

**ESSAI DE DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE  
CARTOGRAPHIE DU RISQUE DE PRÉSENCE DE  
L'HERBE À POUX (*AMBROSIA ARTEMISIIFOLIA*) AU  
QUÉBEC PAR TÉLÉDÉTECTION**

**PHASES 1 ET 2**

**Rapport R1448**

**23 août 2013**



# ESSAI DE DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DU RISQUE DE PRÉSENCE DE L'HERBE À POUX (*AMBROSIA ARTEMISIIFOLIA*) AU QUÉBEC PAR TÉLÉDÉTECTION

## PHASE 1



Par :

Roland Ngom  
Pierre Gosselin

INRS-ETE  
INSPQ, INRS-ETE

Présenté à :

Ouranos et  
l'Institut national de santé publique

**Rapport R1448**

23 août 2013

Roland Ngom, PhD (INRS ETE)  
Dr. Pierre Gosselin (INSPQ, INRS ETE)

Correspondance:

*INRS ETE*

*490, rue de la Couronne*

*Québec QC, G1K 9A9*

*Tel : 418 654-3849*

@: [roland\\_pierre.ngom@ete.inrs.ca](mailto:roland_pierre.ngom@ete.inrs.ca)

**Note:**

**Toute diffusion publique des éléments de ce rapport doit être faite avec l'assentiment de ses auteurs! Merci pour votre bonne compréhension.**

# TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>2 BREF ÉTAT DE L'ART</b> .....	<b>3</b>
<b>3 ZONES D'ÉTUDE ET DONNÉES</b> .....	<b>5</b>
3.1 L'île de Montréal .....	5
3.2 Salaberry-de-Valleyfield.....	9
<b>4 ANALYSE DES DONNÉES</b> .....	<b>13</b>
4.1 Amélioration et standardisation des données au travers d'un calcul des réflectances .....	13
4.2 Construction des indices de végétation.....	18
4.3 Analyses en Composantes principales des images .....	21
4.4 Essai de séparation d' <i>A. artemisiifolia</i> au travers d'une méthode manuelle .....	22
4.5 Analyses statistiques .....	24
4.6 Précision de la séparabilité par la méthode de la logique floue.....	24
4.7 Tests des performances d'identification d' <i>A. artemisiifolia</i> .....	26
4.8 Essai de standardisation de la méthode .....	26
<b>5 RÉSULTATS ET DISCUSSION</b> .....	<b>27</b>
5.1 La bande verte : un meilleur potentiel discriminant .....	27
5.2 De la difficulté de standardiser une méthode .....	37
<b>6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>39</b>
<b>7 REMERCIEMENTS</b> .....	<b>43</b>
<b>8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>45</b>
<b>9 RESSOURCES INTERNET</b> .....	<b>47</b>
<b>ANNEXE 1 : TABLEAUX DE CORRÉLATIONS</b> .....	<b>49</b>
<b>ANNEXE 2 : PRÉCISION DE LA CLASSIFICATION DE LA VÉGÉTATION</b> .....	<b>51</b>
<b>ANNEXE 3 : PROTOCOLE TERRAIN SALABERRY-DE-VALLEYFIELD</b> .....	<b>53</b>
<b>ANNEXE 4 : PROTOCOLE TERRAIN DE L'ÎLE DE MONTRÉAL</b> .....	<b>57</b>
<b>ESSAI DE DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DU RISQUE DE PRÉSENCE DE L'HERBE À POUX (AMBROSIA ARTEMISIIFOLIA) AU QUÉBEC PAR TÉLÉDÉTECTION - PHASE 2</b> .....	<b>59</b>



