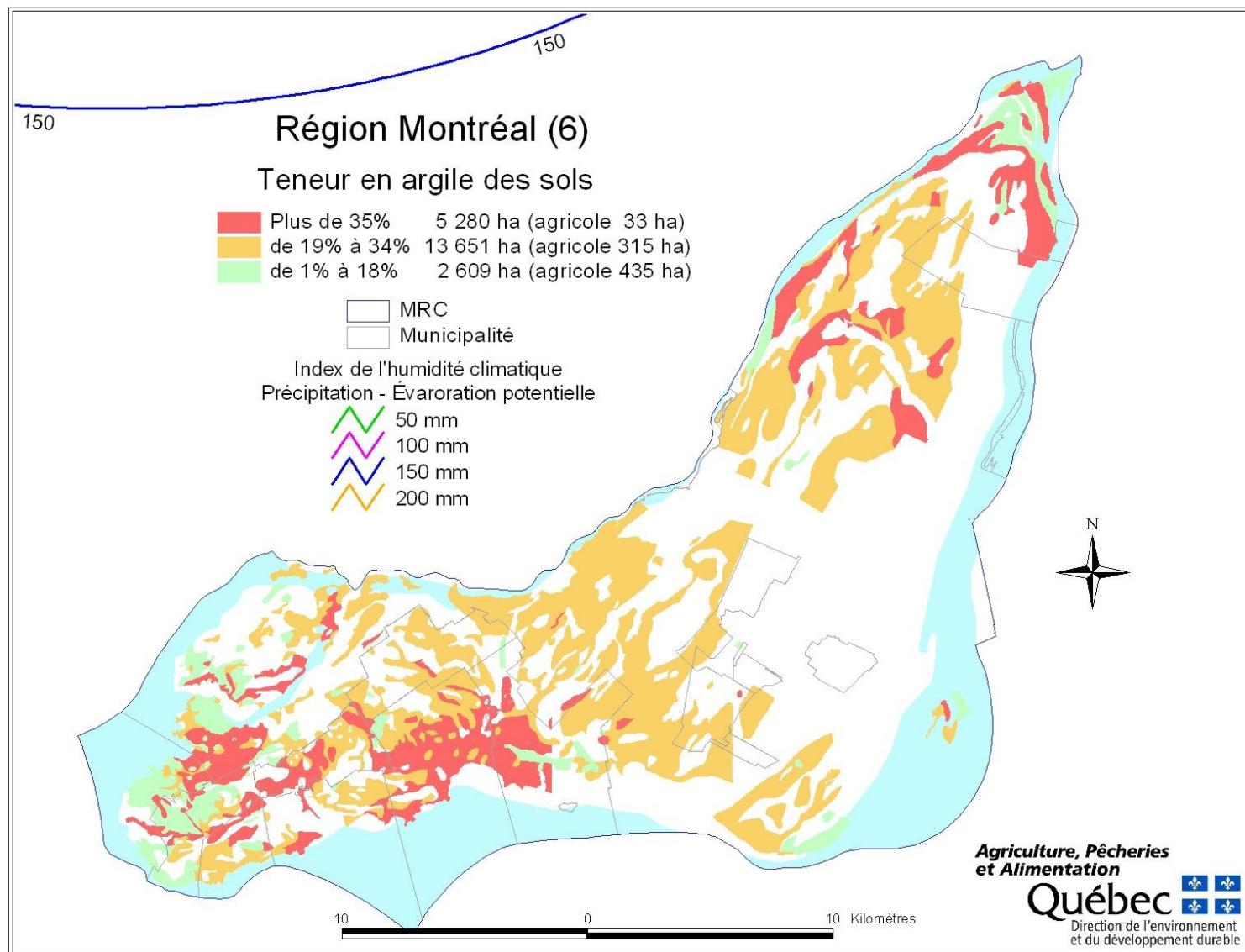


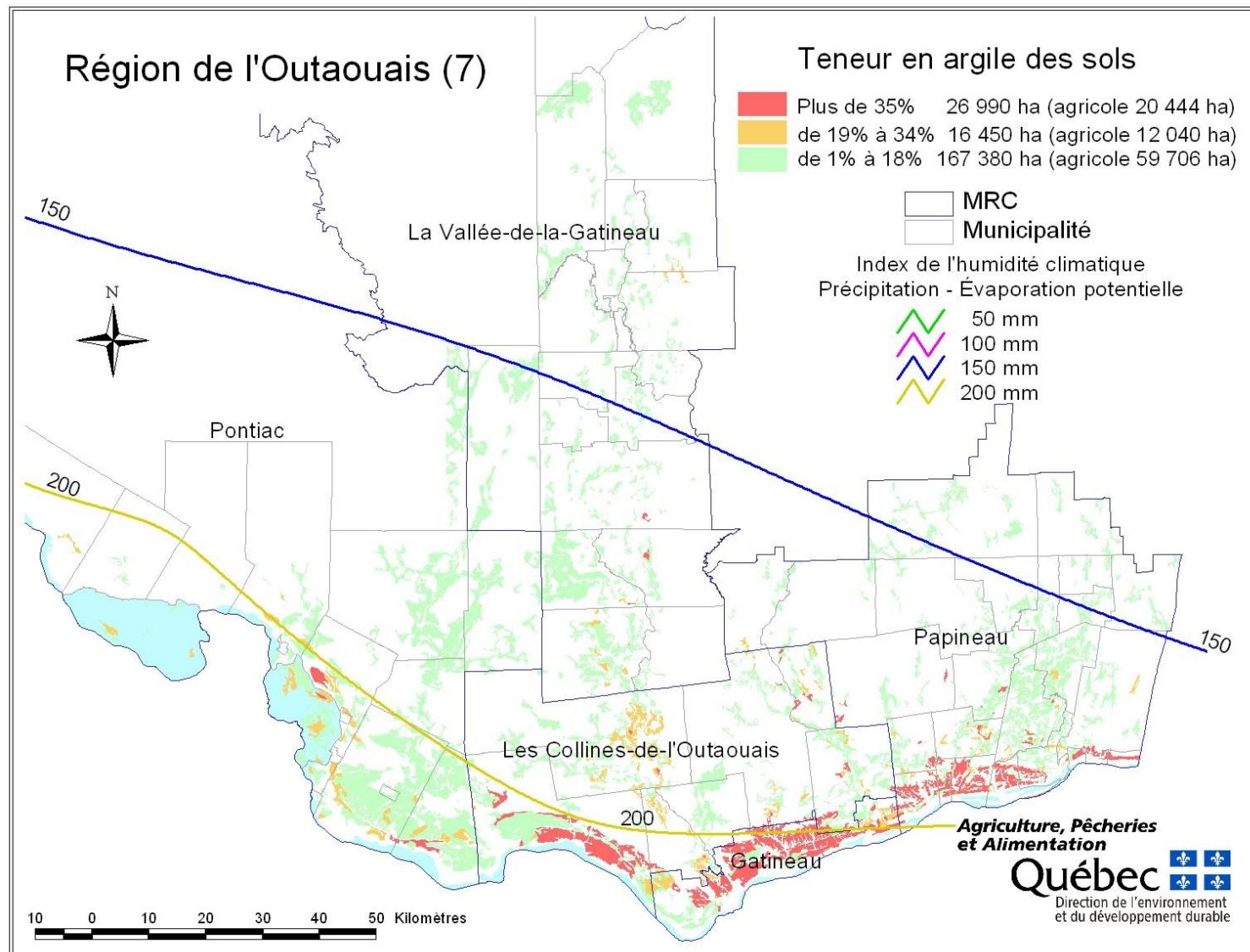


