RAPPORT FINAL

Identification des secteurs propices à la récupération de la biomasse résiduelle dans la MRC du Haut-St-François

Présenté à

CLD du Haut-Saint-François
M. Robert Myre

Par

CERFO
Mme Emmanuelle Boulfroy, M.Sc.
M. Guy Lessard, ing.f., M.Sc.

Et

Centre de foresterie des Laurentides
Ressources Naturelles Canada
Mme Évelyne Thiffault, ing.f., Ph.D.

Avril 2009

© CERFO 2009-05

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX ..... **III**

LISTE DES FIGURES ..... **III**

REMERCIEMENTS ..... **IV**

INTRODUCTION ..... **V**

1. SOURCES D'INFORMATION UTILISÉES POUR L'ANALYSE **1**
1.1. Carte écoforestière du 3e inventaire forestier décennal 1
1.2. Carte des séries de sols 1
1.3. Données d'inventaire terrain 3

2. DESCRIPTION DU TERRITOIRE D'ÉTUDE **5**
2.1. Localisation par rapport au cadre écologique de référence du MRNF 5
2.2. Lithologie 6
2.3. Ordres de sols 7
2.4. pH 9
2.5. Saturation en bases 11

3. DIFFÉRENTES APPROCHES POUR DÉTERMINER LE NIVEAU DE SENSIBILITÉ D'UN SITE À LA RÉCOLTE DE BIOMASSE **13**
3.1. Approche basée sur la fertilité du site 13
3.1.1. Présentation des paramètres retenus dans la littérature pour déterminer la sensibilité d'un site 13
3.1.2. Proposition de critères basés sur les propriétés physiques du sol pour déterminer la sensibilité relative d'un site à la récolte de la biomasse 14
3.1.3. Comparaison de la carte de sensibilité produite selon les critères retenus à la section 3.1.2., avec la carte de sensibilité produite selon les critères établis par Raulund-Rasmussen *et al.* (2008) en Scandinavie 19
3.2. Approche basée sur les charges critiques 21
3.2.1. Brève description du modèle 21
3.2.2. Portrait des dépôts atmosphériques générateurs d'hydrogène à l'échelle de la MRC 21
3.2.3. Portrait du taux d'altération annuel du sol en K + Ca + Mg + Na à l'échelle de la MRC 22
3.2.4. Portrait du dépassement de la charge critique en acidité à court terme en fonction du mode de récolte 24
3.2.5. Essai de détermination des stations étant reconnues systématiquement sensibles selon l'approche des charges critiques 29
3.3. Approche combinée proposée 30

RECOMMANDATIONS **33**

CONCLUSION **35**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **36**

ANNEXES **38**

ANNEXE 1. Critères évaluant la sensibilité d'un site à la récolte de la biomasse selon différents pays/provinces/états **39**

ANNEXE 2. Clés pour déterminer le drainage et la texture du sol sur le terrain **43**

ANNEXE 3. Essai de détermination des stations reconnues systématiquement sensibles selon l'approche basée sur les charges critiques **51**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Pourcentage de tesselles qui appartiennent à chaque clase de sensibilité pour les différentes stations présentes – cas de la récolte par tronc seulement..... 30

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des études pédologiques couvrant le territoire de la MRC du Haut-St-François 2
Figure 2. Localisation des placettes d'inventaire sur le territoire de la MRC du Haut-St-François 4
Figure 3. Cadre écologique de référence du MRNF pour le territoire de la MRC du Haut-St-François 5
Figure 4. Lithologie de la MRC du Haut-St-François 6
Figure 5. Ordres de sol présents sur le territoire de la MRC du Haut-St-François..... 8
Figure 6. pH de l'horizon B (40-60 cm de profondeur) sur le territoire de la MRC du Haut-St-François 10
Figure 7. Carte de saturation en bases de l'horizon B (40-60 cm de profondeur)..... 12
Figure 8. Carte générale de sensibilité relative à la récolte de la biomasse selon les critères de fertilité du sol retenus 16
Figure 9. Carte détaillée de sensibilité relative à la récolte de la biomasse selon les critères de fertilité du sol retenus 18
Figure 10. Carte de sensibilité relative à la récolte de la biomasse selon les critères de Raulund-Rasmussen *et al.* (2008) 20
Figure 11. Taux d'altération annuel du sol en K + Ca + Mg + Na 23
Figure 12. Sensibilité du site dans le cas du mode de récolte par arbre entier..... 26
Figure 13. Sensibilité du site dans le cas du mode de récolte par tronc seulement..... 27
Figure 14. Mode de récolte recommandé en fonction de la sensibilité du site 28
Figure 15. Carte combinée de sensibilité relative à la récolte de la biomasse 32

REMERCIEMENTS

Nous désirons tout d'abord remercier chaleureusement M. Robert Myre pour la confiance qu'il nous a accordée en proposant au CERFO de réaliser ce projet.

Nos remerciement s'adressent aussi au CLD du Haut-St-François qui a cru en ce projet et lui a accordé un financement via le Programme de mise en valeur des ressources en milieu forestier – Volet II du MRNF.

Enfin, nous remercions également M. Rock Ouimet de la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, pour sa disponibilité et ses conseils concernant l'interprétation des résultats provenant du modèle sur les charges critiques.

INTRODUCTION

La MRC du Haut-St-François cherche à valoriser, chez les petits propriétaires forestiers, les résidus de récolte à des fins de production d'énergie. Depuis l'été dernier, elle a d'ailleurs débuté l'exercice à petite échelle. Par contre, cette récolte doit se faire en tenant compte de la capacité des sols à maintenir leur fertilité à long terme. L'exportation d'une partie de la biomasse forestière entraîne en effet nécessairement l'exportation d'éléments minéraux qui s'y retrouvent. Et ce manque à gagner de minéraux peut, dans certains cas, entraîner une diminution de la fertilité du sol.

Ce projet a pour objectif de proposer, pour le territoire de la MRC du Haut-St-François, une échelle relative qui aide le praticien à identifier le degré de sensibilité des sites à la récolte de la biomasse, en se basant sur des critères facilement identifiables sur le terrain.

1. SOURCES D'INFORMATION UTILISÉES POUR L'ANALYSE

Deux principales sources d'information cartographiques ont été utilisées pour caractériser le territoire de la MRC : la carte écoforestière du 3e inventaire forestier décennal produite par le MRNF et la carte des séries de sol fournie par l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA).

1.1. CARTE ÉCOFORESTIÈRE DU 3E INVENTAIRE FORESTIER DÉCENNAL

Cette carte a été utilisée en priorité lorsqu'elle contenait l'information nécessaire car elle présente un découpage des unités cartographiques bien plus précis que la carte des séries de sol. Elle a été utilisée pour caractériser certains paramètres descriptifs du milieu physique, dont le dépôt de surface (entre autres son épaisseur) et le drainage.

1.2. CARTE DES SÉRIES DE SOLS

Cette carte localise les séries de sol qui font l'objet d'une description précise dans les études pédologiques réalisées par canton. Le territoire de la MRC du Haut-St-François est couvert par deux études pédologiques (figure 1) :

- **Canton de Wolfe** : étude 58, produite en 1998 par le Centre de recherche et d'expérimentation en sols du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- **Cantons de Stanstead, Richmond, Sherbrooke et Compton** : étude 18, produite en 1942 par le Service des fermes expérimentales du ministère fédéral de l'Agriculture en collaboration avec le Ministère de l'Agriculture de Québec et le Collège Macdonald de l'Université McGill.

Comme le montre la figure 1, le degré de précision des unités cartographiques diffère selon le canton. Malheureusement, les cantons de Stanstead, Richmond, Sherbrooke et Compton, qui couvrent la plus grande superficie de la MRC du Haut-St-François (plus des ¾) présentent le découpage le plus grossier des unités cartographiques.

La base de données associée à la carte pédologique renseigne, pour chaque unité cartographique, sur une à quatre séries de sol présentes avec le pourcentage de superficie couvert par chacune. Il a été décidé de baser l'analyse des propriétés physico-chimiques du sol sur la série de sol prédominante (série 1), qui couvre au moins 50 % de la superficie de l'unité cartographique.

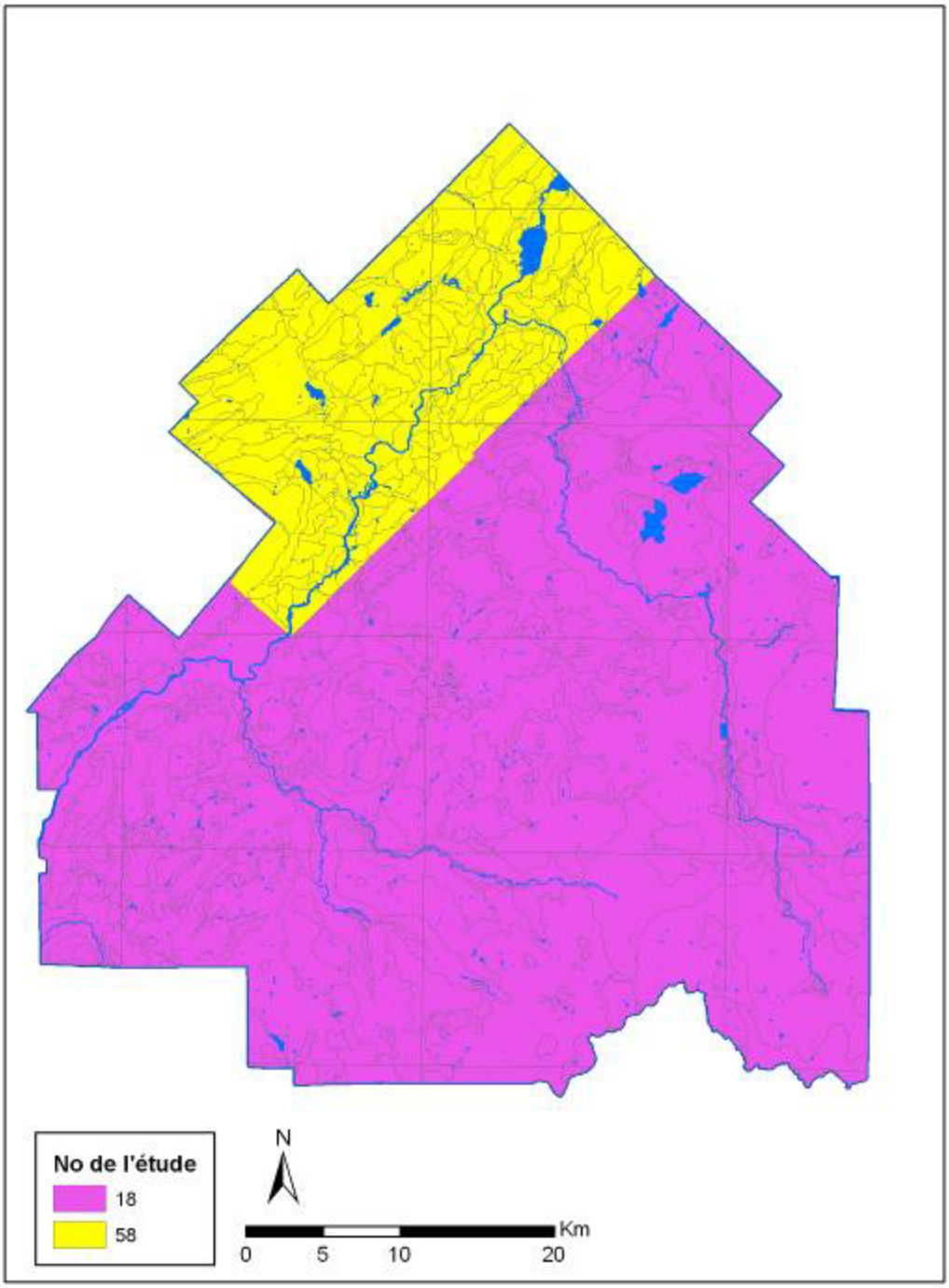


Figure 1. Localisation des études pédologiques couvrant le territoire de la MRC du Haut-St-François

Deux autres bases de données, fournies par l'IRDA, peuvent être mises en relation avec la carte :

- La base de données associée à chaque étude pédologique qui fournit, pour certaines séries seulement, des données descriptives physico-chimiques à partir d'échantillons de sol prélevés sur le canton. L'information est présentée pour chaque horizon de sol. On y retrouve, entre autres, le pH, les pourcentages de sable, limon, argile, les principaux cations échangeables (calcium, magnésium, potassium), le pourcentage de saturation en bases, etc. Étant donné la zone de prospection racinaire, les données de l'horizon B, généralement compris entre 40 et 60 cm, ont été retenues pour la description des caractéristiques du sol.

- Des compilations d'analyses physico-chimiques réalisées par série de sol à l'échelle régionale (à partir de 14 échantillons prélevés dans toute l'Estrie) (fichier « FCS.dbf »). Cette base de données est indépendante des études pédologiques réalisées par canton, mais a l'avantage d'apporter certaines informations pour les séries de sol qui ne sont pas documentées dans les études pédologiques. L'information est présentée pour trois profondeurs de sol (DEG1 : partie labourable, DEG2 : partie labourable jusqu'à 40 cm de profondeur, DEG3 : de 40 à 60 cm de profondeur). On y retrouve à peu près les mêmes informations que dans la base de données précédente. Étant donné la zone de prospection racinaire, les données de l'horizon compris entre 40 et 60 cm ont été retenues.

Cette seconde source de données présente un portrait régional des séries de sol, contrairement à la première, qui est beaucoup plus locale et donc a priori précise, car spécifique à un canton donné. La première source d'information a donc été privilégiée et la seconde n'a été utilisée que lorsqu'aucune information de la source (1) n'était disponible.

Les données issues des cartes de séries de sol ont été utilisées pour documenter les caractéristiques physico-chimiques suivantes du sol : ordre de sol, pH_{eau}, saturation en bases, pourcentages de sables.

1.3. DONNÉES D'INVENTAIRE TERRAIN

Plusieurs compilations issues d'inventaires terrain réalisés dans le cadre d'études graduées[1] ou provenant de Domtar dans le cadre de leurs projets de plantations de peuplier hybride ont été comparées aux caractéristiques des polygones de la carte des séries de sol, afin de vérifier le degré de précision de cette dernière. La figure 2 présente la localisation des données d'inventaire qui ont été utilisées dans le cadre de cette comparaison. Après analyse, il s'avère que la concordance entre les deux séries de données (cartographiques et terrain) est souvent peu satisfaisante. Cela peut s'expliquer par l'échelle à laquelle les données d'inventaire ont été prélevées. Elles sont en effet souvent concentrées dans un même secteur et on observe même parfois plusieurs relevés d'inventaire dans une même unité cartographique. Il semble donc que la précision de l'information cartographique provenant des études pédologiques ne reflète pas toute la variabilité du terrain observé dans les relevés d'inventaire. Notons également que les relevés

[1] Dubois (1970) et Landry (1974)

d'inventaire terrain sont essentiellement situés dans les cantons de Stanstead, Richmond, Sherbrooke et Compton, qui sont couverts par l'étude pédologique comprenant les unités cartographiques les plus grossières.