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques spatiales et spectrales de Worldview 2 .....	9
Tableau 2	Caractéristiques spatiales et spectrales de Spot 4 .....	9
Tableau 3	Caractéristiques spatiales et spectrales de Rapid Eye .....	12
Tableau 4	Liste des Indices de végétation calculés .....	19
Tableau 5	Performances en pourcentages des variables issues de Worldview 2, significativement et positivement corrélées à la présence d'A. artemisiifolia lorsqu'appliquées aux parcelles cadastrales de l'île de Montréal.....	31
Tableau 6	Performances en pourcentages des variables issues de Worldview 2, significativement et positivement corrélées à la présence d'A. artemisiifolia, lorsqu'appliquées aux points géopositionnés de l'île de Montréal.....	31
Tableau 7	Performances en pourcentages des variables issues de Rapid Eye, significativement et positivement corrélées à la présence d'A. artemisiifolia lorsqu'appliquées aux points géopositionnés de Salaberry-de-Valleyfield .....	34
Tableau 8	Performances en pourcentages des variables issues de Rapid Eye, significativement et positivement corrélées à la présence d'A. artemisiifolia, lorsqu'appliquées aux parcelles cadastrales de l'île de Montréal.....	36
Tableau 9	Performances en pourcentages des variables issues de Spot4, significativement et positivement corrélées à la présence de A. artemisiifolia, lorsqu'appliquées aux points Géopositionnés de l'île de Montréal.....	36
Tableau 10	Performances en pourcentages des bandes vertes issues de Spot4 et Worldview 2, utilisant les valeurs issues de Rapid Eye (Considérées comme standards). .....	38
Tableau 11	Corrélations des variables importantes de Worldview 2 (île de Montréal).....	49
Tableau 12	Corrélations des variables importantes de Rapid Eye (Salaberry-de-Valleyfield) .....	50
Tableau 13	Corrélations des variables importantes de Spot 4 (île de Montréal).....	50
Tableau 14	Précision de la classification des images Worldview 2 (île de Montréal).....	51
Tableau 15	Précision de la classification des images Rapid Eye (Salaberry-de-Valleyfield) .....	51





## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Présentation des données terrain de l'île Montréal.....	7
Figure 2	L'île de Montréal: Représentativité des types d'objets contenant ou adjacents des points mesurés.....	8
Figure 3	Présentation des données terrain de Salaberry-de-Valleyfield .....	10
Figure 4	Représentativité des types d'habitat contenant les points mesurés.....	11
Figure 5	Le signal reçu par les capteurs opérant dans le domaine spectral de l'émission solaire est sujet à des modifications dues à l'environnement et à l'atmosphère (Tanré et coll., 1986).....	14
Figure 6	Les angles sont importants pour l'étalonnage et la correction des effets atmosphériques (Tanré et coll., 1986).....	15
Figure 7	Test de la qualité des corrections atmosphériques, échantillons pour Rapid Eye (a), Spot 4 (b) et Worldview 2 (c) .....	17
Figure 8	Mélange de la réponse spectrale au niveau du capteur satellitaire ou aéroporté en milieu urbain (Bannari et coll. 1997) .....	20
Figure 9	Profils du sol : exemples de courbes de régressions pour le calcul des indices de végétation intégrant la bande rouge et le proche Infrarouge (a), le point d'inflexion rouge et le proche Infrarouge (b).....	21
Figure 10	Segmentation et classification des images WorldView 2 de l'île de Montréal.....	23
Figure 11	Échantillonnage de l'herbe à poux par méthode visuelle et utilisant une classification objet orientée .....	23
Figure 12	Exemples d'échantillons obtenus décrivant le chevauchement entre <i>A. artemisiifolia</i> (en noir) et la végétation dégradée (en bleu) pour les images Rapid Eye de Salaberry-de-Valleyfield.....	24
Figure 13	Fonction d'appartenance à croissance monotone (Ngom et coll., 2011).....	25
Figure 14	Analyse du degré de croisement entre <i>A. artemisiifolia</i> (en noir) et la végétation perturbée (en bleu) : (a) Bande rouge Rapid Eye; (b) Bande proche infrarouge Rapid Eye; (c) Composante 3 de l'analyse ACP de Wordlview 2; (d) Bande proche infrarouge 1 Wordlview 2; (e) Bande proche infrarouge 2 Wv2 ;(f) Weighed Difference Vegetation Index (WDVI) de Wordlview 2; (g) Bande point d'inflexion rouge de Wordlview 2.....	28
Figure 15	Réflectances moyennes de l'ambrosie sur l'île de Montréal d'après les images Worldview 2.....	29
Figure 16	Réflectances moyennes de l'ambrosie à Salaberry-de-Valleyfield d'après les images Rapid Eye .....	30
Figure 17	Réflectance comparée de l'ambrosie des champs de cultures hongrois d'après les images Worldview 2 (Nàdo et coll., 2011) .....	30

Figure 18	(a) Carte de prédiction d'A. artemisiifolia selon la composante 3 de l'Analyse en Composante Principale de Worldview 2 de l'île de Montréal, (b) Zoom sur la zone nord Est.....	32
Figure 19	Carte de prédiction d'A. artemisiifolia selon la bande verte de Worldview 2 à l'île de Montréal.....	33
Figure 20	Carte de prédiction d'A. artemisiifolia selon la bande verte de Rapid Eye à Salaberry-de-Valleyfield.....	35
Figure 21	Carte de prédiction d'A. artemisiifolia selon la bande verte de Spot 4 de l'île de Montréal.....	37
Figure 22	Étapes proposées pour une approche plus opérationnelle de validation de la prédiction de l'herbe à poux .....	40