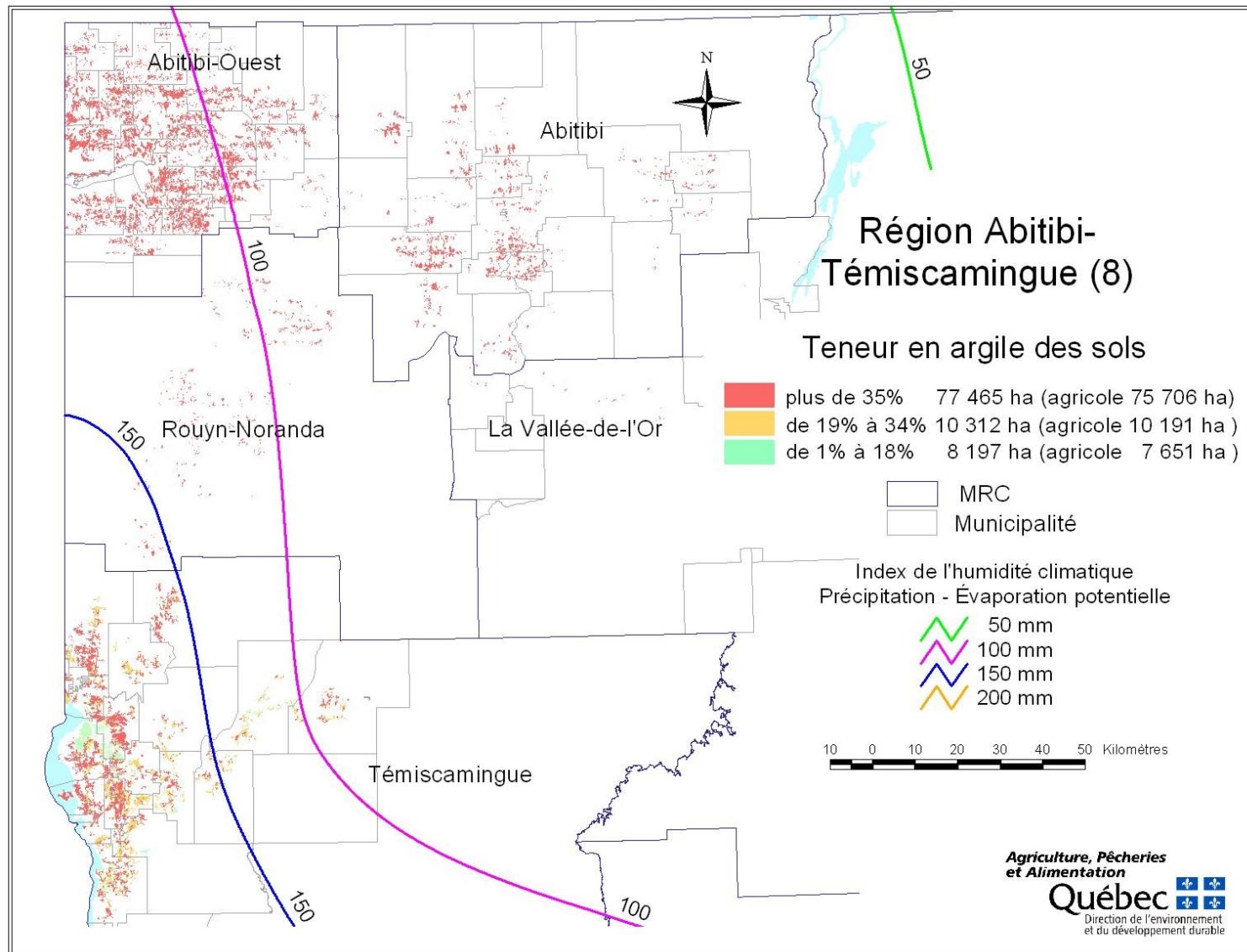












Région Nord-du-Québec (10)

Teneur en argile des sols