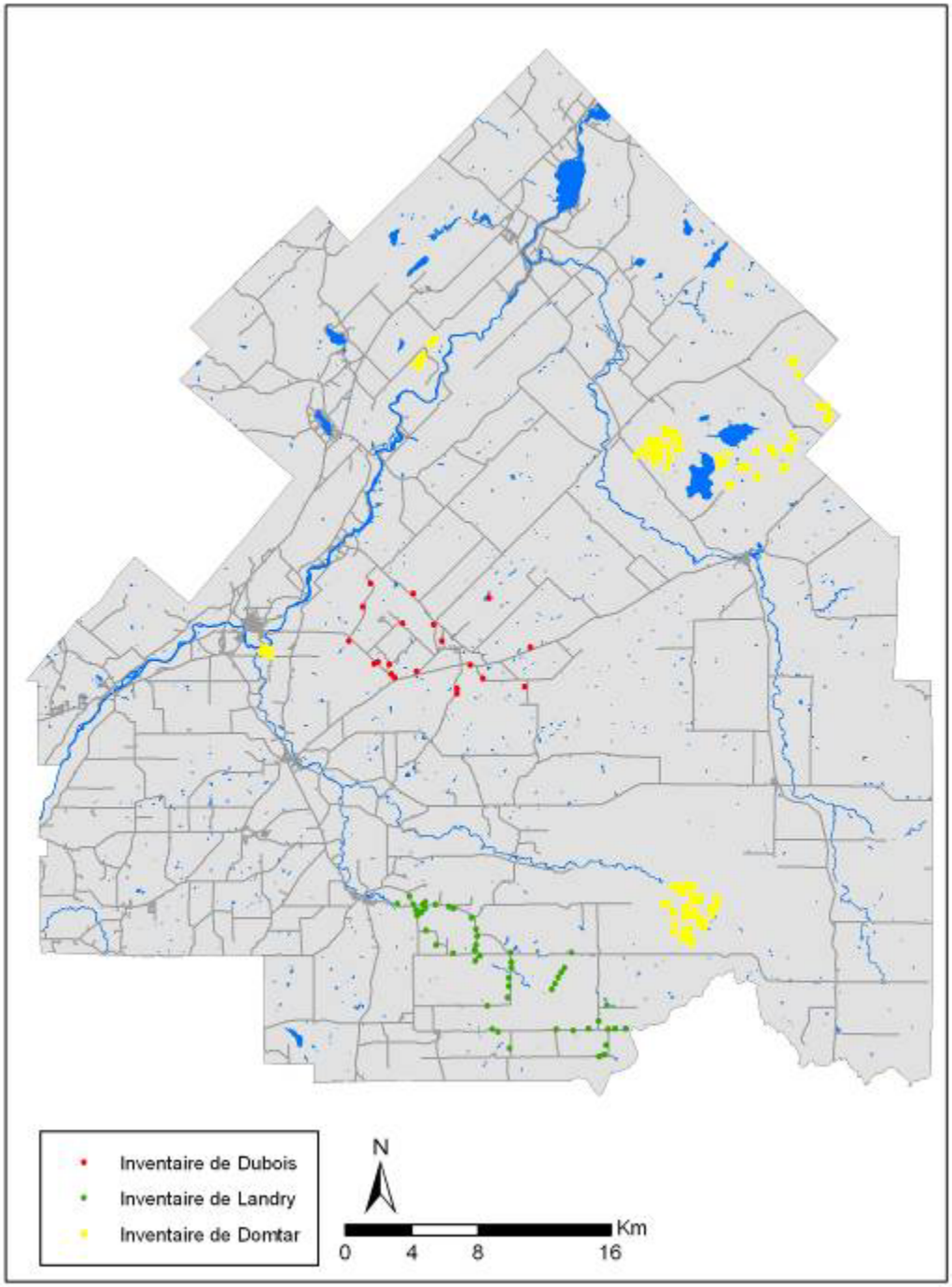


Figure 2. Localisation des placettes d'inventaire sur le territoire de la MRC du Haut-St-François

2. DESCRIPTION DU TERRITOIRE D'ÉTUDE

2.1. LOCALISATION PAR RAPPORT AU CADRE ÉCOLOGIQUE DE RÉFÉRENCE DU MRNF

La MRC du Haut-St-François est située en Estrie, plus précisément à la jonction de deux sous-domaines bioclimatiques, soit l'érablière à tilleul de l'est (sous-région écologique 2c-T) et l'érablière à bouleau jaune de l'est (sous-régions écologiques 3d-M et 3d-S) (figure 3). Les rapports de classification écologiques produits par le MRNF pour les deux sous-domaines présents ont été consultés dans le cadre de l'analyse (Gosselin *et al.* 1998 et Gosselin *et al.* 1999).

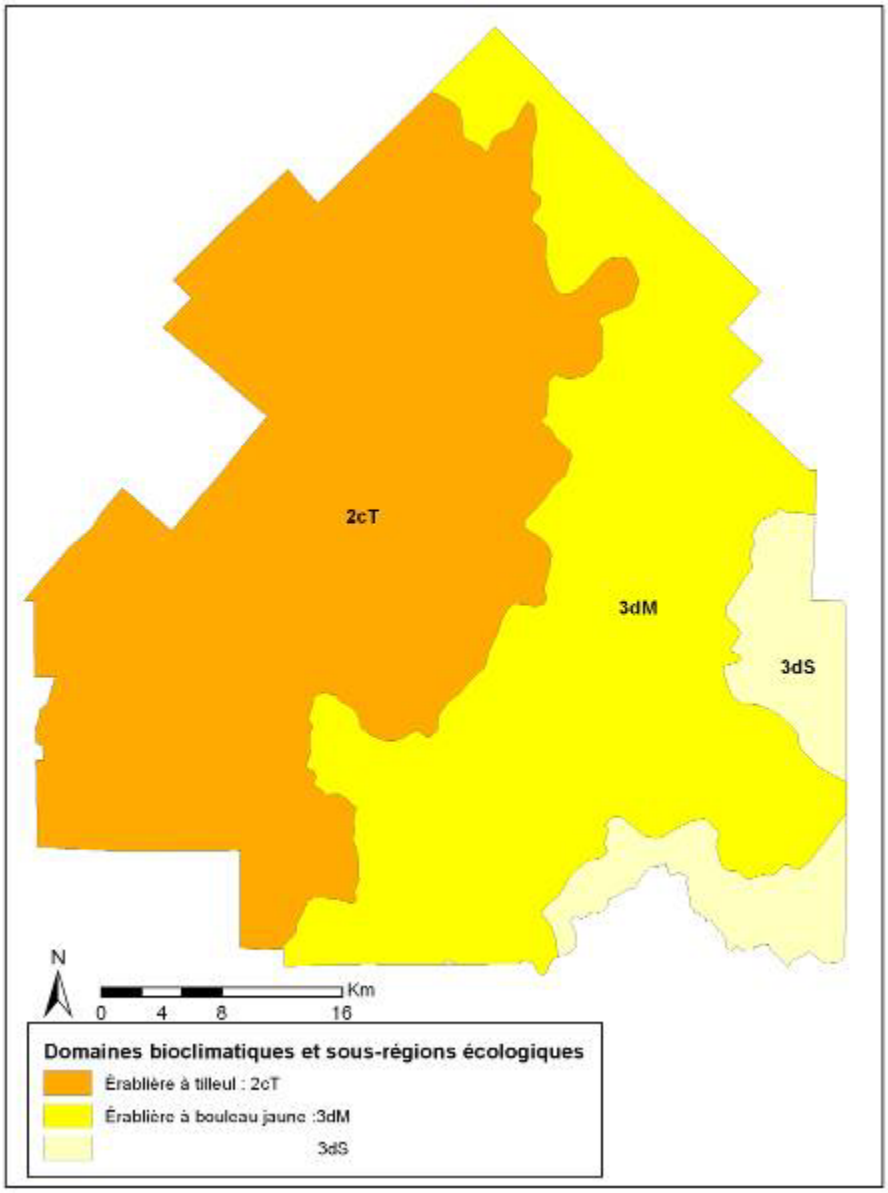


Figure 3. Cadre écologique de référence du MRNF pour le territoire de la MRC du Haut-St-François

2.2. LITHOLOGIE

La figure 4 présente les différentes roches mères observées sur le territoire de la MRC. Les données proviennent de la carte géologique du Québec (Thériault 2002).

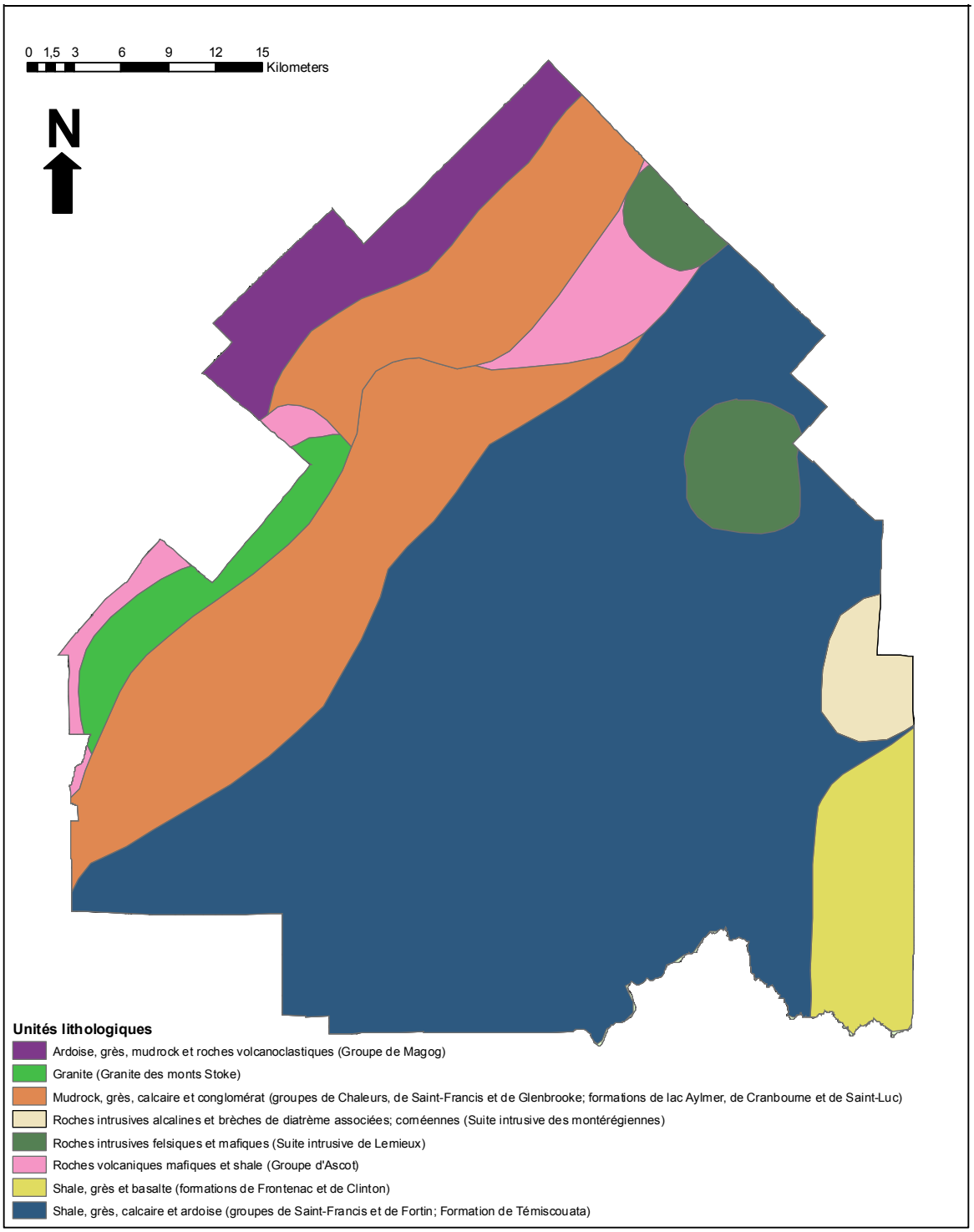


Figure 4. Lithologie de la MRC du Haut-St-François

2.3. ORDRES DE SOLS

La figure 5 présente les différents ordres de sol observés sur le territoire de la MRC. On y retrouve principalement des **brunisols** et des **gleysols**. Les brunisols sont difficiles à décrire de manière générale. On peut néanmoins mentionner que le concept central de l'ordre des brunisols est celui des sols formés sous couvert forestier et ayant des horizons Bm de couleur brunâtre, mais l'ordre inclut des sols de diverses couleurs également (Commission canadienne de pédologie, 1978). Les gleysols, quant à eux, ont des caractéristiques dénotant de la saturation par l'eau et des conditions réductrices de façon périodique ou prolongée (Commission canadienne de pédologie, 1978). Ils se retrouvent généralement dans de faibles dépressions et sur les basses-terres plates, saturées d'eau à chaque printemps, et on les observe principalement de part et d'autre des principaux cours d'eau dans la MRC. Les **podzols**, caractérisés par un horizon B dans lequel le produit prédominant d'accumulation est du matériau amorphe constitué principalement de matière organique huméfiée combinée, à divers degrés, au Al et au Fe (Commission canadienne de pédologie, 1978), sont concentrés dans le secteur du Mont Mégantic et à la limite ouest de la MRC.

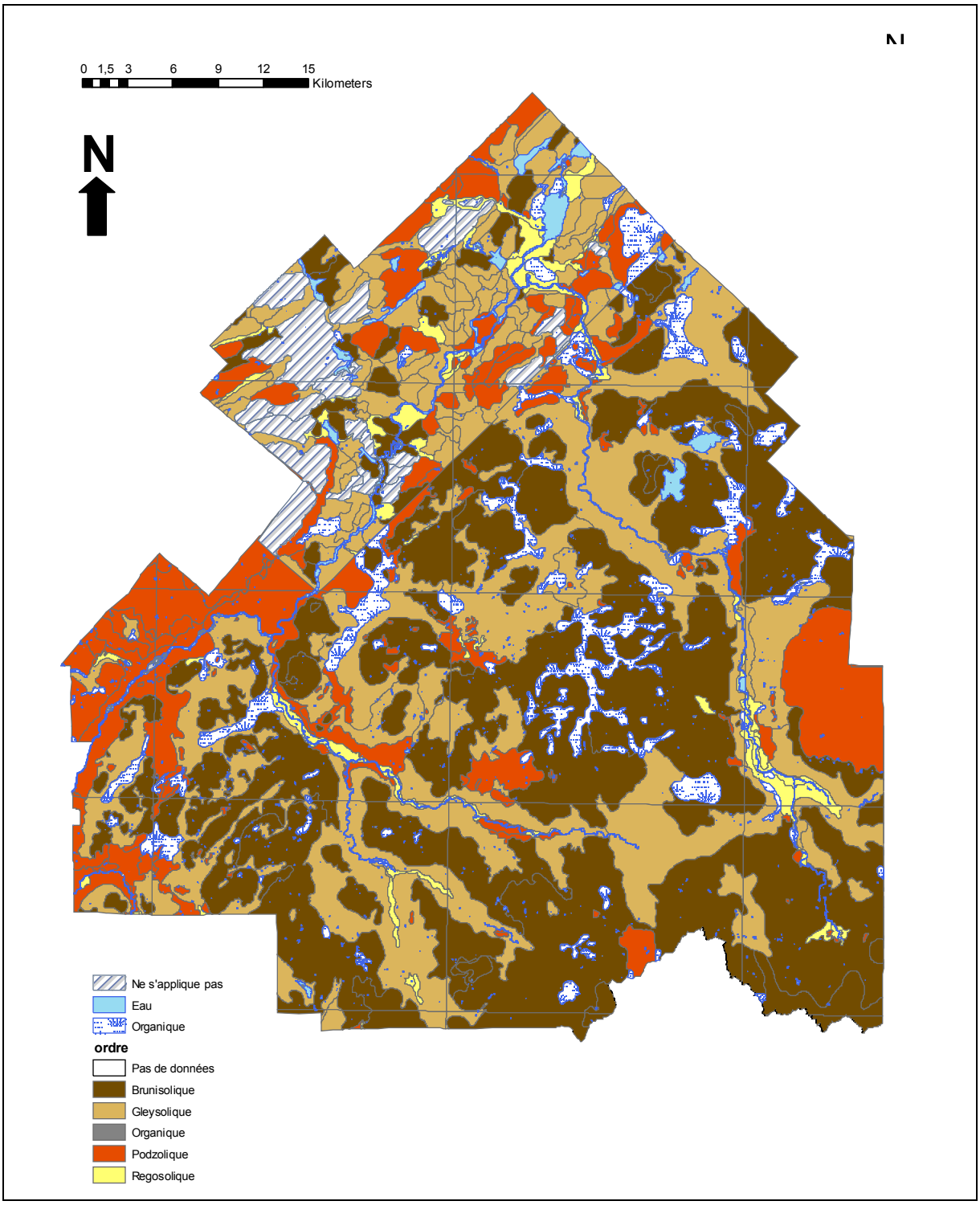


Figure 5. Ordres de sol présents sur le territoire de la MRC du Haut-St-François

2.4. pH

La figure 6 présente les classes de pH observées sur le territoire de la MRC. Les limites de 4,8 et 6 ont été fixées après consultation de l'échelle de sensibilité des sites à la récolte de la biomasse établie dans Raulund-Rasmussen *et al.* (2008), qui considère ces valeurs comme des valeurs seuils.

On retrouve principalement trois classes de pH sur le territoire de la MRC :

- La classe la plus faible (4,0 - 4,8), présente surtout de part et d'autre de certains cours d'eau (nord de la rivière St-François, rivière Eaton) et au nord du territoire, selon une bande orientée nord-est/sud-ouest; elle couvre environ 16 % des terres productives de la MRC.
- La classe 4,81 – 6,0 essentiellement présente selon la même bande orientée nord-est/sud-ouest, qui rappelle grossièrement la bande de mudrock, grès, calcaire et conglomérats de la carte de lithologie; elle couvre environ 18 % des terres productives.
- La classe la plus élevée (6,01 – 8,0) que l'on retrouve ailleurs, et qui est dominante sur 66 % du territoire.