# 1 INTRODUCTION

L'Ambroisie, *Ambrosia artemisiifolia* est une plante responsable d'allergies respiratoires dues à son pollen. Cette plante semble s'être développée de façon significative au Québec (Basset et Crompton, 1975), au point de constituer un véritable problème de santé publique (Simard et Benoit, 2010), comme peuvent en témoigner les multiples campagnes d'éradication de cette herbe. Dans un contexte de changements climatiques, les effets de cette herbe envahissante sur la santé des populations pourraient s'étendre de façon considérable à des zones moins infestées du Québec. Dans ce contexte, il devient urgent de développer une méthode de détection d'*A. artemisiifolia* à une échelle spatiale étendue au niveau du Québec. Cette méthode viendrait en complément aux méthodes terrain actuellement utilisées par les services municipaux pour la détection et l'élimination d'*A. artemisiifolia*.

Ce rapport porte précisément sur l'essai de développement d'une méthode de détection de l'ambroisie au Québec, basée sur l'utilisation des méthodes et outils de la télédétection. Le rapport commence par dresser un rapide état de l'art de cette question, en se référant notamment à des études menées dans ce sens en Europe. Cette partie essaye de présenter les écueils de l'application d'une telle méthode dans le contexte québécois, tout en se référant à des travaux plus ou moins techniques. La troisième partie du rapport, beaucoup plus technique, vient ensuite décrire l'approche méthodologique développée, avec entre autres l'objectif de standardiser une approche pour la télédétection d'*A. artemisiifolia* au Québec. Cette partie décrit également les écueils conceptuels et techniques pouvant permettre d'aboutir à une démarche robuste. En dernière partie sont présentés les résultats et de possibles perspectives de développement et opérationnalisation futurs de cette étude.



## 2 BREF ÉTAT DE L'ART

Il n'y a à notre connaissance aucune étude spécifiquement dédiée à la détermination du spectre radiométrique de l'herbe à poux au Québec et utilisant un panel varié de données optiques. Maupin et Apparicio (2004) ont mené une étude d'*A. artemisiifolia* sur la ville de Montréal. Ils ont intégré des facteurs sociodémographiques issus des données du recensement général, ainsi qu'une classification de l'occupation du sol. Ils ont également introduit un index de végétation en l'occurrence le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obtenu à partir d'une image Landsat de la ville de Montréal. Leurs résultats ont montré une faible fréquence de l'association entre le NDVI et *A. artemisiifolia*. Quoiqu'intéressante soit leur approche, les résultats sont présentés à une résolution spatiale pas très fine et n'indiquent pas une caractérisation du spectre radiométrique de l'ambrosie. Maupin et Boivin (2001) ont mené une étude sur la reconnaissance d'*A. artemisiifolia* dans l'île de Montréal à l'aide d'un capteur hyperspectral. Ils préconisent d'utiliser la longueur d'onde entre 750 et 875 nm.

Il existe une pléiade d'études à caractère biologique et écologique de l'herbe à poux au Canada et au Québec spécifiquement. Nous n'avons pas la prétention d'en faire un résumé dans ce rapport. Il est toutefois noté que cette herbe est particulièrement présente au Québec et dans l'Ontario (Basset et Crompton, 1975). Il n'est pas non plus question dans ce rapport d'aborder les aspects santé publique liés à la dissémination du pollen de l'herbe à poux. Nous nous contenterons d'évoquer certaines études spécifiques faites au Québec et dont une partie se recoupe à notre projet au niveau des données terrain. Simard et Benoit (2010) ont travaillé sur la répartition de l'herbe à poux à Salaberry-de-Valleyfield et St-Jean-Sur-Richelieu. Cette étude s'est focalisée sur les aspects beaucoup plus ruraux (Champs et cultures) de la présence de l'herbe à poux. Les auteurs ont cependant conclu que la densité de l'herbe à poux était plus forte le long des bords de route, particulièrement à Salaberry-de-Valleyfield et plus faibles dans les bords de champs et dans les champs. En général l'application des herbicides semblait favoriser la présence d'*A. artemisiifolia dans les champs*. Il est suggéré que les bords de route sont des foyers potentiels de propagation dans les champs. Ces conclusions sont en adéquation avec celles de Joly et coll. (2011). Ces auteurs ont examiné l'impact du type de route sur l'extension des plantes invasives dans le Québec agricole. *A. artemisiifolia* a été répertoriée le long de 97% des routes régionales pavées et 81 % des routes locales pavées. Seulement 13% des routes non pavées étaient colonisées par la plante.