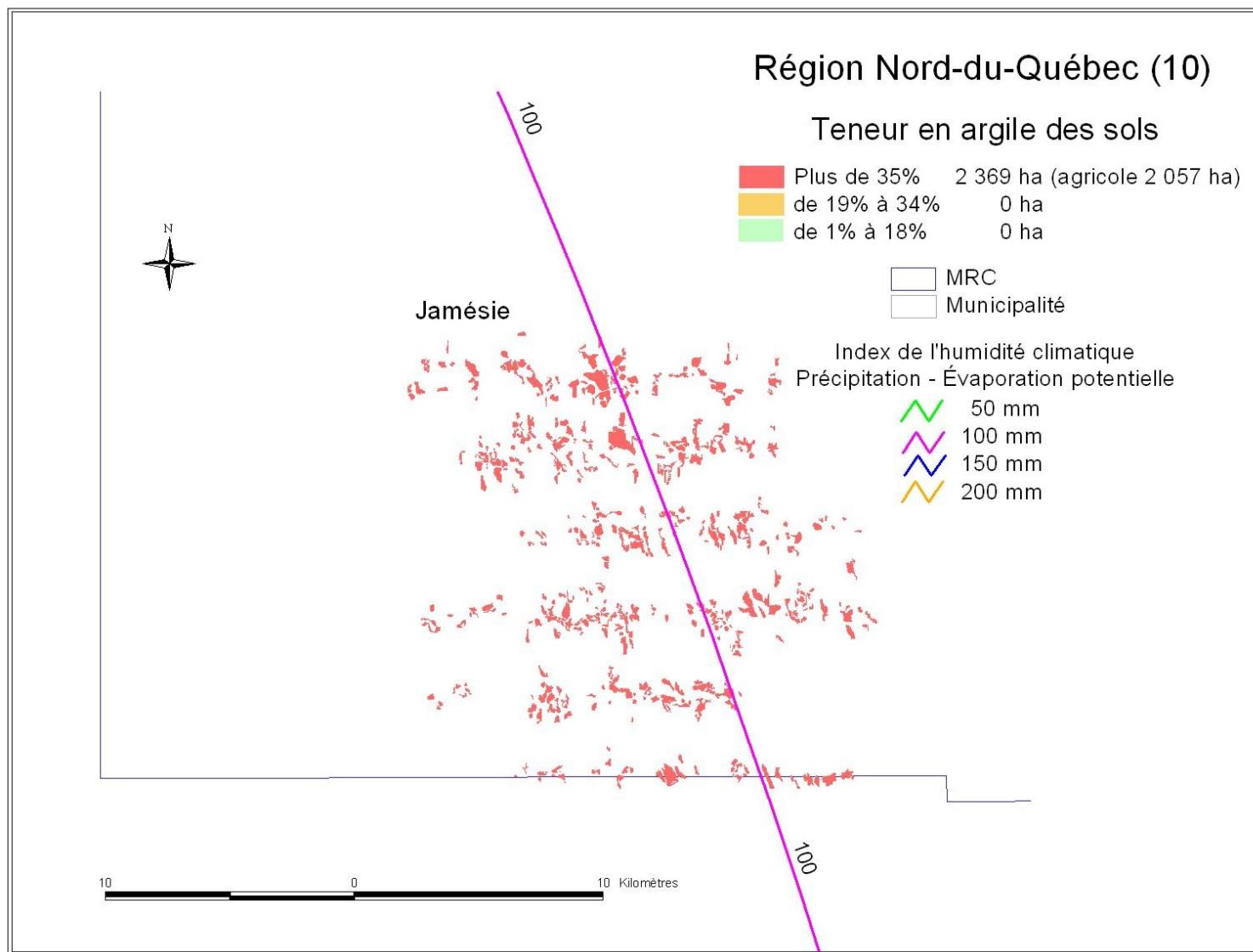
Plus de 35%	2 369 ha (agricole 2 057 ha)
de 19% à 34%	0 ha
de 1% à 18%	0 ha