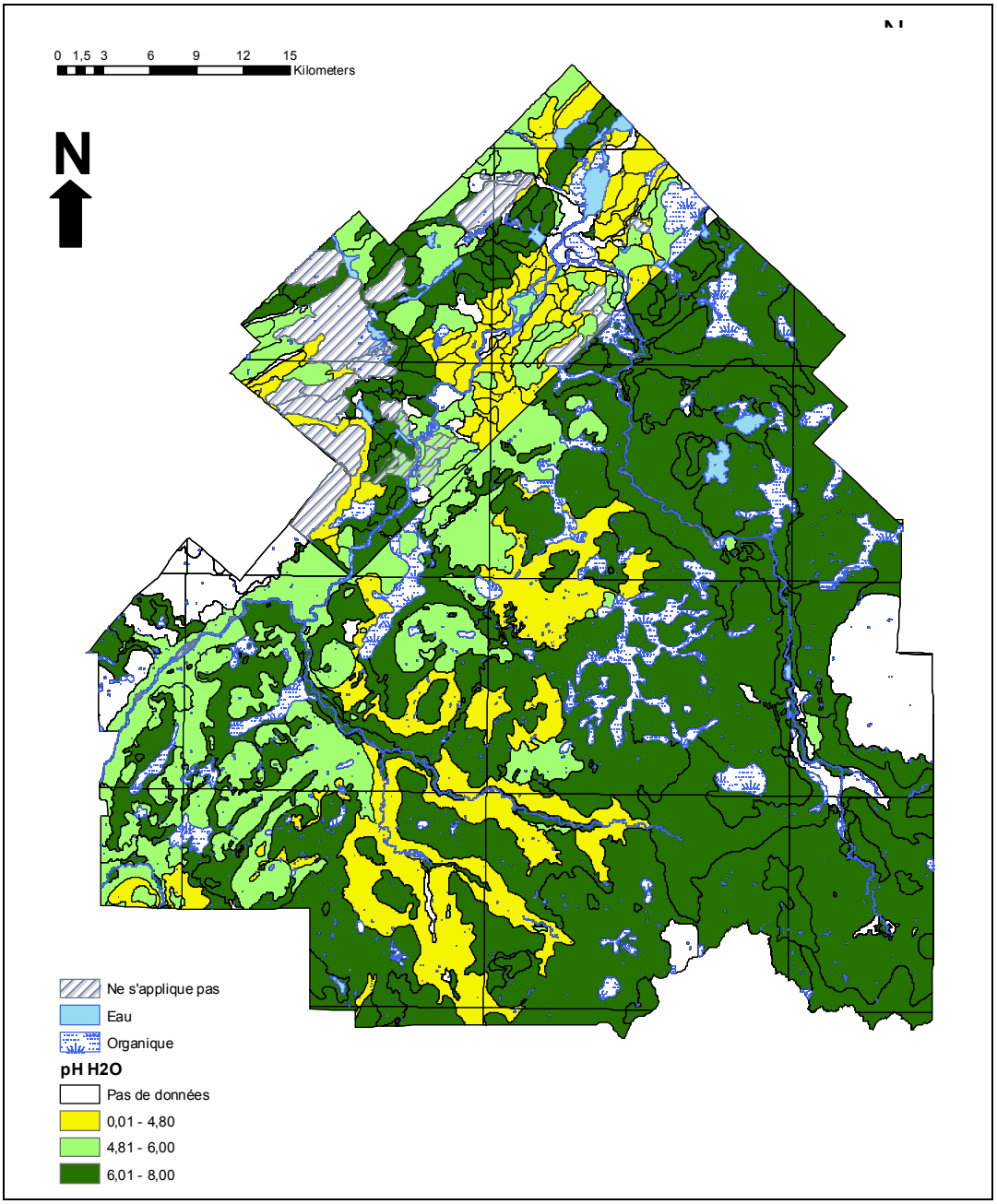


Figure 6. pH de l'horizon B (40-60 cm de profondeur) sur le territoire de la MRC du Haut-St-François

2.5. SATURATION EN BASES

La figure 7 présente la carte du pourcentage de saturation en bases (Ca, Mg et K) pour le territoire de la MRC. On y retrouve une grande hétérogénéité de valeurs puisque sont présentes autant des valeurs faibles (< 20 %) que des valeurs très élevées (60-80 %). La majorité du territoire a un pourcentage compris entre 20 et 40, ce qui correspond à un taux moyen-faible. On observe également une bonne corrélation spatiale entre la valeur de pH et le pourcentage de saturation en bases pour les valeurs les plus faibles (< 20 % de saturation en bases correspondant à un pH compris entre 4,01 et 4,80). De la même manière, les secteurs où le pourcentage de saturation en bases est le plus élevé (60-80 %) sont associés aux pH les plus élevés sur le territoire, de l'ordre de 7,6-7,8. Il s'agit principalement des séries de sol Ca (Terre franche de Calais), Plc (Petit Lac) et Lb (Lambton).

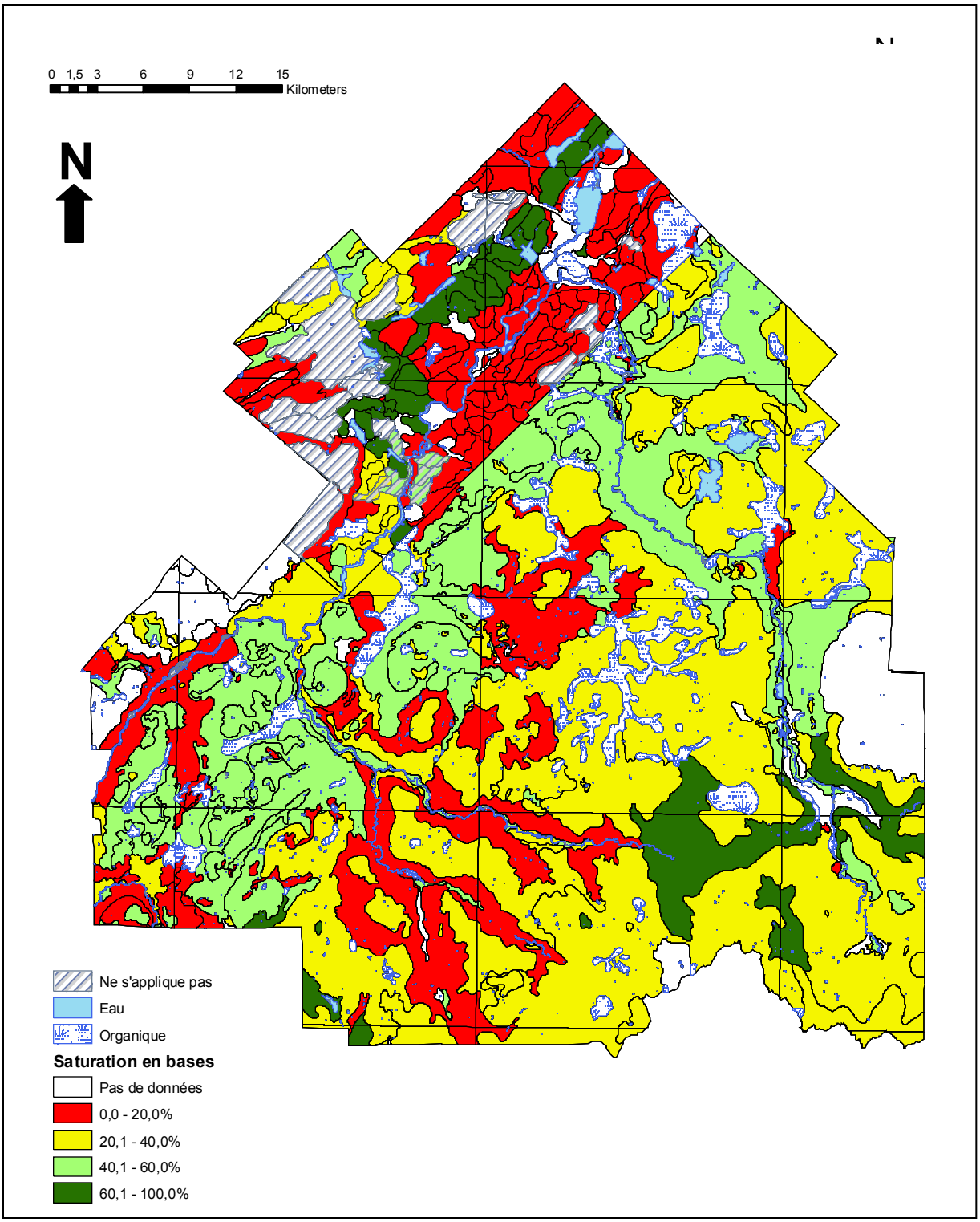


Figure 7. Carte de saturation en bases de l'horizon B (40-60 cm de profondeur)

3. DIFFÉRENTES APPROCHES POUR DÉTERMINER LE NIVEAU DE SENSIBILITÉ D'UN SITE À LA RÉCOLTE DE BIOMASSE

Plusieurs approches sont utilisées pour déterminer le niveau de sensibilité d'un site à la récolte de la biomasse forestière. Tout d'abord, on retrouve dans la littérature la description de principes évaluant la sensibilité d'un site selon différents scénarios de récolte de la biomasse forestière, en fonction de paramètres physico-chimiques du sol. Cette approche tient principalement compte de la fertilité globale du site. Le gouvernement du Québec, et plus précisément le ministère des Ressources naturelles et de la Faune a, quant à lui, récemment proposé un modèle basé sur l'analyse des charges critiques[2]. Cette approche est basée exclusivement sur une balance d'acidification du sol à plus ou moins long terme.

3.1. APPROCHE BASÉE SUR LA FERTILITÉ DU SITE

3.1.1. Présentation des paramètres retenus dans la littérature pour déterminer la sensibilité d'un site

Plusieurs approches développées par la communauté internationale permettant d'évaluer la sensibilité d'un site à la récolte de la biomasse forestière reposent sur les propriétés physico-chimiques du sol. Plus particulièrement, plusieurs paramètres semblent faire consensus dans le choix des variables à retenir :

	Types de sol	Texture	Épaisseur du sol	Drainage	pH sol minéral	pH humus	% sat. en bases /présence Mg-Ca	Minéralogie
Angleterre	X							
France		X				X		
CEE	X						X	
Scandinavie		X	X		X			X
Minnesota			X	X				
Ontario		X	X					
Québec [1]		X	X	X			X	

[1] : Les critères présentés pour le Québec sont ceux provenant des études de E. Thiffault et D. Paré du Service canadien des forêts et non pas l'approche du MRNF.

Les clés détaillées de chaque pays/province/état sont présentées en annexe 1. Les principaux critères retenus pour **qualifier la sensibilité d'un site à la récolte par <u>arbre entier</u>** sont les suivants :

- <u>Types de sol :</u> les tourbières ombrotrophes et les podzols présentent une sensibilité accrue *versus* les brunisols et les gleysols.
- <u>Texture du sol</u> : la sensibilité d'un site augmente avec le caractère grossier de la texture.
- <u>Épaisseur du sol</u> : la sensibilité est accrue sur les sols minces à très minces.

[2] La charge critique se définit comme « une évaluation quantitative de la mesure de l'exposition à un ou plusieurs polluants en dessous de laquelle les éléments de l'environnement ne subissent aucun dommage significatif à court ou à long terme, selon les connaissances actuelles » (UBA 2004)

- Drainage du sol : la sensibilité est accrue sur les sols à drainage très mauvais ou excessif.
- Humus du sol : la sensibilité d'un site augmente avec le caractère acide d'un humus.
- Pourcentage de saturation en bases – présence de Mg et Ca - minéralogie : la sensibilité d'un site augmente lorsque la présence en cations diminue.

3.1.2. Proposition de critères basés sur les propriétés physiques du sol pour déterminer la sensibilité relative d'un site à la récolte de la biomasse

À la lumière des paramètres présentés dans la section 3.1.1., il est possible de proposer certaines lignes directrices pour l'identification des sites les plus sensibles à la récolte de la biomasse.

Mise en contexte :
Il est important de mentionner, dans un premier temps, que **les critères retenus cherchent à être les plus simples possible et facilement identifiables sur le terrain**, de manière à permettre à chaque propriétaire forestier de faire lui-même son diagnostic, sans être obligé d'avoir recours systématiquement à un professionnel ou à des analyses physico-chimiques de son sol. Ces critères sont donc basés uniquement sur les propriétés physiques du sol. Des clés permettant d'évaluer sur le terrain la texture et le drainage du sol sont proposées en annexe 2. De plus, il est important de noter que cette approche ne tient absolument pas compte de l'apport par les précipitations d'une acidité au sol, sachant que la MRC se situe dans l'une des régions au Québec les plus touchées par les précipitations acides.

Mise en garde :
Cet exercice est fait dans le cadre d'une **approche conservatrice**. La plupart des clés qui ont été développées dans la littérature internationale pour déterminer la sensibilité d'un site à la récolte de biomasse (voir section 3.1.1.) considèrent la récolte par arbre entier comme le mode de récolte le plus sévère, qu'il faut éviter sur les sites les plus sensibles. Or, dans le cas de la MRC du Haut-St-François, aucune récolte par arbre entier n'est pour le moment pratiquée chez les petits propriétaires forestiers. La récolte par tronc seulement demeure dans ce cas le mode de récolte le plus exigeant pour la fertilité du site récolté, pour lequel on propose d'appliquer les critères les plus sévères.

Critères retenus :
Selon l'approche conservatrice considérée, il est alors proposé de définir les sites les plus sensibles à la récolte par tronc seulement selon les critères suivants :

a) Les sols très minces
Il s'agit des sols dont l'épaisseur est inférieure à 25 cm, soit les dépôts M1A, R1A et R sur la carte écoforestière. Ont été aussi considérés les sites de drainage excessif (0) ou rapide (1) qui, dans la grande majorité des cas, se recoupent avec les sols très minces.

b) Les tourbières et les sites de drainage très mauvais
Il s'agit des dépôts de surface 7E et 7T, ainsi que de tous les drainages classés très mauvais (6).

c) Les sols avec une proportion importante de sables grossiers
Il est proposé de considérer dans cette catégorie les sols dont le pourcentage de sables dépasse 70 %. Le seuil a été fixé à 70, car il correspond à la limite entre les loams et les sables selon le triangle de texture (MRNF 1994). De plus, si l'on compare les cartes de pH ou de saturations en bases avec la carte des textures grossières, le seuil fixé à 70 % de sables permet une relativement bonne concordance et semble donc bien « capturer » les propriétés chimiques du sol (pH, saturation en bases).

La figure 8 présente la carte de sensibilité relative à la récolte de biomasse basée sur les critères de fertilité du sol. Les classes proposées sont les suivantes :

- Classe robuste correspondant aux sites où la récolte par tronc seulement peut être pratiquée sans risque d'altération de la fertilité du sol.
- Classe sensible où des mesures devraient être envisagées pour réduire au moins partiellement l'exportation de la biomasse forestière par rapport à un contexte de récolte par tronc seulement.
- Classe de données manquantes où la donnée de texture du sol n'est pas disponible et il n'est alors pas possible de poser un diagnostic complet. Il s'agit, entre autres, de terrains rocailleux et accidentés et de sites improductifs (catégorie de sol « non sol »). Par contre, cette qualification provenant des cartes pédologiques ne concorde pas toujours avec l'appellation retrouvée sur la carte écoforestière, qui qualifie parfois ces sites de peuplements productifs, ce qui explique qu'il ait été décidé de créer la classe « données manquantes ».

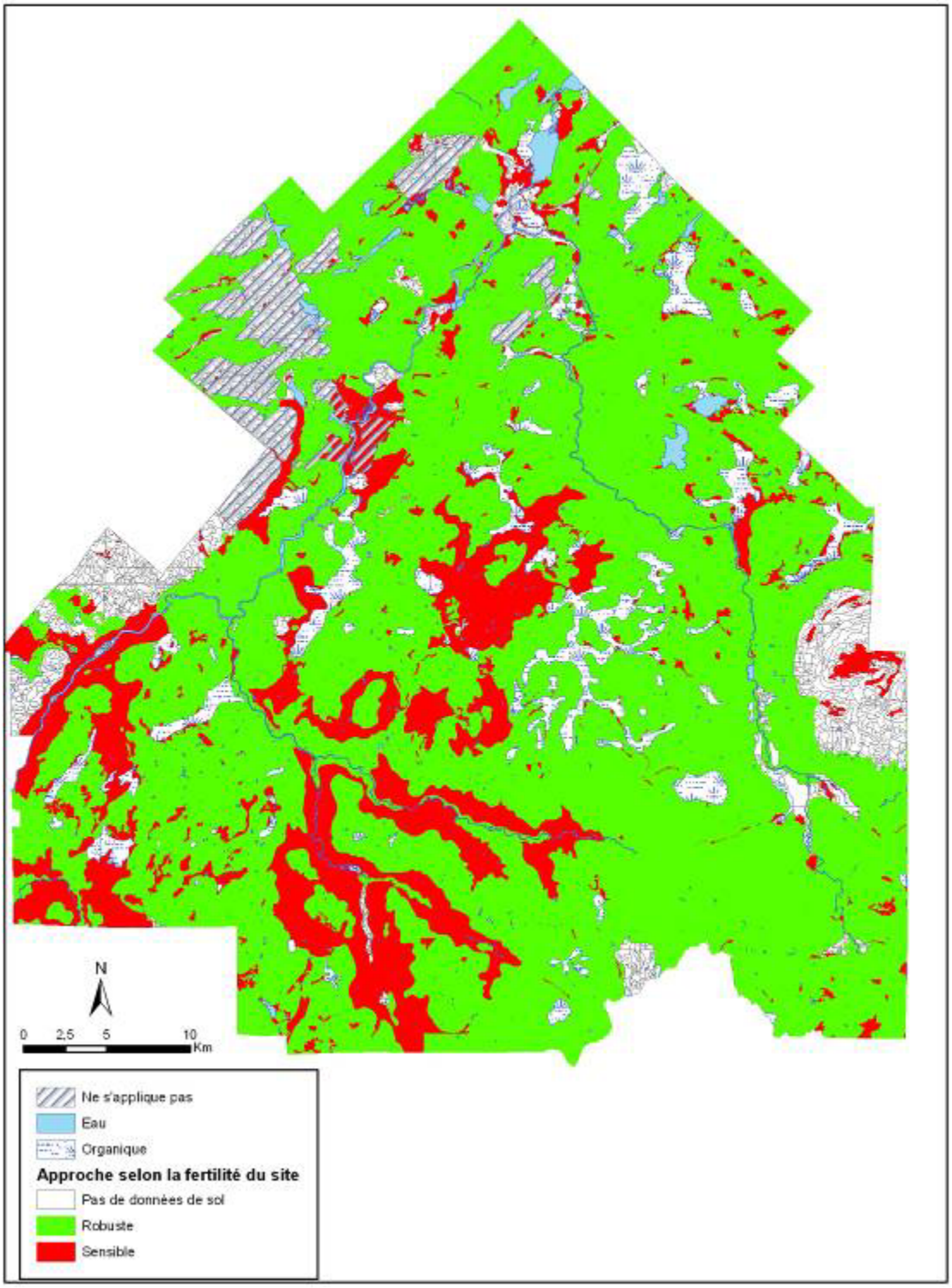


Figure 8. Carte générale de sensibilité relative à la récolte de la biomasse selon les critères de fertilité du sol retenus

Les sites sensibles couvrent 17 % du territoire de la MRC. Comme le montre la figure 9, ils sont principalement représentés par les sites de texture grossière que l'on retrouve surtout le long des rivières St-François et Eaton (71 % des sites sensibles). Les sols très minces ainsi que les milieux très humides sont plus marginaux, représentant respectivement 2 et 26 % des sites sensibles. Les sols très minces sont davantage concentrés à l'est de la MRC (Mont Mégantic), à l'extrémité sud ainsi qu'au nord-ouest de la MRC. Les milieux très humides se retrouvent ponctuellement sur l'ensemble du territoire.