Auda et coll. (2008<sup>a</sup>, 2008<sup>b</sup>) peuvent être considérés comme des pionniers en France, pour ce qui est des méthodes de télédétection visant à cartographier l'herbe à poux. En effet, ils ont mené des études sur l'herbe à poux dans le milieu rural de l'Est de la France, notamment dans l'Isère. Ils ont défini des limites biologiques, écologiques, spatiales et spectrales à la télédétection des plantes envahissantes en général. Ils pensent que la concordance entre la date d'acquisition de l'image et un stade phénologique particulier de la plante est primordiale. D'après eux, la mi-juillet à la mi-août est la période adéquate pour réaliser des relevés de terrain. Ils concluent que pendant cette période l'absorption de l'herbe à poux en particulier dans le rouge (660nm) est beaucoup plus importante que celle d'une pelouse non arrosée (Auda et coll., 2008<sup>a</sup>). Ils remarquent également que le sol nu favorise la présence d'*A. artemisiifolia* et que certaines cultures telles que le tournesol et le colza sont plus infestées que d'autres. Ils ont également analysé l'utilisation des fenêtres mobiles multi temporelles avec capteurs à angle de visée constante et faible répétitivité. Ils en concluent que le pourcentage de pixels bien classés évolue proportionnellement avec l'apport croissant des acquisitions successives (Auda et coll., 2008<sup>b</sup>).

Depuis 2005 des groupes de recherche hongrois (Nádor et coll. 2011) en collaboration avec le ministère hongrois de l'agriculture ont également mené des travaux visant à cartographier la présence de l'herbe à poux en Hongrie, avec un objectif opérationnel. Ils ont utilisé différents capteurs à haute et moyenne résolution. Ils ont notamment utilisé WorldView 2 (Wv2) pour la détection d'*A. artemisiifolia* dans les champs de cultures. Après analyse, ils ont estimé que la résolution spatiale de Wv2 est suffisante pour identifier les parcelles de cultures infestées. Ils pensent que cette résolution permettrait également d'identifier l'hétérogénéité de la plante elle-même. Ils estiment que la bande bleue, la bande jaune et la bande proche infrarouge 1 aideraient à identifier l'herbe à poux dans les champs de céréales, et que la bande bleue, la bande jaune et la bande point d'inflexion rouge (Red Edge) aideraient à identifier cette plante dans les parcelles de soja.

### **3 ZONES D'ÉTUDE ET DONNÉES**

Le support spatial de cette étude renvoie à deux zones distinctes: l'île de Montréal et Salaberry-de-Valleyfield. Cette restriction est un choix contraint, tout simplement parce qu'il se trouve que ces zones ont fait l'objet de mesures sur le terrain avec pour objectif de repérer et localiser l'herbe à poux, et que les images satellites correspondant au moins à un intervalle de 3 mois autour de la date de collecte des données terrain n'étaient disponibles que pour ces zones-là. Le contenu final des données recueillies en termes de type et qualité de variables produites varie cependant d'une ville à une autre. L'espace précis autour des zones terrain a été défini par la disponibilité des images satellites. Dans les deux cas, des mesures au GPS ont été effectuées pour produire des points localisant l'herbe à poux. Étant donné que la précision des mesures GPS peut être influencée par plusieurs facteurs (type de GPS, présence des bâtiments, visibilité, altitude dans le ciel, angle de vision des satellites, etc.), il est entendu que des erreurs de mesures sont probables dans ce type d'exercice. Si l'on considère que c'est précisément la localisation de la végétation qui est utile, il devient raisonnable de réduire les erreurs de mesures en supprimant tous les points ne correspondant pas visuellement à de la végétation. Ceci a été fait ici pour toutes les bases de données vecteurs de types points. Il est important de préciser que ces campagnes de mesures ont été faites indépendamment de l'idée de les coupler à des images satellites. La conséquence en est que les dates des images satellites ne coïncident pas toujours avec extrême exactitude aux dates des relevés terrain, ce qui en toute logique aurait été très souhaitable.