MRC

Municipalité

Index de l'humidité climatique Précipitation - Évaporation potentielle

50 mm
100 mm
150 mm
200 mm



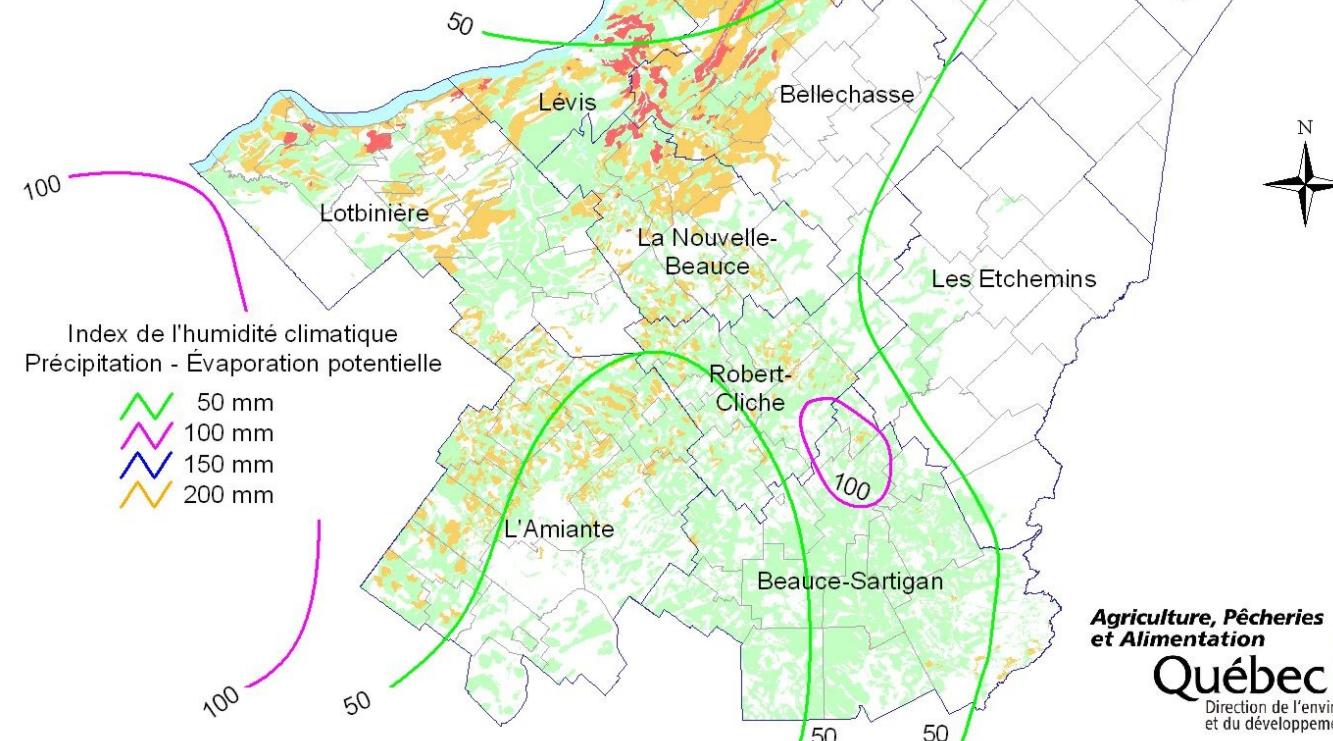
Région Chaudière-Appalaches (12)