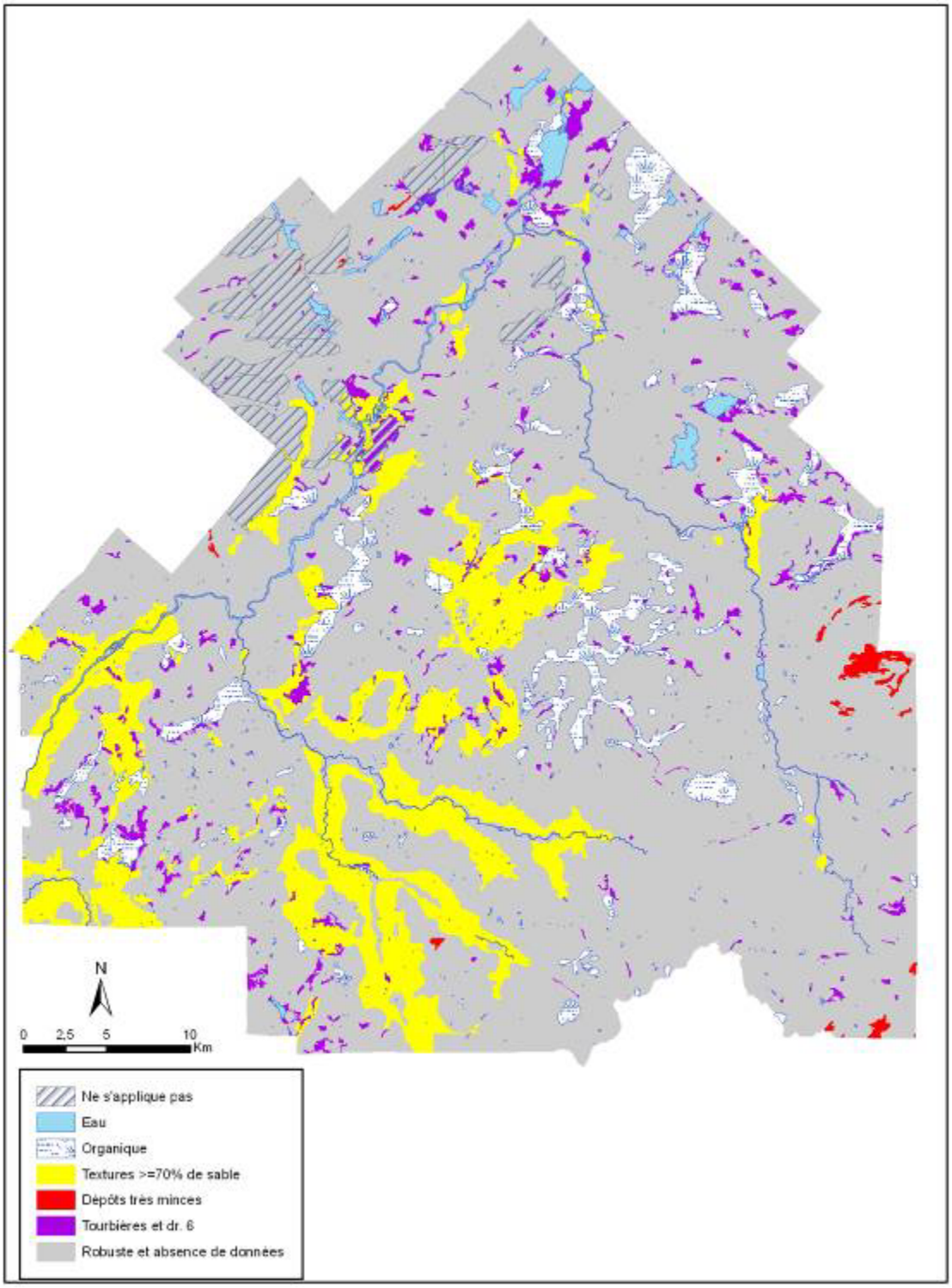


Figure 9. Carte détaillée de sensibilité relative à la récolte de la biomasse selon les critères de fertilité du sol retenus

3.1.3. Comparaison de la carte de sensibilité produite selon les critères retenus à la section 3.1.2., avec la carte de sensibilité produite selon les critères établis par Raulund-Rasmussen *et al.* (2008) en Scandinavie

Cette comparaison a pour objectif de s'assurer que les critères retenus basés sur les propriétés physiques du sol (épaisseur, drainage et pourcentage en sables) englobent de manière satisfaisante l'ensemble des critères proposés par Raulund-Rasmussen *et al.* (2008) qui considère également certaines propriétés chimiques du sol (pH et minéralogie). La carte de sensibilité selon les critères de Raulund-Rasmussen *et al.* (2008) est présentée à la figure 10. À une échelle globale, la comparaison des deux cartes semble relativement satisfaisante, puisque les secteurs identifiés sensibles sur la carte selon Raulund-Rasmussen le sont aussi à la figure 8. Par contre, certains secteurs classés sensibles sur la carte de sensibilité selon Raulund-Rasmussen sont beaucoup plus étendus en terme de superficie que dans l'analyse basée uniquement sur les propriétés physiques du sol (figure 8). Il s'agit surtout de secteurs situés au nord de la MRC, le long de la rivière St-François, où les sols sont profonds et de texture fine, mais avec un pH faible (< 4,8). La sensibilité de ces secteurs ne peut donc pas être évaluée sur le terrain uniquement à partir des critères basés sur l'épaisseur, la texture et le drainage du sol. Dans ces cas-ci, la consultation de la carte de sensibilité selon Raulund-Rasmussen est importante pour guider le propriétaire dans son diagnostic.

En conclusion, l'utilisation des propriétés physiques du sol permet de « capturer » en général de manière satisfaisante les critères basés sur les propriétés chimiques du sol. Dans la portion nord de la rivière St-François, il est par contre important de considérer un risque accru de perte de fertilité du sol, en raison de la présence d'un pH particulièrement faible. Cette zone est présentée en orange sur la figure 10.

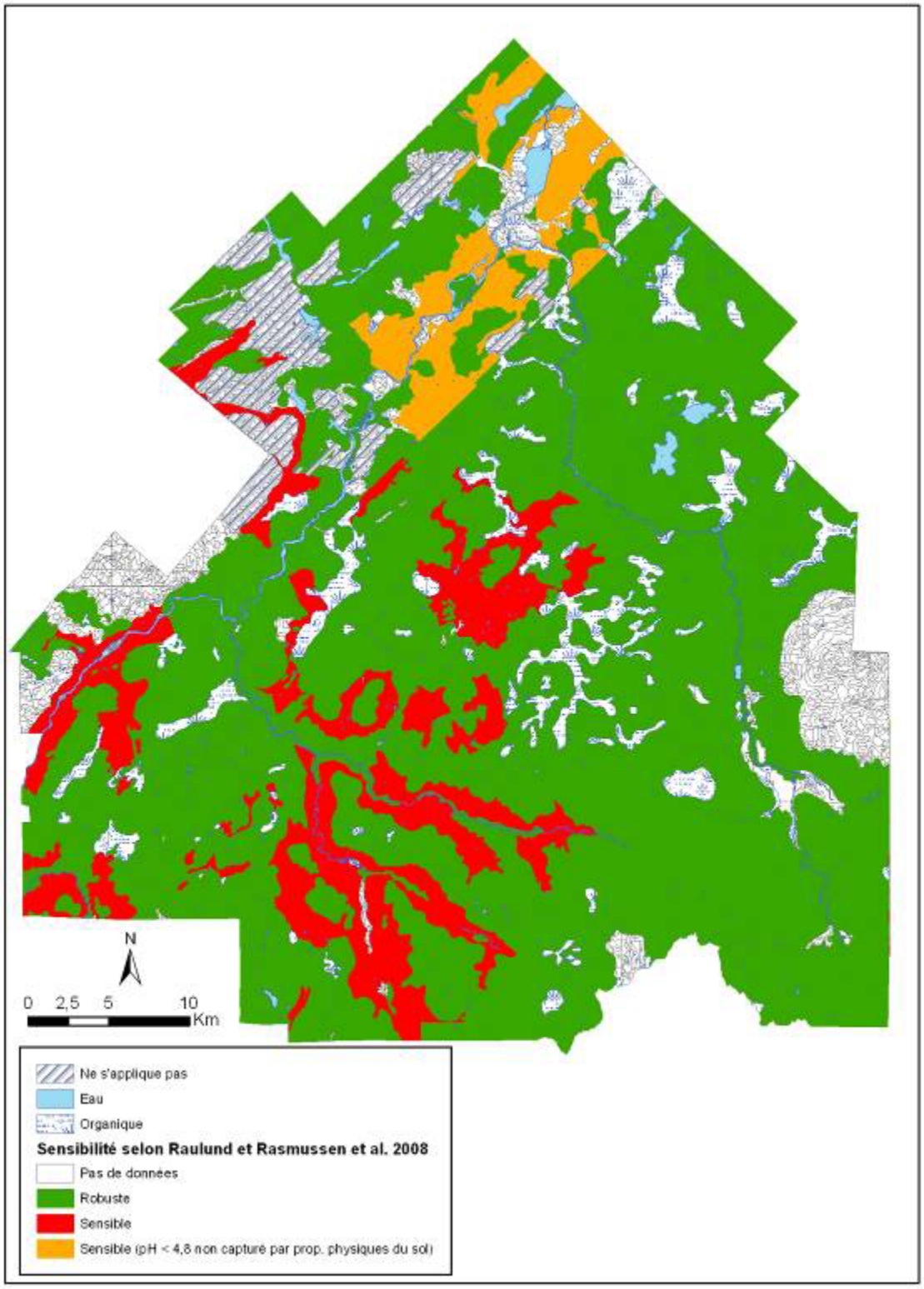


Figure 10. Carte de sensibilité relative à la récolte de la biomasse selon les critères de Raulund-Rasmussen *et al.* (2008)

3.2. APPROCHE BASÉE SUR LES CHARGES CRITIQUES

3.2.1. Brève description du modèle

Un modèle a été récemment développé par la Direction de la recherche forestière du MRNF, permettant d'établir le portrait du dépassement de la charge critique en acidité à court terme (CC(S)) à l'échelle du Québec (Ouimet et Duchesne 2008). La charge critique se définit comme « une évaluation quantitative de la mesure de l'exposition à un ou plusieurs polluants en dessous de laquelle les éléments de l'environnement ne subissent aucun dommage significatif à court ou à long terme, selon les connaissances actuelles » (UBA 2004). Ce modèle permet de comparer les effets de deux scénarios de récolte de la biomasse, soit la récolte par tronc seulement et la récolte par arbre entier, sur le dépassement de la charge critique en acidité à court terme. Dans le cadre de cette approche, la sensibilité d'un site à la récolte de la biomasse est donc basée uniquement sur une balance d'acidification du sol à plus ou moins long terme.

La charge critique en acidité à court terme se traduit comme suit :

$$CC(S) = BC_{dep} - Cl_{dep} + BC_w - BC_u - ANC_{dr\ crit}$$

BC_{dep} : la somme des dépôts atmosphériques annuels totaux en K + Ca + Mg + Na
Cl_{dep} : les dépôts atmosphériques annuels totaux en Cl
BC_w : le taux d'altération annuel du sol en K + Ca + Mg + Na
BC_u : le taux d'immobilisation net annuel en K + Ca + Mg dans la biomasse qui sera exportée par la récolte
$ANC_{dr\ crit}$: la valeur critique de l'alcalinité de l'eau de drainage du sol

L'unité cartographique utilisée pour produire le bilan des charges critiques est la tesselle[3], d'une superficie de 14 ha. À chaque tesselle d'un district écologique donné, des valeurs dendrométriques et écologiques moyennes du type écologique afférant ont été attribuées, de manière à donner une valeur à BC_u. La détermination de la sensibilité des sites selon l'approche des charges critiques repose donc sur l'application d'un modèle mathématique complexe, qui exige plusieurs étapes de regroupements de données et extrapolations nécessaires pour couvrir l'ensemble des cas observés sur le territoire du Québec. De par les intrants qui l'alimentent et son échelle d'application (la tesselle), il ne semble pas adapté pour caractériser à une échelle fine, sur le terrain, la sensibilité d'un site. Par contre il présente l'avantage de fournir un portrait pour l'ensemble de la province du Québec et mettre en évidence les tendances régionales.

3.2.2. Portrait des dépôts atmosphériques générateurs d'hydrogène à l'échelle de la MRC

À l'échelle du territoire de la MRC, les dépôts atmosphériques totaux (secs et humides) générateurs d'hydrogène sont compris entre 797 et 849 eq/ha/an. Sachant que l'écart-type associé à la moyenne provinciale est de 200 environ, les précipitations acides ne constituent pas une

[3] La tessellisation du territoire correspond à un échantillonnage de la carte écoforestière par des tesselles (tuiles) d'une superficie d'environ 14 ha, dont les caractéristiques correspondent au peuplement de la carte écoforestière retrouvé en son centre (Ouimet et Duchesne 2008).

influence sur le bilan de la charge critique à l'échelle de la MRC. On peut, par contre, mentionner que le Québec méridional est caractérisé par les valeurs les plus élevées de dépôts atmosphériques générateurs d'hydrogène et que la MRC du Haut-St-François n'échappe pas à cette tendance.

3.2.3. Portrait du taux d'altération annuel du sol en K + Ca + Mg + Na à l'échelle de la MRC

Le taux d'altération du sol varie de manière importante à l'échelle de la MRC puisqu'on y retrouve des valeurs allant de 118 eq/ha/an à 1582 eq/ha/an. Lorsque l'on analyse la carte des valeurs d'altération du sol associée à chaque tesselle, on remarque la présence d'un seuil situé à 650 eq/ha/an, qui crée plusieurs zones très spécifiques à l'échelle de la MRC. Certains secteurs se distinguent en effet par une très grande concentration (voire la présence exclusive) de tesselles dont la valeur est supérieure à 650 eq/ha/an. Ces zones sont représentées à la figure 11. Ces mêmes zones sont également très distinctes sur la carte de lithologie (figure 4) et correspondent :

- à la suite intrusive des Montérégiennes (roches intrusives alcalines et brèches de diamètre associées);
- à la suite intrusive de Lemieux (roches intrusives felsiques et mafiques);
- au groupe de Magog (ardoise, grès, mudrock et roches volcaniques);
- au groupe d'Ascot (roches volcaniques mafiques et shale);
- aux formations de Frontenac et Clinton (shale, grès et basalte).