#### **3.1 L'île de Montréal**

La campagne de mesure de l'herbe à poux sur l'île de Montréal s'est faite entre le 14 septembre et le 15 octobre 2010 (après pollinisation). La localisation de l'herbe à poux sur l'île de Montréal s'est traduite par la production de deux types de données : des points et des polygones correspondant à des relevés cadastraux (figure 1). Sur un total de 292 points, seulement 186 ont été finalement retenus et exploités pour les analyses.

Ces points indiquaient tous la présence de l'herbe à poux. Les variables clés produites sont les suivantes pour les points :

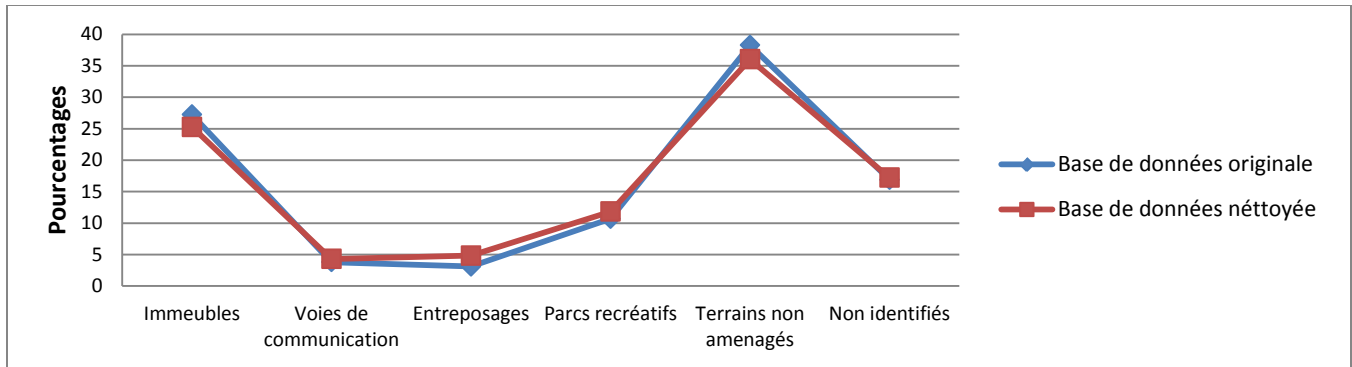
- Superficie des colonies d'herbe à poux dans la zone
- Densité des colonies d'herbe à poux dans la zone
- Sociabilité (plants isolés ou en colonies)
- Hauteur moyenne des plants, en centimètres
- Superficie d'herbe à poux dans la zone
- Pente donnée en pourcentage
- Type d'objet le plus proche

L'information indiquant le type d'objet aux alentours des points mesurés a été réduite et définie en 5 classes. Une hiérarchisation de leur représentativité montre que les immeubles et les terrains non aménagés restent majoritaires, tandis que les voies de communication constituent la variable la moins représentée. On note aussi cependant une présence certaine dans les parcs récréatifs (figure 2).





Figure 1 Présentation des données terrain de l'île Montréal



**Figure 2 L'île de Montréal: Représentativité des types d'objets contenant ou adjacents des points mesurés**

Les variables clés associées aux polygones sont les suivantes :

- Catégorie de l'utilisation du sol (type de bâtiments, parc, etc.)
- Superficie de l'herbe à poux
- Degré d'infestation de l'herbe à poux

Le degré d'infestation varie en fonction du nombre de plants identifiés dans la parcelle cadastrale. Lorsqu'elle est à 0, c'est qu'aucun plant d'herbe à poux n'a été identifié sur ce terrain.

Pour ce qui est des données de télédétection, deux types de produits ont été utilisés pour l'île de Montréal: Des images Spot 4 HRVI (Haute Résolution Visible et Infra-Rouge) et des images Wv2. Il s'agit ici d'une approche exploratoire. L'un des objectifs avoués se trouve dans le fait de considérer une comparaison des résultats obtenus à partir d'images à très haute résolution et ceux obtenus à partir d'images à résolution moyenne. L'objectif ultime étant d'opérationnaliser les résultats tout en considérant le facteur optimisation des ressources. C'est en ce sens que les images Spot 4 pourraient constituer une alternative. Il se trouve également que les dates des images Wv2 (figure 1) et Spot 4 sélectionnées n'étaient pas très éloignées de la date de collecte des données terrain, elles ont été toutes les deux prises le 1<sup>er</sup> septembre 2010. Les caractéristiques des images sont présentées dans le tableau 1 et le tableau 2. Wv2 offre une excellente adéquation entre haute résolution spatiale (1.8 m en multi spectral et 0.5 m en mode panchromatique) et spectrales avec quatre nouvelles bandes additionnelles que sont la bande côtière, le jaune, le point d'inflexion rouge et le proche infrarouge 2 (tableau 1).