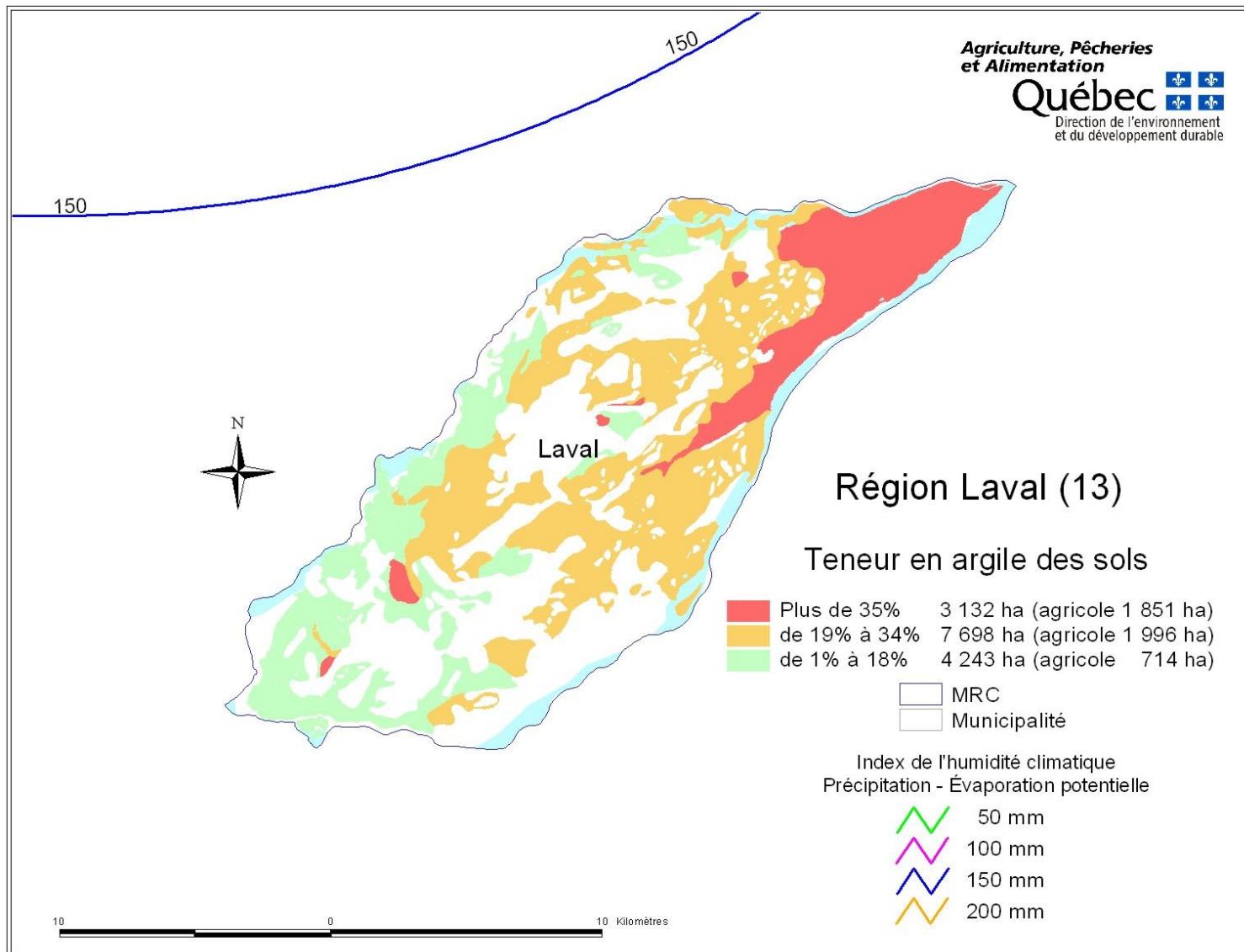
Teneur en argile des sols

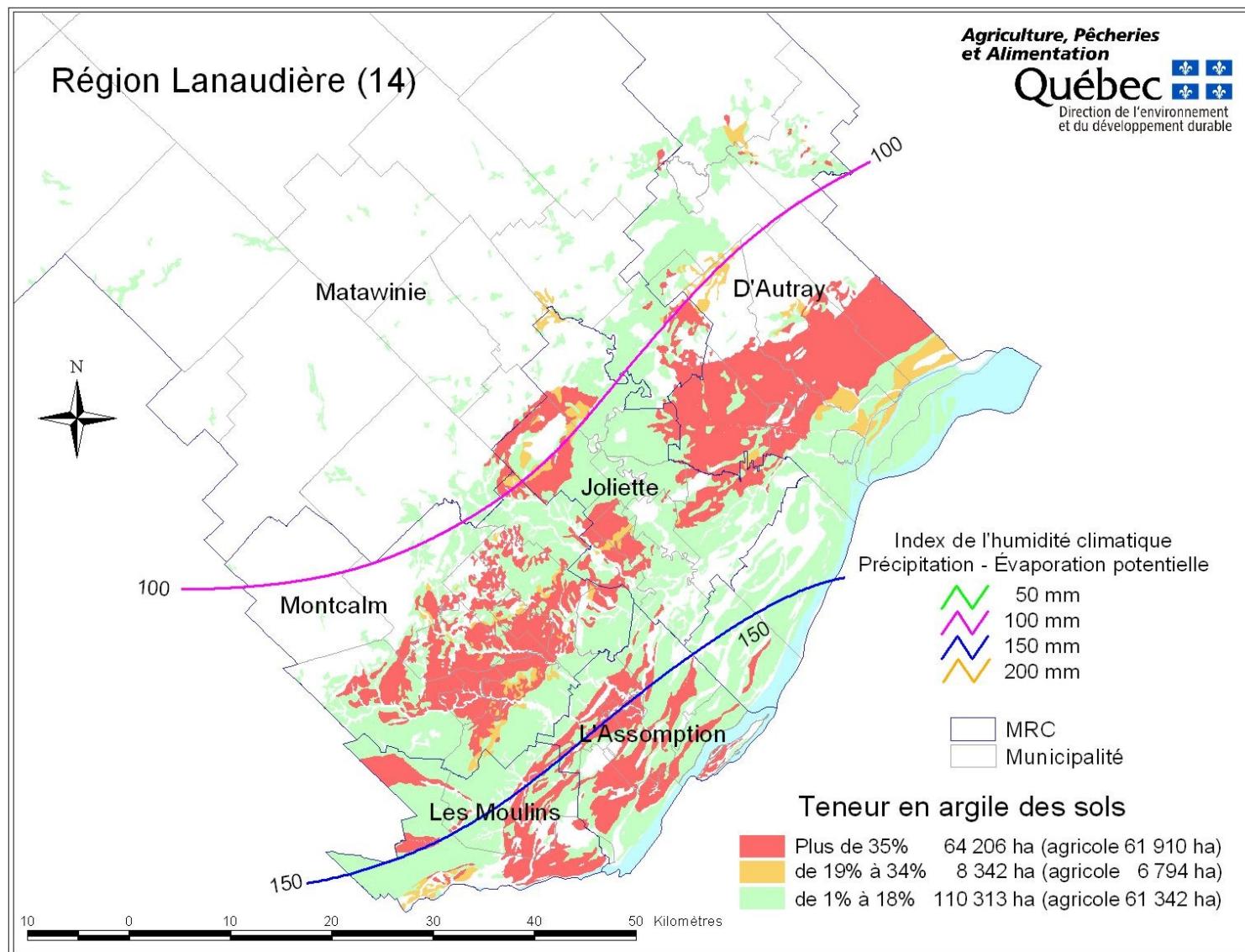
- Plus de 35% 34 034 ha (agricole 33 159 ha)
- de 19% à 34% 124 372 ha (agricole 68 506 ha)
- de 1% à 18% 379 847 ha (agricole 155 417 ha)