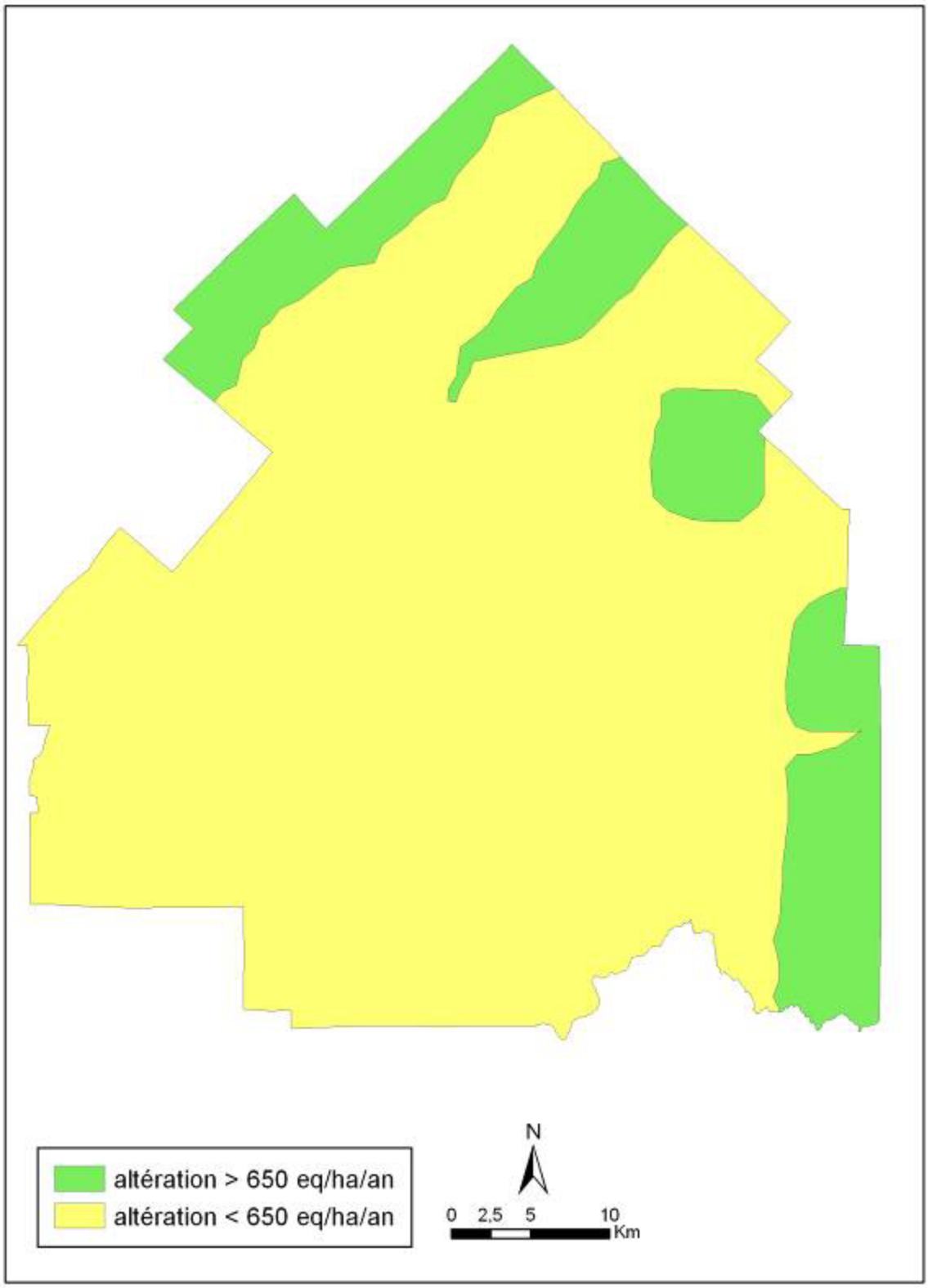


Figure 11. Taux d'altération annuel du sol en K + Ca + Mg + Na

3.2.4. Portrait du dépassement de la charge critique en acidité à court terme en fonction du mode de récolte

Un site ou une tesselle est déclaré sensible à la récolte de la biomasse si l'on y observe un réel dépassement de la charge critique en acidité à court terme (D(CC)). Sachant que l'écart-type est estimé à 200 environ, il est proposé de considérer les classes suivantes :

a) si D(CC) < -200 :
Sites robustes et aucun problème de baisse de fertilité du sol à court terme associé à la récolte de la biomasse n'est envisagé (en considérant un écart-type de 200 environ, la valeur de dépassement est toujours négative).

b) si -200 < D(CC) < 200 :
Sites potentiellement sensibles et problèmes possibles associés à la récolte (la valeur est en marge du seuil acceptable fixé à 0, en considérant une valeur de 200 pour l'écart-type). Cette classe représente donc une zone grise dans laquelle les risques d'atteinte à la fertilité du sol par la récolte de la biomasse ne sont pas certains mais possibles. Selon l'approche conservatrice, l'intensité de récolte de la biomasse devrait donc être moindre que sur les sites robustes, mais pourrait peut-être être supérieure à celle pratiquée sur les sites classés sensibles.

d) si D(CC) > 200 :
Sites sensibles et problèmes certains de baisse de fertilité du sol associés à la récolte (la valeur de dépassement est toujours positive).

Les figures 12 et 13 présentent les cartes de sensibilité selon le mode de récolte. La figure 14 présente le mode de récolte recommandé en fonction de la sensibilité du site.

Résultats du dépassement de la charge critique en mode de récolte par arbre entier :
Selon l'analyse basée sur les charges critiques, 63 % du territoire doit être systématiquement exempt de la récolte par arbre entier (sites sensibles). La récolte par arbre entier peut être envisagée sur 29 % du territoire, mais les valeurs de dépassement de la charge critique se situent en marge de la limite fixée à un dépassement nul, en fonction de la valeur de l'écart-type (sites potentiellement sensibles). Et seule une petite proportion de la MRC (8 %) peut faire l'objet de la récolte par arbre entier sans risque d'altération de la fertilité du site (sites robustes).

Résultats du dépassement de la charge critique en mode de récolte par tronc seulement :
La carte de sensibilité des sites selon la récolte par tronc seulement est radicalement différente de celle représentant le mode de récolte par arbre entier. En effet, une infime proportion du territoire de la MRC (2 %), située au centre de la MRC, doit être exempte systématiquement de récolte (sites sensibles). Les deux-tiers du territoire peuvent faire l'objet de récolte par arbre entier sans risque d'atteinte à la fertilité des sites (sites robustes) et 29 % se situe en marge de la limite acceptable (sites potentiellement sensibles).

Discussion :
La seule variable qui diffère dans le calcul de dépassement de charge critique selon le mode de récolte pratiqué est BC_u, le taux d'immobilisation net annuel en K+Ca+Mg dans la biomasse qui sera exportée. Cela signifie que le taux d'immobilisation des cations contenus dans le feuillage et les branches a un poids important dans l'équation globale de dépassement de la charge critique puisque c'est cette valeur qui fait souvent passer un site classé robuste selon le mode de récolte par tronc seulement à sensible selon le mode de récolte par arbre entier.

Par contre, si l'on regarde les cartes de sensibilité à la récolte de la biomasse, qu'il s'agisse du mode de récolte par arbre entier (figure 12), tronc seulement (figure 13) ou encore de la carte combinée (figure 14), on voit très nettement s'afficher quatre zones, qui, dans tous les cas, représentent toujours les secteurs les moins sensibles (ou les plus robustes). Ces secteurs sont hachurés en gris sur chacune des cartes. Ils correspondent d'ailleurs aux zones où le taux d'altération annuel du sol en K + Ca + Mg + Na est le plus élevé, soit toujours supérieur à 650 eq/ha/an (figure 11). L'apport accru en cations par les mécanismes d'altération du sol pourrait donc être à l'origine d'un dépassement moindre de la charge critique en acidité à court terme dans ces quatre secteurs.

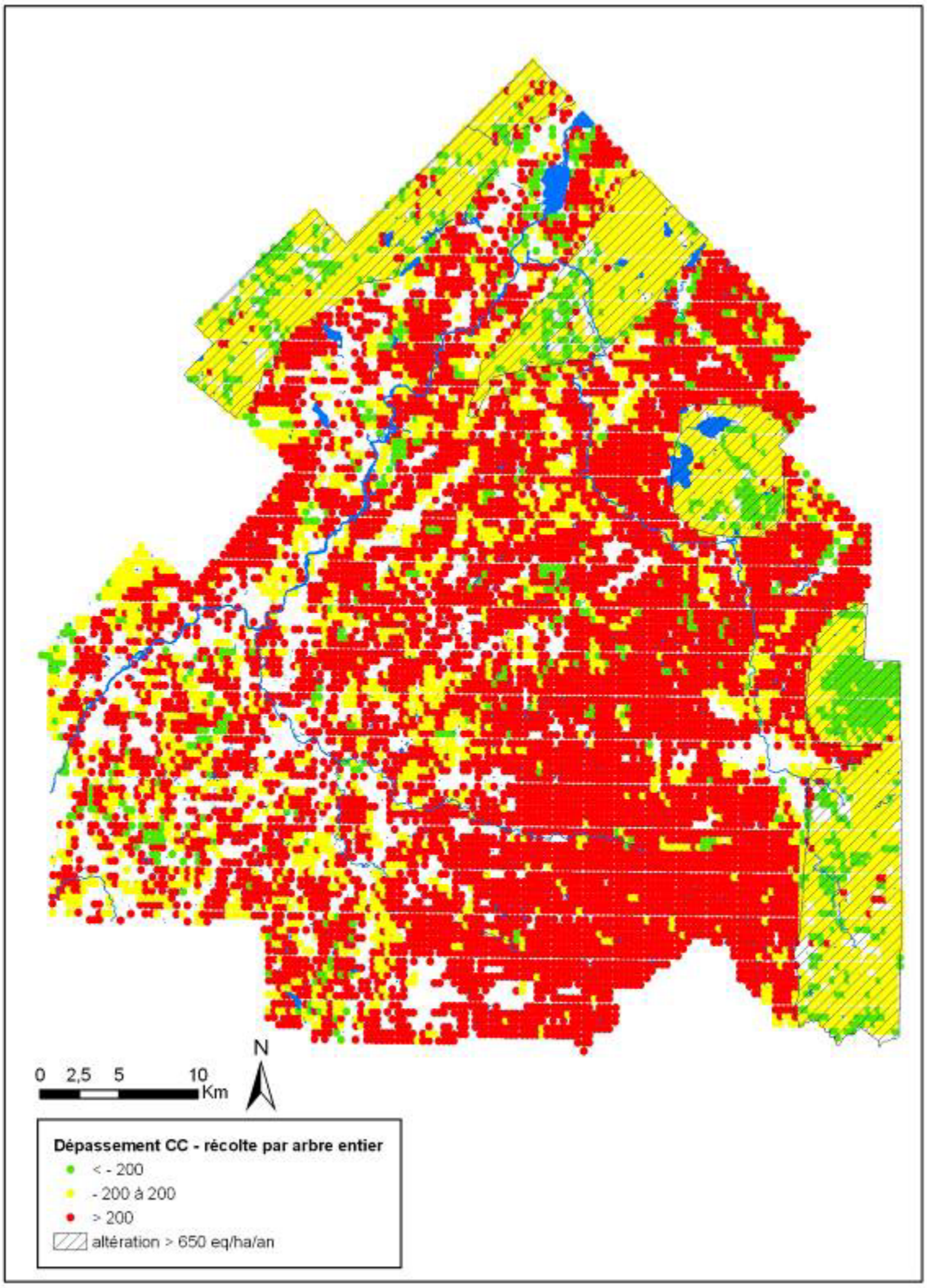


Figure 12. Sensibilité du site dans le cas du mode de récolte par arbre entier

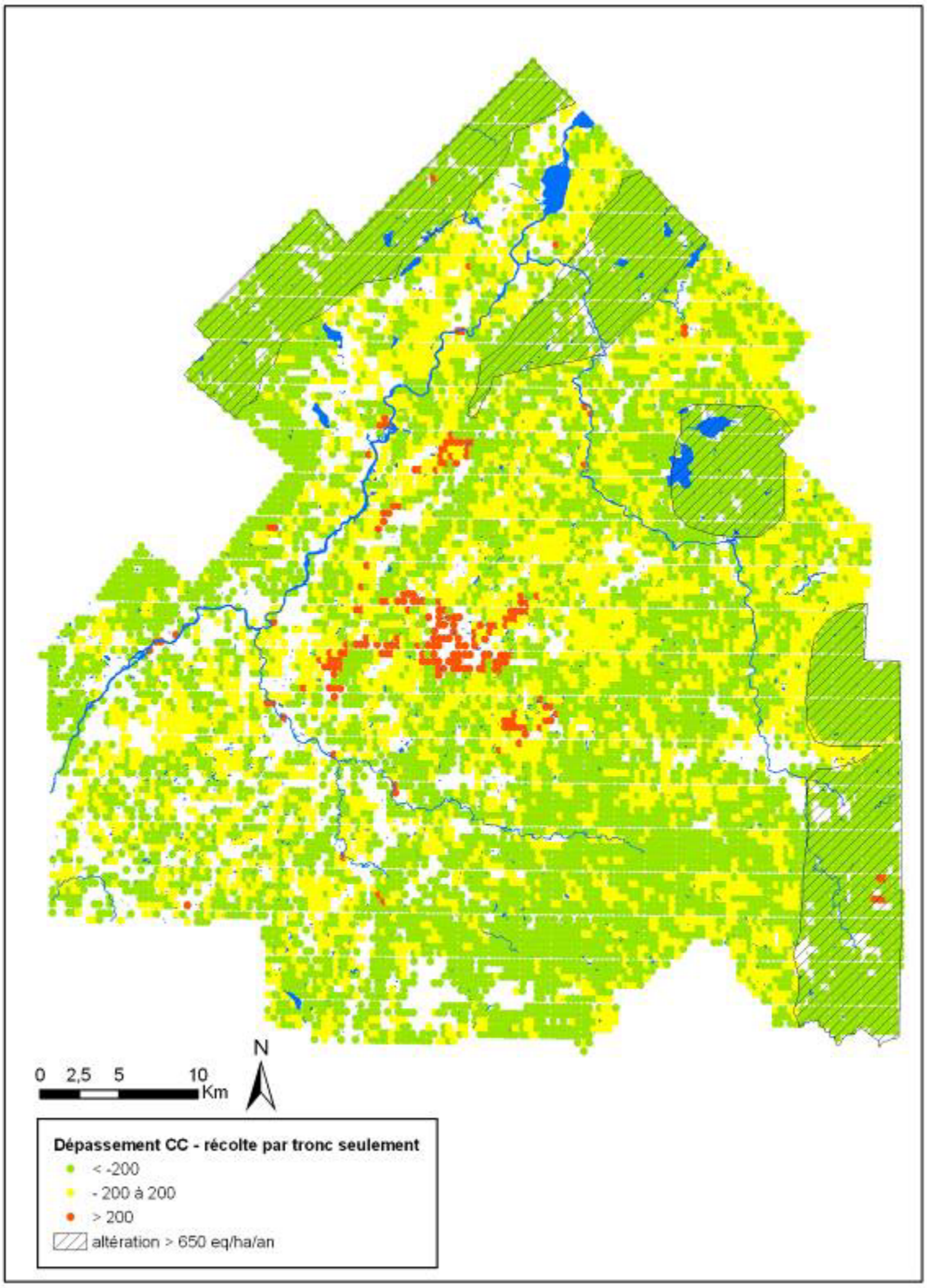


Figure 13. Sensibilité du site dans le cas du mode de récolte par tronc seulement

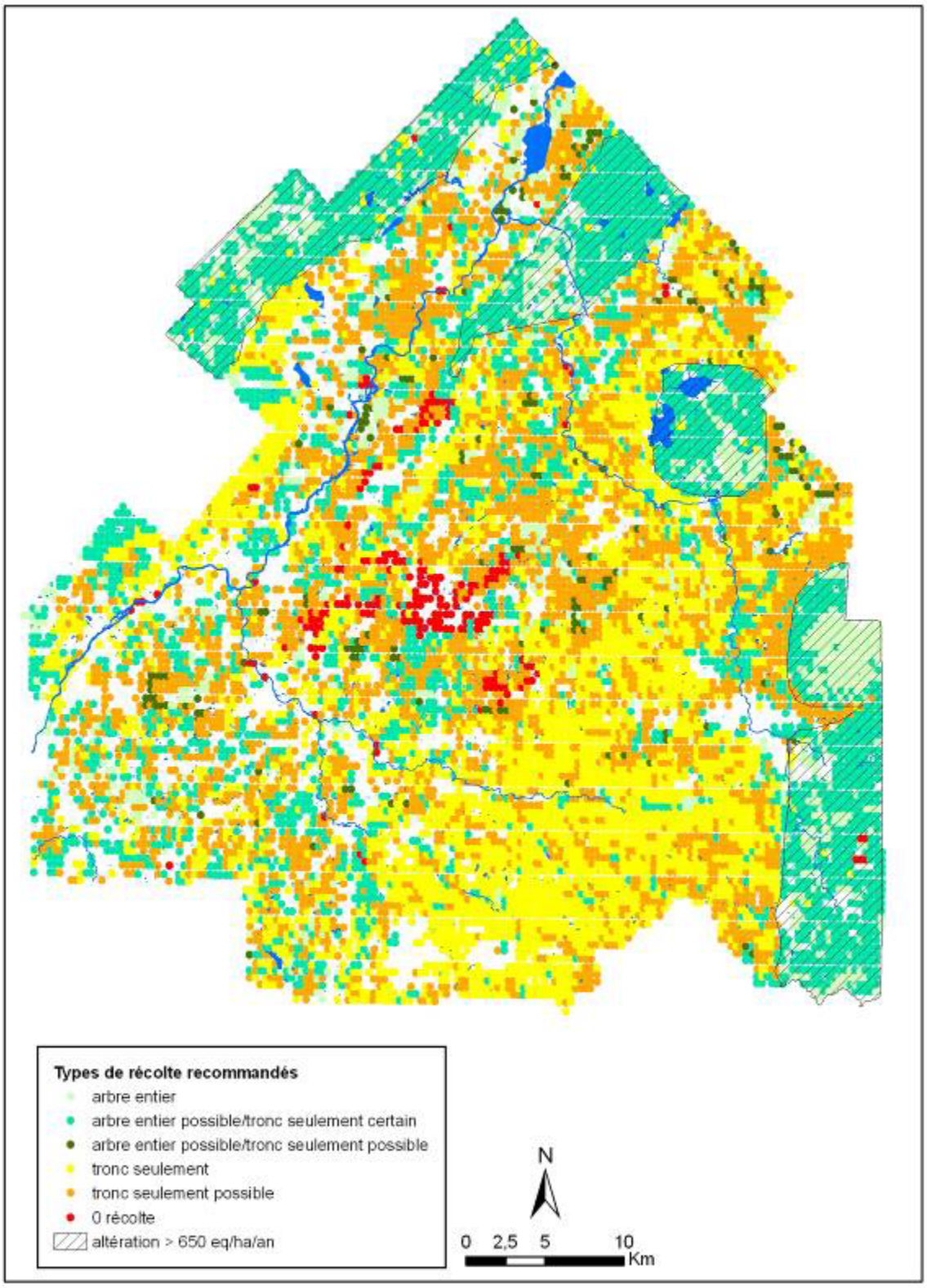


Figure 14. Mode de récolte recommandé en fonction de la sensibilité du site

3.2.5. Essai de détermination des stations étant reconnues systématiquement sensibles selon l'approche des charges critiques

Le taux d'immobilisation net annuel en cations (K + Ca + Mg) dans la biomasse qui sera exportée par la récolte est calculé dans le modèle des charges critiques, sur la base d'un regroupement de plusieurs types écologiques. Le tableau 1 montre, pour les stations présentes sur le territoire de la MRC, les pourcentages de tesselles qui appartiennent à chaque classe de sensibilité. Les stations qui sont faiblement représentées sur le territoire (couvertes par moins de 20 tesselles) ont été supprimées de l'analyse en raison de leur sous-échantillonnage.