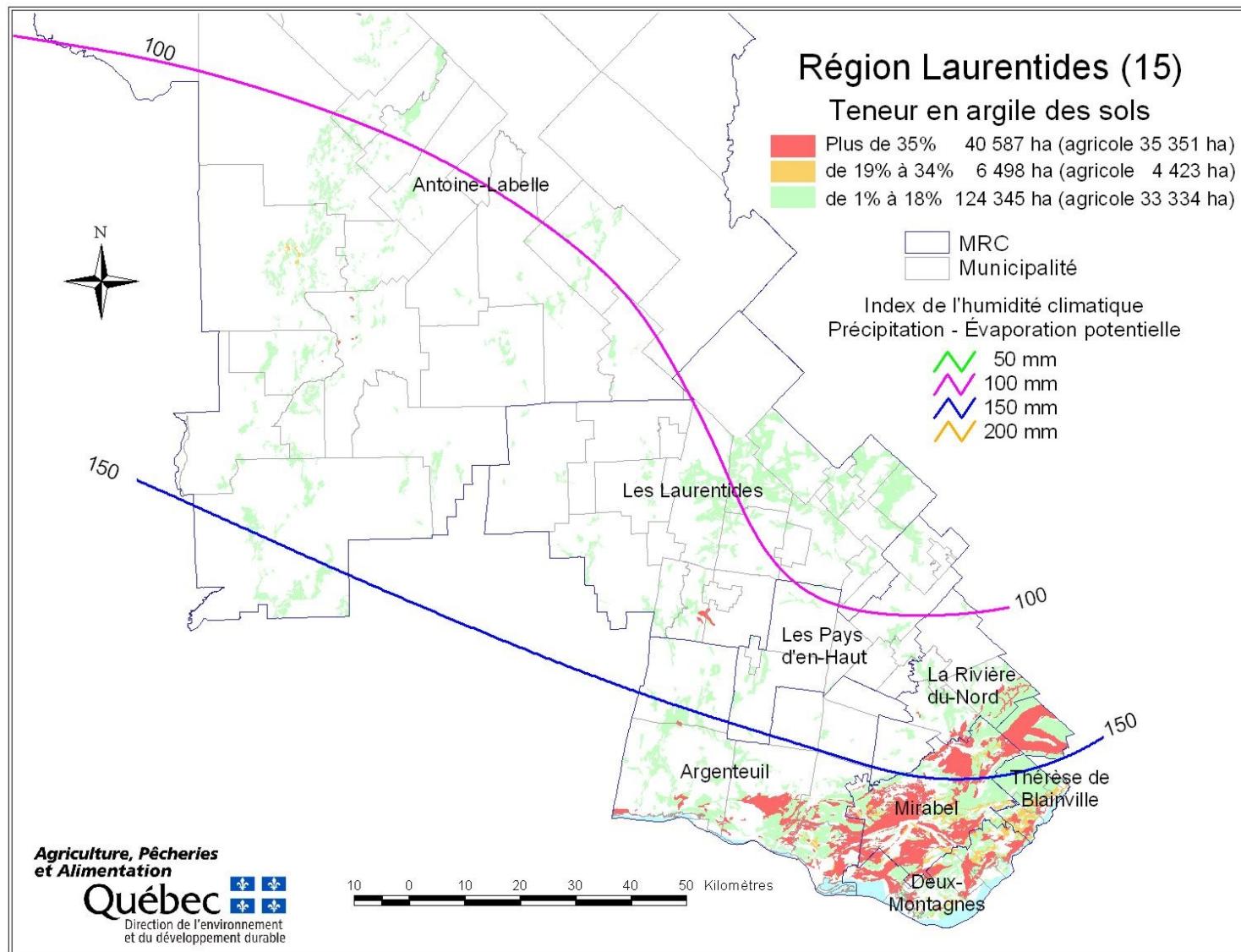
 MRC
 Municipalité

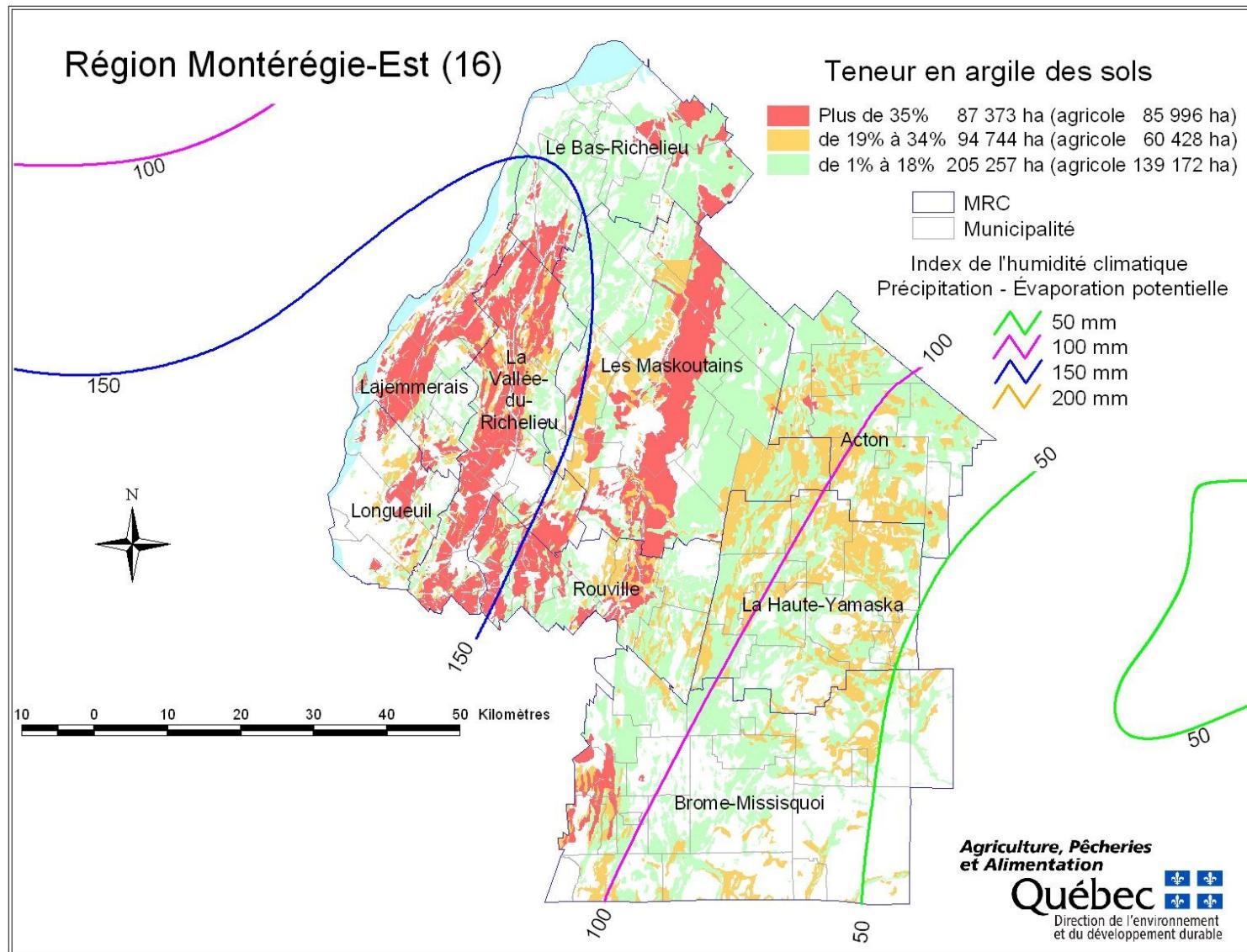
10 0 10 20 30 40 50 Kilomètres

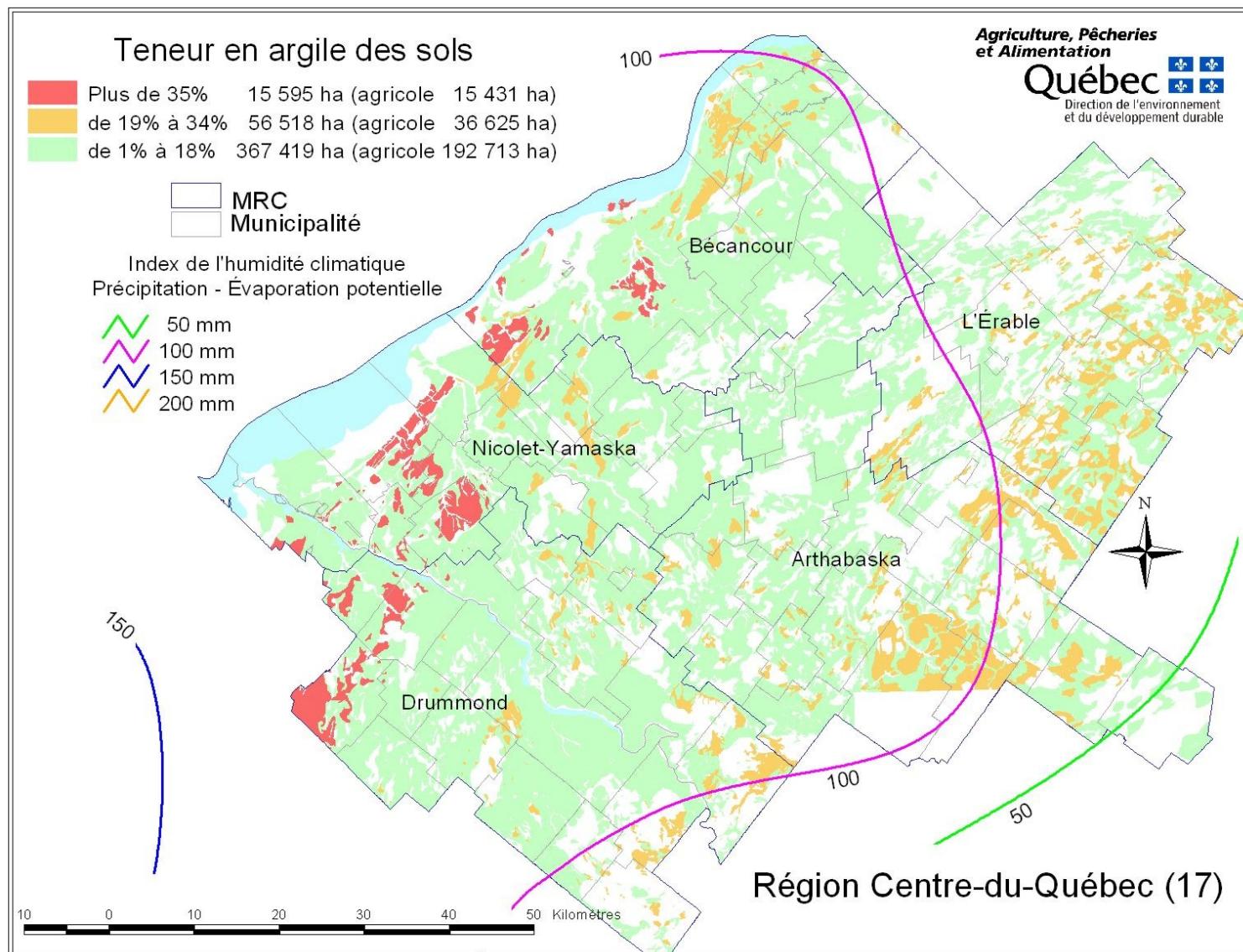