Le tableau 1 montre qu'**il est impossible d'identifier, pour le territoire de la MRC, des stations qualifiées systématiquement de « sensibles » à partir de l'analyse basée sur l'approche des charges critiques.** En effet, les stations qui ont la plus grande proportion de tesselles dans la classe « site sensible » ont moins de la moitié de leur tesselles dans cette classe (cas de MF14 et FE21 en rouge). On peut donc seulement en conclure qu'une fois sur deux approximativement, ces stations sont classées sensibles, ce qui n'est pas acceptable pour les qualifier de systématiquement « sensibles ».

Discussion :
Une hypothèse qui expliquerait qu'il est difficile de mettre en évidence des tendances plus franches au niveau de la sensibilité de certains types écologiques est la localisation de la MRC dans trois sous-régions écologiques distinctes. La valeur du taux d'immobilisation net annuel en cations (K + Ca + Mg) dans la biomasse qui sera exportée associée à chaque type écologique est en effet basée sur la composition des essences observées dans les placettes groupées par sous-région écologique. Il est donc possible que la valeur du taux d'immobilisation net annuel en cations dans la biomasse qui sera exportée par la récolte varie selon la sous-région, entraînant des valeurs de dépassement de charges critiques différentes. Cette hypothèse s'est malheureusement avérée fausse, comme le montre l'annexe 3, où les pourcentages de tesselles qui appartiennent à chaque classe de sensibilité ont été calculés par sous-région écologique. Aucune tendance plus franche n'a pu être mise en évidence.

Si l'on considère maintenant les stations qui ont une majorité de tesselles dans la classe « sites robustes », il est possible d'identifier des stations à prédominance de tesselles dans cette classe (70 % et plus en vert). Par contre, **il se pose alors un problème de correspondance avec l'approche basée sur la fertilité du site**, puisque certaines d'entre elles sont qualifiées de sensibles selon l'approche basée sur la fertilité (cas surlignés en jaune). On peut citer certaines stations sur drainage hydrique (RS38, RE38, RC38) et d'autres sur sols très minces (FE30, MS20, MJ20).

Tableau 1. Pourcentage de tesselles qui appartiennent à chaque clase de sensibilité pour les différentes stations présentes – cas de la récolte par tronc seulement

Station	% tesselles			Nbr total de tesselles
	Sites robustes D(CC)<-200	Sites potentiellement sensibles -200<D(CC)<200	Sites sensibles D(CC)>200	
MF14	11	41	48	27
FE21	35	20	45	130
MJ14	7	66	28	61
MJ11	56	30	14	432
MJ24	7	79	14	174
RS14	2	94	4	114
FE31	13	85	2	46
FE25	13	85	2	47
FE22	74	26	0	1017
MJ15	24	76	0	1257
MJ12	98	2	0	2343
MJ25	23	76	0	1452
RS54	4	96	0	25
MF18	6	94	0	77
RS18	26	74	0	228
RS15	27	73	0	301
MJ28	30	70	0	141
RB15	40	60	0	20
RS11	50	50	0	26
FE35	51	49	0	168
RS38	72	28	0	105
FE30	74	26	0	27
MJ21	74	26	0	101
RS55	82	18	0	192
RE38	94	6	0	47
FE32	94	6	0	2599
RS12	95	5	0	55
RC38	96	4	0	296
MJ22	99	1	0	340
RB12	100	0	0	72
MS20	100	0	0	63
MJ20	100	0	0	42
RS52	100	0	0	23

rouge : stations avec le pourcentage le plus élevé de tesselles identifiées sensibles
bleu : stations identifiées majoritairement potentiellement sensibles
vert : stations identifiées majoritairement robustes
stations identifiées majoritairement robustes selon le modèle des charges critiques mais présentant des caractéristiques les classant sensibles selon l'approche par la fertilité (sols très minces, milieux très humides)

3.3. APPROCHE COMBINÉE PROPOSÉE

Dans le cadre du présent projet, il est finalement proposé de considérer à la fois l'approche basée sur la fertilité des sites et celle basée sur les charges critiques pour identifier les sites sensibles à la récolte de la biomasse sur le territoire de la MRC du Haut-St-François.

L'approche basée sur la fertilité des sites permet en effet de caractériser la sensibilité d'un site à l'échelle du polygone écoforestier, en considérant des critères simples, facilement identifiables sur le terrain, qui reposent sur l'épaisseur, la texture et le drainage du sol. Cette approche ne permet cependant pas de considérer l'apport en acidité généré par les précipitations. Comme la MRC du Haut-St-François est située dans le Québec méridional où les précipitations acides sont les plus abondantes, l'utilisation combinée de **l'approche basée sur les charges critiques** permet de prendre en considération ce point. De par les intrants qui alimentent le modèle des charges critiques et l'échelle d'application de la tesselle, ce dernier ne semble pas adapté pour caractériser, à une échelle fine sur le terrain, la sensibilité d'un site. Par contre, il permet d'identifier des tendances régionales et il a été possible de diviser le territoire de la MRC en deux catégories. La première zone concerne quatre secteurs qui sont systématiquement les moins sensibles (ou les plus robustes) à la récolte de la biomasse, qu'il s'agisse de la récolte par arbre entier ou tronc seulement. La seconde correspond au reste de la MRC où le modèle des charges critiques indique un risque plus ou moins important de perte de fertilité du sol, quel que soit le mode de récolte.

La carte combinée de sensibilité à la récolte de la biomasse est présentée à la figure 15. Elle englobe dans un premier temps les secteurs identifiés sensibles selon l'approche basée sur la fertilité. Une zone en orange a été ajoutée par rapport à la figure 8, correspondant à une sensibilité due à un pH inférieur à 4,8 (comparaison avec l'étude de Raulund-Rasmussen *et al*. 2008) qui n'est pas « capturée » par les propriétés physiques du sol. Figure également sur cette carte un risque accru de perte de fertilité (zone hachurée) provenant de l'approche basée sur les charges critiques.

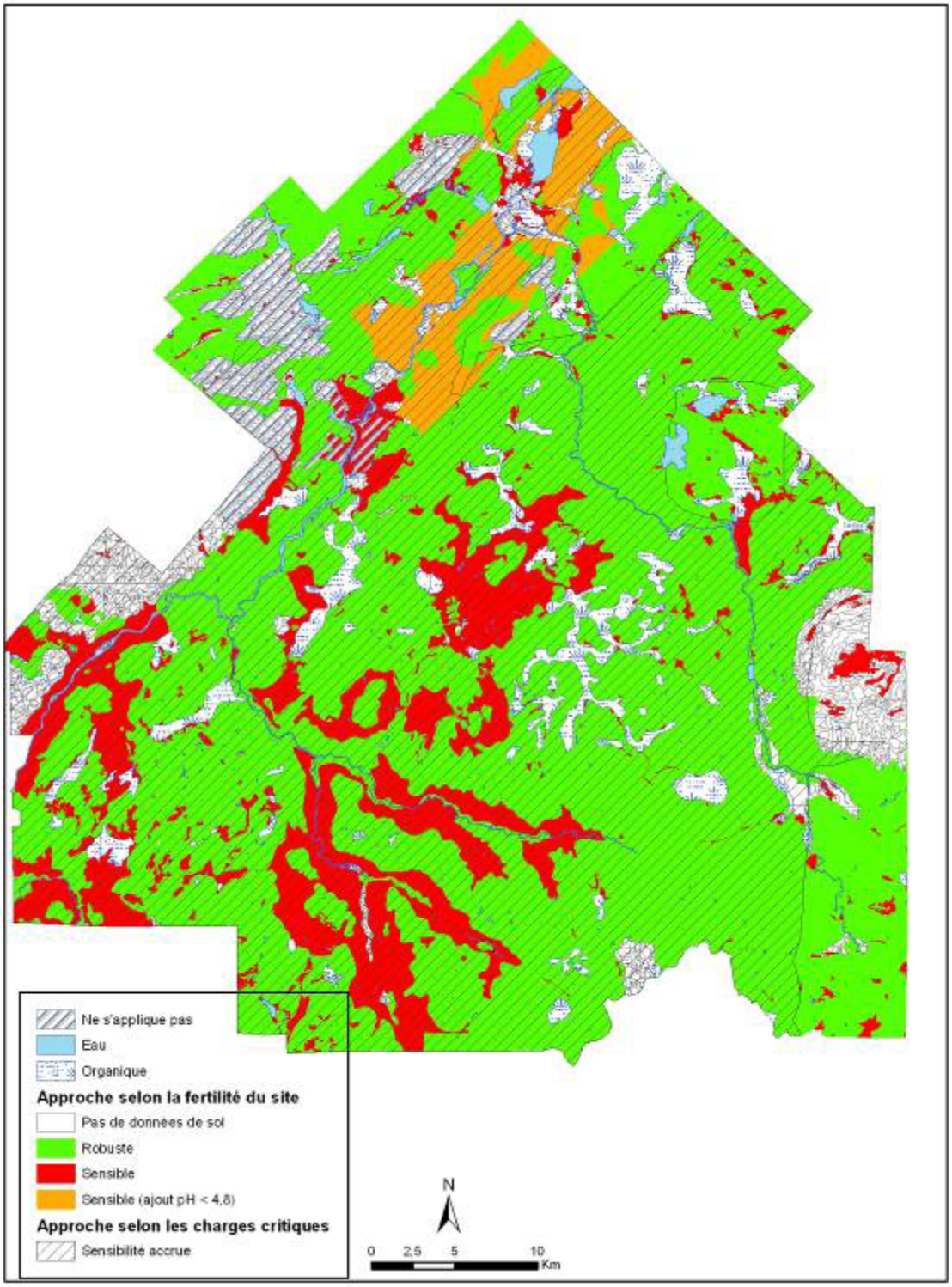


Figure 15. Carte combinée de sensibilité relative à la récolte de la biomasse

RECOMMANDATIONS

1- Marche à suivre pour identifier, sur le terrain, les secteurs les plus sensibles à la récolte de la biomasse :

1- Consulter la carte combinée de sensibilité relative à la récolte de la biomasse. Cette carte permet au propriétaire de vérifier si son lot est situé dans une zone déclarée sensible ou avec un risque accru de perte de fertilité (figure 15).

2- Prendre connaissance des grilles permettant d'évaluer, sur le terrain, les paramètres requis pour déterminer la sensibilité selon l'approche basée sur la fertilité (annexe 2).

3- Appliquer les critères basés sur les propriétés physiques du sol pour déterminer spécifiquement, pour le lot ciblé, la sensibilité relative d'un site à la récolte de la biomasse (section 3.1.2.).

2- Développement d'un guide terrain pour identifier les secteurs les plus sensibles à la récolte de la biomasse :

Il serait intéressant de produire un guide terrain résumant les éléments essentiels de ce rapport, de manière à guider de façon simplifiée le propriétaire forestier dans son exercice d'identification de la sensibilité de ses lots à la récolte de la biomasse.

3- Proposition de mesures de mitigation pour contrer, au moins partiellement, une sensibilité à la récolte de la biomasse :

Plusieurs facteurs peuvent expliquer la présence d'une sensibilité à la récolte de la biomasse. Selon l'approche basée sur la fertilité du site, on peut citer la présence d'un sol très mince, d'une texture particulièrement grossière, d'un pH faible ou encore d'un drainage très mauvais. Des correctifs peuvent être apportés par le propriétaire forestier pour limiter la baisse de fertilité du site déclaré sensible. Ces correctifs varient néanmoins en fonction du facteur considéré. L'apport de fertilisants ou le chaulage pourraient, par exemple, être recommandés en présence d'un pH particulièrement faible. Un effort pour maintenir le plus possible la matière organique en place (limiter la préparation de terrain, par exemple) peut s'avérer intéressant en présence d'un sol de texture grossière.

4- Éclaircissement des différences d'évaluation de la sensibilité d'un site selon les deux approches considérées :

Ce projet a permis une amorce de discussion concernant les résultats produits selon deux approches bien distinctes pour évaluer la sensibilité d'un site à la récolte de la biomasse. Ces approches apportent des résultats souvent divergents. Il serait très intéressant de poursuivre cette discussion, de manière à avoir une meilleure compréhension des raisons pour lesquelles ces deux modèles ne concordent pas.

5- Connaissance plus approfondie des effets réels de la récolte de la biomasse sur la fertilité d'un site, en particulier dans le Québec méridional :

Très peu de données terrain sont disponibles pour comprendre les effets réels de la récolte de la biomasse sur la fertilité d'un site. Quelques dispositifs expérimentaux ont été installés par le Service canadien des forêts, mais aucun d'entre eux n'est localisé dans le Québec méridional (domaines bioclimatiques des érablières). Il serait donc très pertinent d'y favoriser l'installation de dispositifs expérimentaux, particulièrement sur les types écologiques où les approches par fertilité et charges critiques donnent des résultats divergents.

CONCLUSION

Ce projet propose une **approche combinée** pour déterminer la sensibilité d'un site à la récolte de la biomasse. Une première **approche, basée sur la fertilité des sites**, permet de caractériser la sensibilité d'un site à l'échelle du polygone écoforestier, en considérant des critères simples, facilement identifiables sur le terrain. Les différents critères qui ont été retenus sont souvent cités dans la littérature internationale comme ayant une influence importante sur la sensibilité d'un site à la récolte de la biomasse. Ils reposent sur l'épaisseur du sol (sols très minces), le drainage du sol (les sols très mal drainés) et la texture du sol (les textures grossières contenant plus de 70 % de sables). Si la présence de cations dans le sol (Ca et Mg en particulier) semble être également un facteur important à considérer pour l'identification des sites sensibles, il a été montré que ce critère est en bonne partie « capturé » dans les conditions de sols décrites ci-dessus. Une analyse chimique du sol n'est donc pas essentielle pour identifier les sites les plus sensibles.

Une seconde **approche** développée par le MRNF et **basée sur le calcul du dépassement de la charge critique en acidité à court terme** permet de prendre en considération un paramètre qui fait défaut dans l'approche basée uniquement sur les propriétés physico-chimiques du sol, soit l'apport en acidité généré par les précipitations. De par les intrants qui alimentent le modèle des charges critiques et l'échelle d'application de la tesselle, ce dernier ne semble pas adapté pour caractériser, à une échelle fine sur le terrain, la sensibilité d'un site. D'ailleurs, les cartes de sensibilité produites selon les deux approches présentent beaucoup de divergences si l'on considère l'échelle de la tesselle et du polygone écoforestier. Par contre, ce modèle a permis de zoner le territoire de la MRC en deux grandes catégories : la première, qui concerne quatre secteurs qui sont systématiquement les moins sensibles (ou les plus robustes) à la récolte de la biomasse et la seconde, qui correspond au reste de la MRC où le modèle des charges critiques indique un risque plus ou moins important de perte de fertilité du sol.

Une carte de sensibilité combinée a donc été produite et informe le propriétaire forestier du degré de sensibilité relative de son lot à la récolte de la biomasse. Une analyse sur le terrain de l'épaisseur, de la texture et du drainage du sol lui permettra ensuite de préciser l'information cartographique.

Ce projet a permis une amorce de discussion concernant les résultats produits selon deux approches bien distinctes pour évaluer la sensibilité d'un site à la récolte de la biomasse. Comme ces approches apportent des résultats souvent divergents, il serait très intéressant de poursuivre cette discussion, de manière à avoir une meilleure compréhension des raisons pour lesquelles ces deux modèles ne concordent pas.

Enfin, trop peu d'études basées sur des observations terrain sont disponibles pour décrire l'impact de la récolte sur la fertilité du sol, en particulier dans le Québec méridional. Le gouvernement du Québec est en train de produire, pour toutes les régions du Québec, des cartes de sensibilité à la récolte de la biomasse, basées sur le modèle des charges critiques. Cette approche constitue vraisemblablement un outil de planification stratégique intéressant pour le gouvernement, mais ne permet pas de faire un diagnostic terrain guidant les praticiens dans leur choix quant au mode de récolte approprié. Il devient donc urgent de se doter de dispositifs expérimentaux permettant de mesurer les effets réels de différents modes de récolte de la biomasse sur la fertilité du sol, de manière à guider, à une échelle locale, les choix quant aux modes de récolte adaptés à la fertilité de chaque site.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Cacot, E., N. Eiser, F. Charnet, P. Léon, C. Rantien et J. Ranger. 2006. *La récolte raisonnée des rémanents en forêt.* Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. Angers, France. 37 p.

Commission canadienne de pédologie. 1978. *Le système canadien de classification des sols*. Direction de la recherche. Ministère de l'Agriculture du Canada. Publication 1646. 170 p.

Dubois, J. M. M. 1970. *Bassin du ruisseau de Bury, Comté de Compton, Géomorphologie et utilisation du sol*. Mémoire présenté en vue de l'obtention de la maîtrise ès arts (géographie). Département de Géographie. Université de Sherbrooke. 137 p.

EEA. 2006. *How much bioenergy car Europe produce without harming the environment?* Report No 7/2006. European Environment Agency. Copenhagen. Denmark. 67 p.

Gosselin, J., P. Grondin et J.-P. Saucier. 1998. *Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune de l'est*. Direction des inventaires forestiers. Ministère des Ressources naturelle du Québec. 169 p.

Gosselin, J., P. Grondin et J.-P. Saucier. 1999. *Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de l'érablière à tilleul de l'est*. Direction des inventaires forestiers. Ministère des Ressources naturelle du Québec. 184 p.

Landry, B. 1974. *Étude morpho-sédimentologique du bassin de la rivière Eaton supérieure.* Mémoire présenté en vue de l'obtention de la maîtrise ès arts (géographie). Département de Géographie. Université de Sherbrooke. 118 p.

MFRC. 2007. *Biomass harvesting on forest management sites*. In Sustaining Minnesota forest resources : voluntary site-level forest management guidelines for landowners, loggers and resource managers. The Minnesota Forest Resources Council. 42 p.

MRNQ. 1994. *Le point d'observation écologique*. Direction de la gestion des stocks forestiers. 116 p.

MRNQ. 2003. *Guide terrain d'identification du type écologique - région écologique 2c, Coteaux de l'Estrie*. Direction des inventaires forestiers, Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles du Québec. 35 p.

MRNQ. 2005. *Guide terrain d'identification du type écologique - région écologique 3d, Coteaux des basses Appalaches*. Direction des inventaires forestiers, Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles du Québec. 39 p.

Ouimet, R. et L. Duchesne. 2008. *Impact combiné des précipitations acides et du prélèvement de biomasse forestière sur le maintien à long terme de la fertilité des sols : évaluation et cartographie des charges critiques*. Direction de la recherche forestière. Ministère des Ressources naturelle et de la Faune. 38 p.

Raulund-Rasmussen, K., I. Stupak, N. Clarke, I. Callesen, H.-S. Helmisaari, E. Karltun and I. Varnagiryte-Kabasinskiene. 2008. *Effects of very intensive forest biomass harvesting on short and long term site productivity. Chap. 3 in Sustainable use of forest biomass for energy, a synthesis with focus on the Baltic and North region.* D. Röser, A. Asikainen, K. Raulund-Rasmussen and I. Stupak Editors. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 29-70.

Thien, S. J. 1979. *Évaluation de la texture du sol au toucher*. Journal agronomic education. Vol. 8, p. 54.

Thiffault, E., D. Paré, N. Bélanger, A. Munson and F. Marquis. 2006. *Harvesting intensity at clear-felling in the boreal forest : impact on soil and foliar nutrient status.* Soil science society of America journal, 70:691-701.

UK Forestry Commission. *Guidance on site selection for brash removal.* Final Protocol.

ANNEXES

ANNEXE 1.
CRITÈRES ÉVALUANT LA SENSIBILITÉ D'UN SITE À LA RÉCOLTE DE LA BIOMASSE SELON DIFFÉRENTS PAYS/PROVINCES/ÉTATS

Angleterre

Des études menées en Angleterre se basent sur le type de sol pour estimer les risques qui découlent de la récolte par tronc entier (U.K. Forestry Commission). La récolte des résidus devrait en général être évitée sur les sols acides et les sols pauvres.

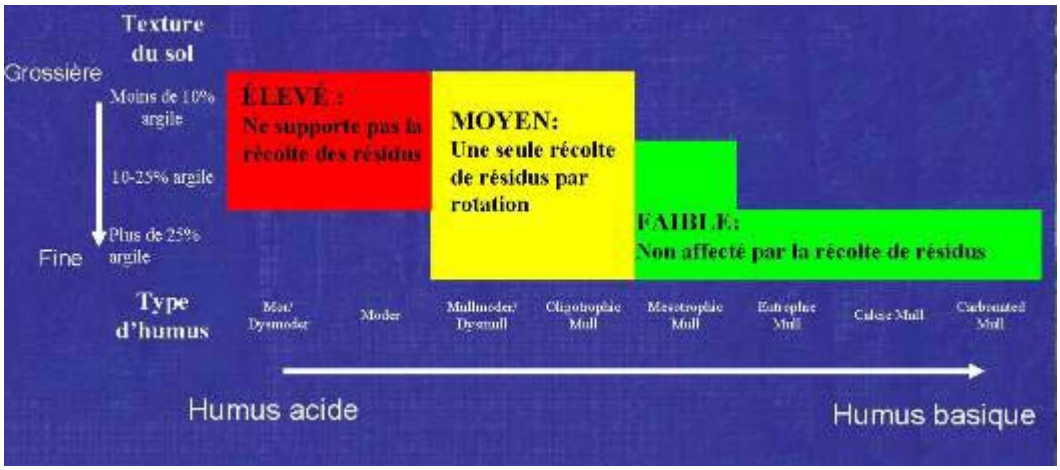
Certains sites présentent des **risques élevés** et ne supportent **pas la récolte des résidus** : on peut citer entre autres les tourbières ombrotrophes et les podzols avec horizons indurés (*Unflushed peatland/bog soils, Molinia bogs (9c-e), Ironpan soils Podzols, Littoral soils, Rankers and Skeletal soils*).

D'autres présentent des **risques modérés** où il est recommandé de **laisser le feuillage sur place** : les brunisols podzoliques (*Podzolic brunisols, Podzolic surface-water gleys, Integrade ironpan soils, Peaty gley soils, Molinia bogs (9a, b)*).

Enfin, les sites présentant des **risques faibles** et qui ne seraient **pas affectés par la récolte des résidus** sont : les brunisols (excepté les types podzoliques), les gleysols, les sols calcaires (*Brunisols (except podzolic type), Surface-water gleys (except podzolic type , Ground-water gleys, Limestone soils, Juncus bogs*)).

France

Selon cette approche diffusée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, les risques découlant de la récolte des résidus sont d'autant plus élevés lorsque la texture du sol est grossière et l'humus acide.



(Tiré de Cacot *et al*. 2006)

Communauté européenne

L'approche développée par l'Agence européenne pour l'environnement est basée sur la saturation en bases et le type de sol.

Un taux de saturation en bases inférieur à 50 % conditionne un niveau de récolte des résidus variant de 0 à 50 % selon le type de sol, alors que la récolte est permise jusqu'à 75 % des résidus lorsque la saturation en bases est supérieure à 50 % (cas des brunisol, chernozem, gleysol, luvisol et vertisol).

Acceptabilité de la récolte de résidus	Hautement adéquat	Modérément adéquat	Marginalement adéquat	Non adéquat
	Le feuillage et les souches sont laissés sur le site en tout temps			
Niveau de récolte des résidus	75%	50%	15%	0%
Saturation en bases du sol	> 50 %	< 50 %	< 50 %	< 50 %
Type de sol	Brunisol, Chernozem, Gleysol, Luvisol, Vertisol	Podzol	Tourbières	Régosol, Solonetz

(Tiré de EEA, 2006)

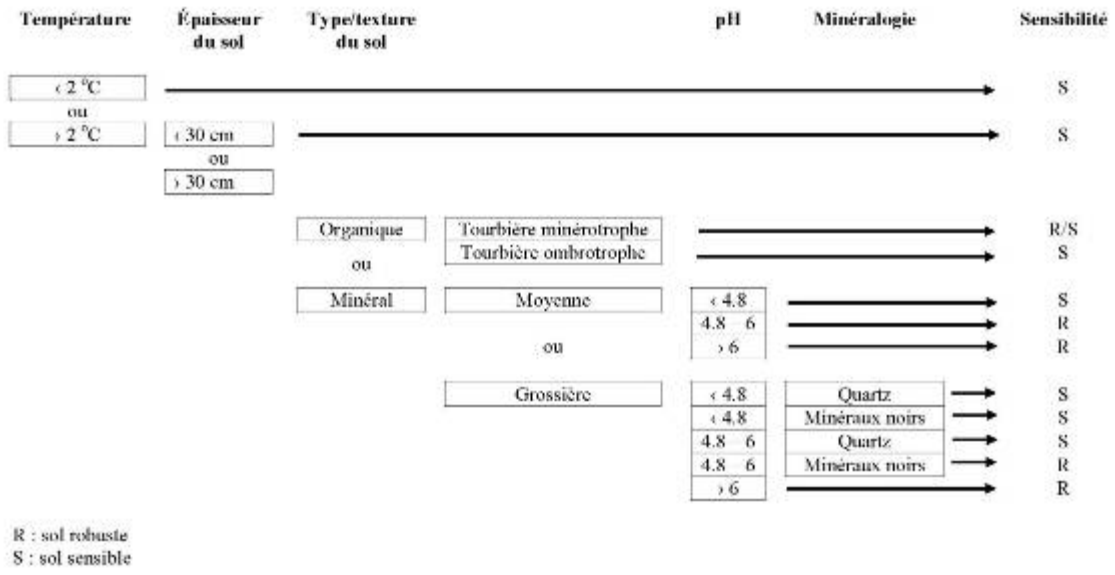
Scandinavie

Une approche développée par des chercheurs finlandais et danois est basée sur plusieurs critères physico-chimiques du sol : l'épaisseur du sol, la texture, le pH et la minéralogie.

Les sols déclarés systématiquement **sensibles** correspondent aux sols de moins de 30 cm d'épaisseur, aux tourbières ombrotrophes, aux sols avec un pH < 4,8 et aux sols de texture grossière avec un pH compris entre 4,8 et 6 et constitués principalement de quartz.

On qualifie de **sensibles** les sols dont la fertilité, et donc la productivité, est affectée suite à l'exportation d'éléments nutritifs contenus dans la biomasse, sous le régime sylvicole en vigueur et sur un horizon de temps pertinent.

Les sols **robustes** voient leur productivité maintenue même s'il y a exportation de la biomasse.



(Tiré de Raulund-Rasmussen *et al.* 2008)

Minnesota

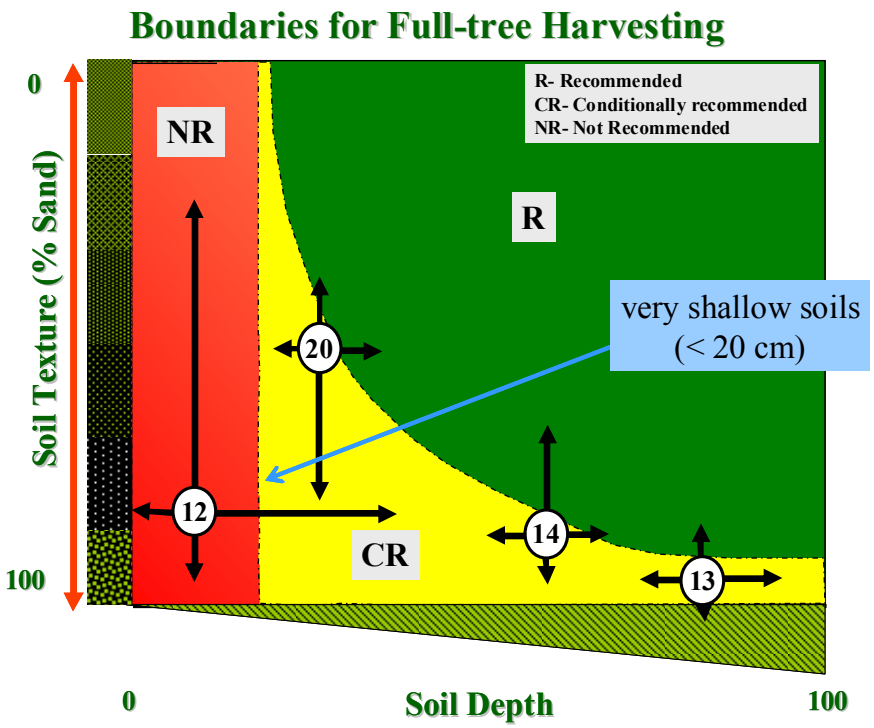
Le Conseil des ressources forestières du Minnesota qualifie **les risques d'élevés** avec une récolte nulle des résidus sur les tourbières et les sols très minces (< 20 cm) avec peupliers et feuillus tolérants.

Les sites de **risques modérés** sont les sables avec un drainage excessif et les sols dont l'épaisseur est comprise entre 20 et 50 cm. Ces critères généraux sont tirés de MFRC (2007).

Ontario

Une approche développée en Ontario est basée sur l'épaisseur et la texture du sol.

La **récolte** par arbre entier n'est **pas recommandée** sur les sols très minces (< 20 cm). Plus la teneur en sable est élevée et que l'épaisseur du sol est mince, plus des mesures restrictives doivent être envisagées pour limiter les risques associés à la récolte des résidus.



(Tiré de D. Morris, Centre for Northern Forest Ecosystem Research, Ontario Ministry of Natural Resource)

Québec

Une approche développée au Service canadien des forêt – Centre de foresterie des Laurentides, basée sur plusieurs expérimentations terrain (Gaspésie, Mauricie et région de Québec) a permis de mettre en évidence l'importance des effets de la récolte par arbre entier sur le sol et de la nutrition des arbres 15 à 20 ans après la récolte (Thiffault *et al.* 2006). L'importance de ces effets dépend principalement des caractéristiques du sol minéral, et plus particulièrement de la concentration en Ca et Mg dans le sol. Les espèces à croissance rapide comme le pin gris (*versus* l'épinette noire ou le sapin baumier) sont également plus sensibles à une baisse de fertilité du site associée à la récolte par arbre entier.

ANNEXE 2.
CLÉS POUR DÉTERMINER LE DRAINAGE ET LA TEXTURE DU SOL SUR LE TERRAIN

Le drainage

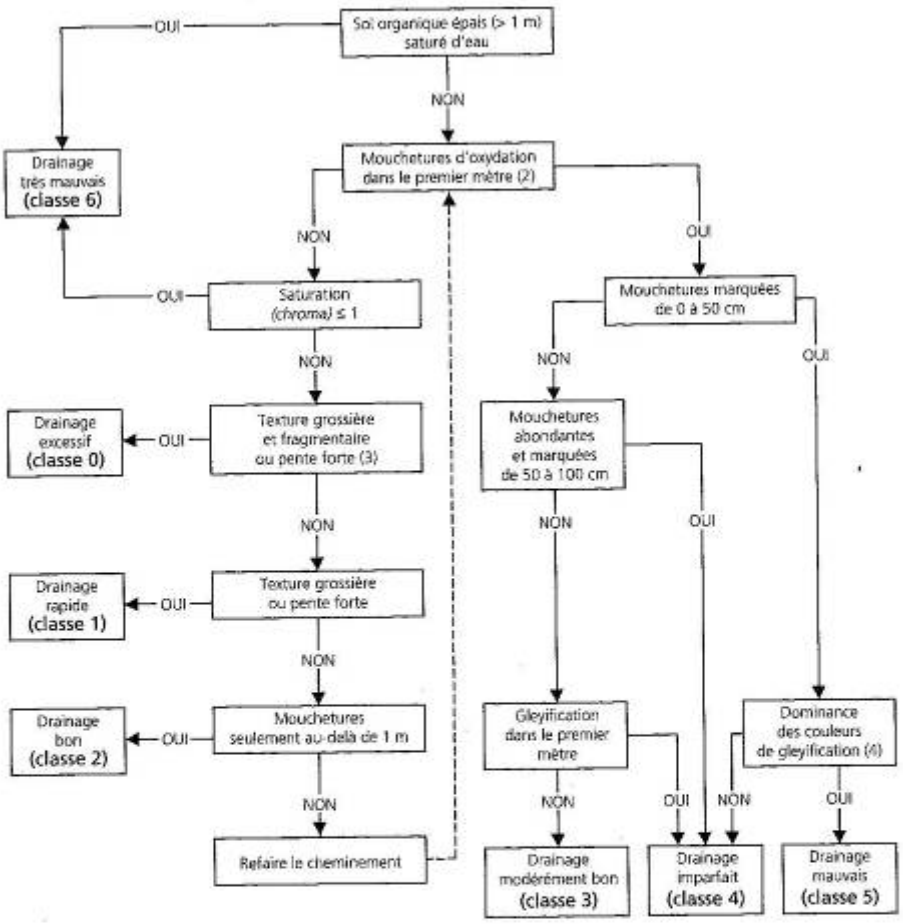
Deux clés sont disponibles pour le diagnostic terrain :

- Une première tirée du *Point d'observation écologique* (MRNF 1994) qui se base sur les caractéristiques du sol.
- Une seconde tirée des guides terrain d'identification des types écologiques qui considère la présence de groupes d'essences indicatrices (la clé diffère selon que l'on se situe dans la région écologique 3d de l'érablière à bouleau jaune ou dans la région 2c de l'érablière à tilleul).

Extrait du *Point d'observation écologique* (MRNQ, 1994)

FIGURE 11

CLÉ SIMPLIFIÉE D'ÉVALUATION DU DRAINAGE [1]



1 Cette clé ne s'applique directement qu'aux sols d'un mètre et plus de profondeur. Dans les sols minces, les mouchetures d'oxydation visibles au contact du roc ne doivent pas être considérées.