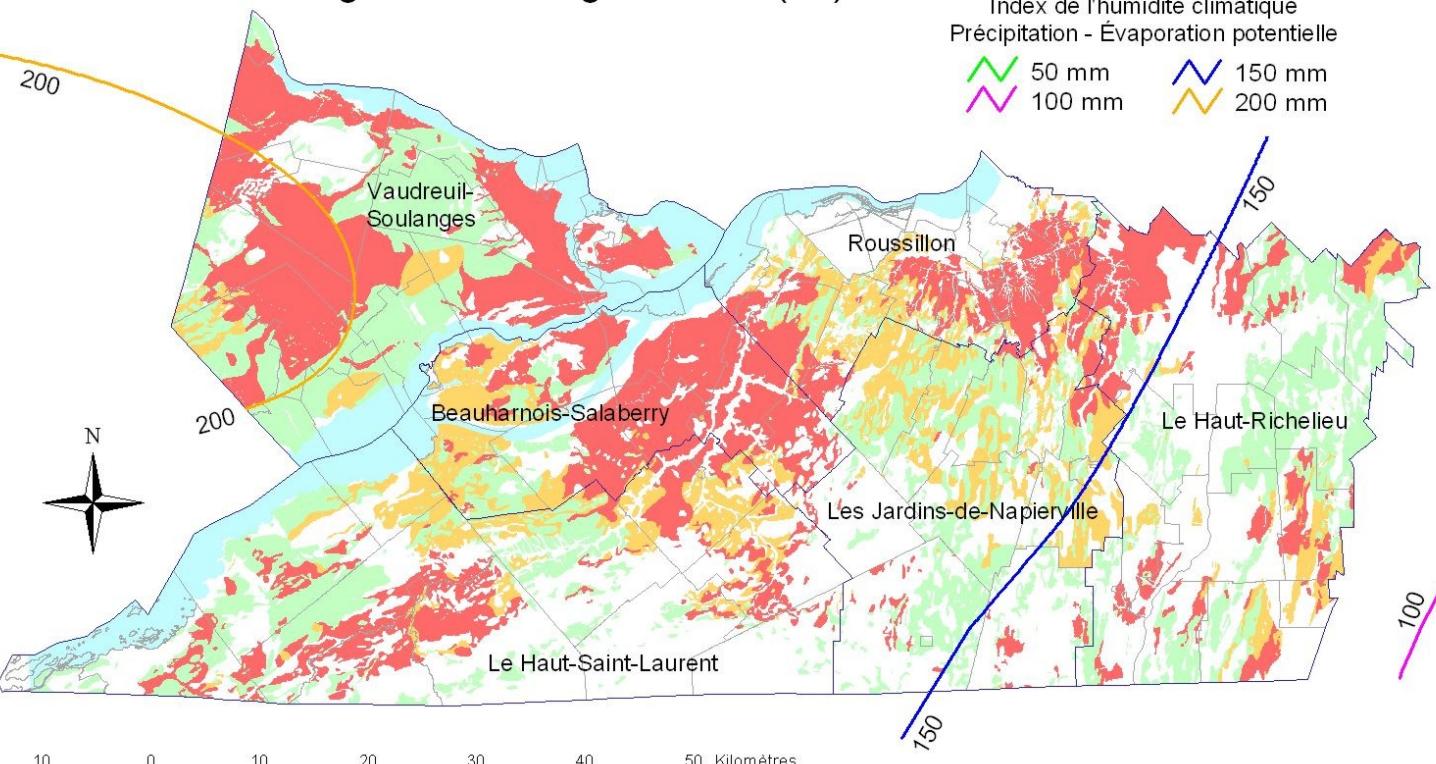






150

Région Montérégie-Ouest (18)



Québec 