2 À l'exclusion des mouchetures peu abondantes et faiblement contrastantes

3 Fragmentaire : pierres, cailloux et graviers entourés d'une quantité de terre fine insuffisante pour remplir les interstices supérieurs à 1mm.
Texture grossière : texture sableuse ou loaneuse renfermant plus de 35 % de fragments grossiers

4 Saturation *(chroma)* : 1 toutes teintes
Saturation *(chroma)* : 2 teintes 10YR et plus rouge
Saturation *(chroma)* : 3 teintes plus jaunes que 10YR
Toutes saturation *(chromas)*, couleurs N, 5Y, 5G, 5BG et 5B (bleu plus marqué que 10Y)
Toutes saturations, couleur rougeâtre (10R)

DRAINAGE EXCESSIF (CLASSE 0) [4]

L'eau du sol

- provient des précipitations et, parfois, du drainage latéral;
- elle disparaît très rapidement;
- la nappe phréatique est absente.

Caractéristiques du dépôt et de la topographie

- dépôt très pierreux, très mince ou roc à nu;
- surtout sur les sites graveleux, les sommets ou les pentes fortes;
- texture allant de grossière à très grossière.

Caractéristiques du sol

- humus généralement mince, sur du roc;
- aucune moucheture sauf, exceptionnellement, au contact du roc (assise rocheuse).

---

4 La présentation des classes de drainage est adaptée de Cauboue *et al.* (1988).

DRAINAGE RAPIDE (CLASSE 1)

L'eau du sol

- provient des précipitations;
- nappe phréatique habituellement absente;
- sols peu absorbants

Caractéristiques du dépôt et de la topographie

- pierrosité forte : graviers, cailloux et pierres représentent de 35 % à 90 % du volume;
- le site se trouve sur des pentes fortes ou des sommets couverts de sol mince;
- on trouve occasionnellement ce type de drainage sur des terrains plats, dans des sols dont la texture varie de sable grossier à très grossier

Caractéristiques du sol

- pas de mouchetures, sauf parfois au contact du roc;
- humus généralement peu épais;

DRAINAGE BON (CLASSE 2)

L'eau du sol

- provient des précipitations;
- l'eau excédentaire se retire facilement, mais lentement;
- nappe phréatique absente du premier mètre

Caractéristiques du dépôt et de la topographie

- dépôt allant de mince à épais;
- texture variable;
- les textures fines se retrouvent généralement dans les pentes;
- on peut trouver ce type de drainage en terrain plat, si la texture du sol est grossière.

Caractéristiques du sol

- absence de mouchetures dans le premier mètre.

DRAINAGE MODÉRÉ (CLASSE 3)

L'eau du sol

- provient des précipitations, surtout dans les sols dont la texture va de moyenne à fine;
- évacuation plutôt lente de l'eau excédentaire;
- la nappe phréatique n'est généralement pas visible dans le profil

Caractéristiques du dépôt et de la topographie

- ce type de drainage est fréquent à la moitié ou au bas des pentes, de même que dans les terrains faiblement inclinés;
- pierrosité variable;
- les textures vont de moyennes à fines

Caractéristiques du sol

- mouchetures visibles seulement à plus de 50 cm de profondeur

DRAINAGE IMPARFAIT (CLASSE 4)

L'eau du sol

- dans les sols à texture fine, elle provient généralement des précipitations;
- dans les sols à texture grossière, elle provient à la fois des précipitations et des eaux souterraines;
- à certaines période de l'année, la nappe phréatique peut descendre à plus de 50 cm de la surface.

Caractéristiques du dépôt et de la topographie

- texture variable;
- terrain plat, au bas des pentes concaves ou dans des dépressions ouvertes.

Caractéristiques du sol

- mouchetures généralement distinctes dans les premiers 50 cm et plus marquées dans les 50 cm qui suivent;
- traces de gleyification souvent visibles dans les horizons B et C.

MAUVAIS DRAINAGE (CLASSE 5)

L'eau du sol

- les eaux du sous-sol s'ajoutent aux précipitations;
- le sol est très humide et l'on observe un excès d'eau pendant toute l'année;
- la nappe phréatique affleure fréquemment.

Caractéristiques du dépôt et de la topographie

- on trouve souvent ce type de drainage en terrain plat ou dans des dépressions concaves;
- texture variable, mais plus souvent fine.

Caractéristiques du sol

- mouchetures marquées dans les 50 premiers centimètres;
- sol fortement gleyifié;
- profil dominé par les processus de réduction;
- humus très souvent épais et présence de sphaignes à la surface.

DRAINAGE TRÈS MAUVAIS (CLASSE 6)

L'eau du sol

- provient de la nappe phréatique. Elle recouvre la surface pendant toute l'année.

Caractéristiques du dépôt et de la topographie

- dépôt très souvent organique.

Caractéristiques du sol

- sol organique (constitué de matière végétale plus ou moins décomposée);
- sol minéral très fortement gleyifié.

Extrait du *Guide terrain d'identification du type écologique - région écologique 2c* (MRNQ, 2005)

Dépôt organique **ou** AUR + SPS + HYS >= 20 % **ou** GRS >= 25 % et pente < 4 %	oui	Drainage hydrique (classes 5 et 6)

Dépôt organique :

- Matière organique bien décomposée (non fibreuse) > 40 cm d'épaisseur (classe 5 et plus selon l'échelle de Von Post[4]) **ou**
- Matière organique mal décomposée (fibreuse) > 60 cm d'épaisseur (classe 1 à 4 selon l'échelle de Von Post[4]).

Le groupe AUR comprend :

- l'aulne rugueux
- l'osmonde royale
- l'osmonde cannelle

Le groupe SPS comprend :

- les sphaignes sp.
- le kalmia à feuilles étroites
- le némopanthe mucroné

Le groupe HYS comprend :

- l'hypne éclatante

Le groupe GRS comprend :

- les graminées sp.
- les saules sp.
- la spirée à larges feuilles
- les carex sp.
- l'onoclée sensible

[4] Échelle de Von Post décrite plus bas.

Extrait du *Guide terrain d'identification du type écologique - région écologique 3d* (MRNQ, 2003)

Dépôt organique **ou** AUR + SPS >= 25 % **ou** GRS >= 15 % et pente < 4 %	oui	Drainage hydrique (classes 5 et 6)

Dépôt organique :

- Matière organique bien décomposée (non fibreuse) > 40 cm d'épaisseur (classe 5 et plus selon l'échelle de Von Post[5]) **ou**
- Matière organique mal décomposée (fibreuse) > 60 cm d'épaisseur (classe 1 à 4 selon l'échelle de Von Post[5]).

Le groupe AUR comprend :

- l'aulne rugueux
- la sphaigne squarreuse
- l'osmonde cannelle

Le groupe SPS comprend :

- les sphaignes sp.
- le némopanthe mucroné

Le groupe GRS comprend :

- les graminées sp.
- les saules sp.
- les carex sp.

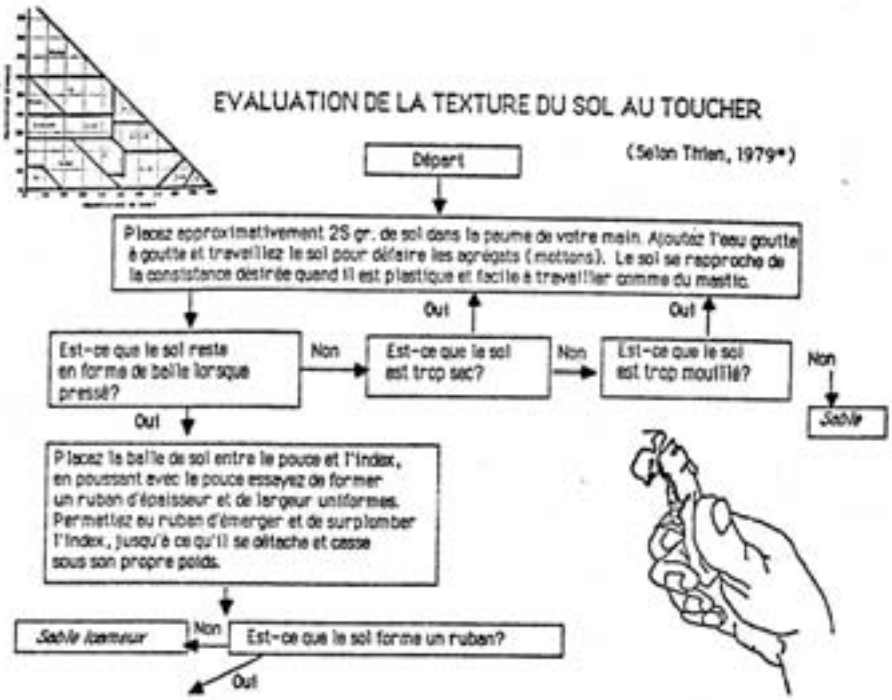
[5] Échelle de Von Post décrite ci-dessous.

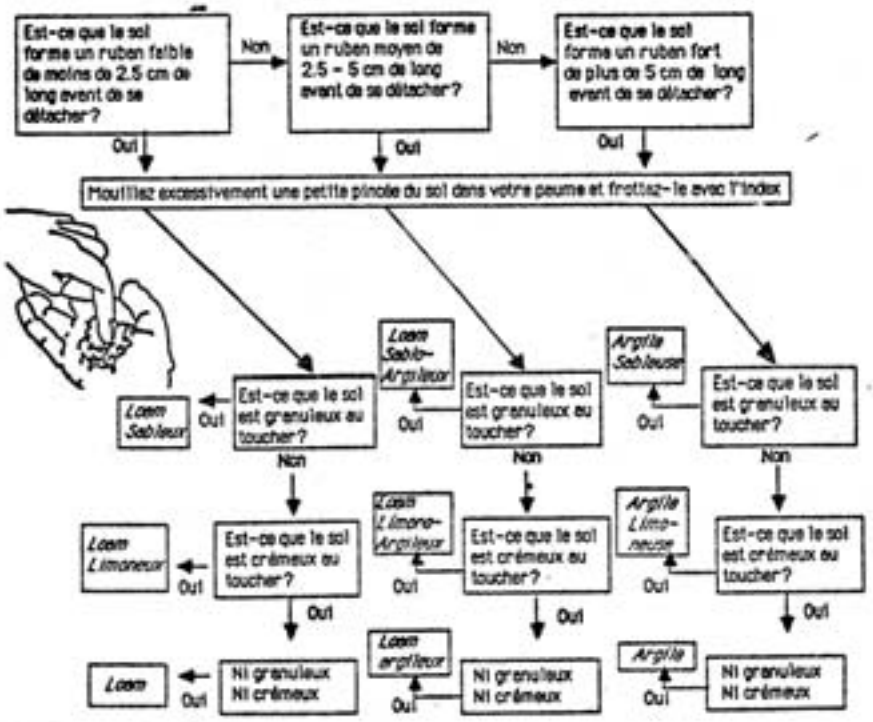
Échelle de Von Post

ÉCHELLE DE DÉCOMPOSITION DE VON POST	
CLASSE	DESCRIPTION
Fibrique	
1	Couche de mousse vivante, qui ne peut être considérée comme de la tourbe
2	Tourbe morte, dont la structure végétale est complète. Solution jaunâtre et claire. L'échantillon est spongieux et élastique; il reprend sa forme après avoir été pressé.
3	Matière végétale très facile à distinguer. Solution jaune renfermant quelques débris végétaux. Coloration plus sombre, bonne élasticité.
4	Matière végétale en voie de décomposition. Solution brun pâle renfermant des débris végétaux. L'échantillon garde parfaitement l'empreinte des doigts entre lesquels aucune tourbe ne s'écoule.
Mésique	
5	Matière végétale amorphe et non structurée. Solution nettement brune. Lorsqu'on presse l'échantillon, il s'en écoule une petite quantité entre les doigts.
6	Plus de la moitié de l'échantillon est décomposée. Solution brun foncé. Lorsqu'on presse l'échantillon, il s'en écoule environ le tiers entre les doigts.
Humique	
7	Impossible de distinguer la matière végétale originale. Lorsqu'on presse légèrement l'échantillon, il s'en écoule un peu de solution très foncée et, quand on le presse plus fortement, on en perd plus de la moitié.
8	Si l'échantillon est pressé délicatement, il ne s'en échappe pas plus des deux tiers.
9	Échantillon très homogène et amorphe, ne renfermant ni racine, ni fibre. Lorsqu'on le presse, on perd presque tout l'échantillon, mais il ne s'en écoule aucune solution.
0	Matière homogène, à consistance gélatineuse. Tout l'échantillon s'échappe lorsqu'on le presse. Ces sols très rares se retrouvent surtout dans de la tourbe sédimentaire.

La texture

Il est proposé de se référer à l'échelle de Thien (1979) pour déterminer la texture du sol. Cette échelle a en effet déjà montré de meilleurs résultats d'identification que la grille proposée par le MRNF dans le *Point d'observation écologique*.


EVALUATION DE LA TEXTURE DU SOL AU TOUCHER
(Selon Thien, 1979*)
Départ
Placez approximativement 25 gr. de sol dans la paume de votre main. Ajoutez l'eau goutte à goutte et travaillez le sol pour défaire les agrégats (mottons). Le sol se rapproche de la consistance désirée quand il est plastique et facile à travailler comme du mastic.
Oui
Oui
Est-ce que le sol reste en forme de belle lorsque pressé?
Non
Est-ce que le sol est trop sec?
Non
Est-ce que le sol est trop mouillé?
Non
Sable
Oui
Placez la belle de sol entre le pouce et l'index, en poussant avec le pouce essayez de former un ruban d'épaisseur et de largeur uniformes. Permettez au ruban d'émerger et de surplomber l'index, jusqu'à ce qu'il se détache et cesse sous son propre poids.
Sable limoneux
Non
Est-ce que le sol forme un ruban?
Oui


Est-ce que le sol forme un ruban faible de moins de 2.5 cm de long avant de se détacher?
Non
Est-ce que le sol forme un ruban moyen de 2.5 - 5 cm de long avant de se détacher?
Non
Est-ce que le sol forme un ruban fort de plus de 5 cm de long avant de se détacher?
Oui
Oui
Oui
Mouillez excessivement une petite pincée du sol dans votre paume et frottez-le avec l'index
Loam Sableux
Oui
Est-ce que le sol est granuleux au toucher?
Non
Loam Sable-Argileux
Oui
Est-ce que le sol est granuleux au toucher?
Non
Argile Sableuse
Oui
Est-ce que le sol est granuleux au toucher?
Non
Loam Limoneux
Oui
Est-ce que le sol est crémeux au toucher?
Oui
Loam Limono-Argileux
Oui
Est-ce que le sol est crémeux au toucher?
Oui
Argile Limo-neuse
Oui
Est-ce que le sol est crémeux au toucher?
Oui
Loam
Oui
Ni granuleux Ni crémeux
Loam argileux
Oui
Ni granuleux Ni crémeux
Argile
Oui
Ni granuleux Ni crémeux

ANNEXE 3.

ESSAI DE DÉTERMINATION DES STATIONS RECONNUES SYSTÉMATIQUEMENT SENSIBLES SELON L'APPROCHE BASÉE SUR LES CHARGES CRITIQUES

Tableau 1 : Pourcentages de tesselles qui appartiennent à chaque classe de sensibilité pour les différentes stations présentes et par sous-région écologique – cas de la récolte par tronc seulement

Sous-région écologique 2c-T				
Types éco	Sites robustes	Sites potentiellement sensibles	Sites sensibles	Nb total de tesselles
MF14	8	40	52	25
FE21	36	18	46	115
RS54	0	100	0	24
MF18	3	97	0	65
RS15	3	97	0	225
RS14	0	96	4	112
MJ25	11	89	0	577
MJ24	1	85	15	162
MJ28	19	81	0	37
MJ15	21	78	0	618
FE25	19	78	4	27
RS18	24	76	0	133
MJ14	2	70	29	56
RS55	49	51	0	67
RS11	50	50	0	26
RS38	69	31	0	39
MJ11	57	27	16	375
FE35	84	16	0	44
RS12	92	8	0	39
FE22	94	6	0	723
RC38	96	4	0	202
MJ21	97	3	0	58
MJ22	97	3	0	103
FE32	99	1	0	582
MJ12	99	1	0	1071
RB12	100	0	0	55
RS52	100	0	0	20

Sous-région écologique 3d-M				
Types éco	Sites robustes	Sites potentiellement sensibles	Sites sensibles	Nb total de tesselles
MJ15	24	76	0	583
FE22	24	75	1	284
MJ25	27	73	0	707
RS18	28	72	0	93
MJ28	33	67	0	94
FE35	38	63	0	112
MJ11	48	52	0	50
RS38	73	27	0	62
RC38	95	5	0	94
RS15	99	1	0	76
MJ12	100	0	0	1095
FE32	100	0	0	1564
MJ22	100	0	0	140
RE38	100	0	0	28
RS55	100	0	0	113

Sous-région écologique 3d-S				
Types éco	Sites robustes	Sites potentiellement sensibles	Sites sensibles	Nb total de tesselles
MJ25	51	49	0	168
MJ15	57	43	0	56
MJ12	88	12	0	176
MJ22	99	1	0	97
MJ20	100	0	0	42
MS20	100	0	0	63