**Tableau 1 Caractéristiques spatiales et spectrales de Worldview 2**

<b>Bandes</b>	<b>Résolution spectrale (nm)</b>	<b>Résolution spatiale (m)</b>
Bande 1 (Côtière)	400-450	1.8
Bande 2 (Bleu)	450-510	1.8
Bande 3 (Vert)	510-580	1.8
Bande 4 (Rouge)	630-690	1.8
Bande 5 (Point d'inflexion rouge)	705-745	1.8
Bande 6 (Jaune)	585-625	1.8
Bande 8 (Proche infrarouge 1)	770-895	1.8
Bande 8 (Proche infrarouge 2)	860-1040	1.8
Bande Panchromatique	450-800	0.5

**Tableau 2 Caractéristiques spatiales et spectrales de Spot 4**

<b>Bandes</b>	<b>Résolution spectrale (nm)</b>	<b>Résolution spatiale (m)</b>
Bande 1 (Vert)	500-559	20
Bande 2 (Rouge)	661-668	20
Bande 3 (Proche Infrarouge)	780-890	20
Bande 4 (Moyen infrarouge)	1580-1750	20
Bande Panchromatique	610-680	10

### **3.2 Salaberry-de-Valleyfield**

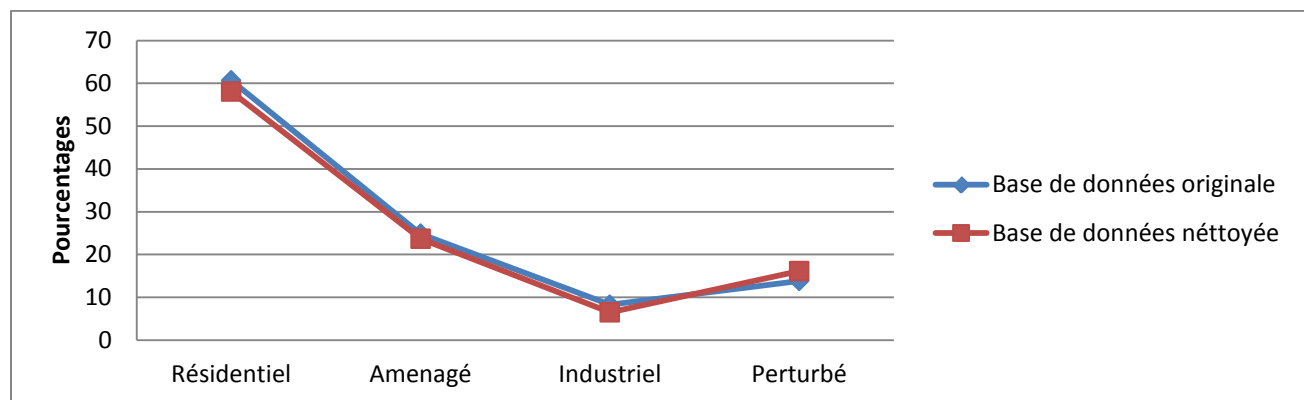
Nous disposons de données de mesures terrain effectuées à Salaberry-de-Valleyfield pour les périodes estivales des années 2007 à 2010. Cependant le produit accessible dont les dates de prises d'images se rapprochaient le plus des dates des campagnes terrain était Rapid Eye, avec des images faites le 24 juin 2009 (figure 3).





Figure 3 Présentation des données terrain de Salaberry-de-Valleyfield

La campagne de mesure terrain avait été effectuée entre le 23 juin et le 28 juillet 2009. Les objectifs initiaux de cette campagne terrain consistaient à caractériser les habitats les plus propices à l'établissement et à la croissance de l'herbe à poux en ville. La ville de Valleyfield avait été divisée en 13 secteurs de 1,5 km<sup>2</sup> chacun (voir annexe 3). Un minimum de 2 des 4 types d'habitats représentés dans la figure 4 devaient être présents. Dans la figure 4, on peut très facilement réaliser que les zones résidentielles sont très largement représentées. Contrairement à l'île de Montréal, la géométrie des données terrain correspondait uniquement à des points mesurés au GPS, et les objets géométriques polygonaux n'existaient donc pas. Sur un total de 311 points mesurés, et suite à la correction des erreurs visibles de positionnement GPS, nous avons finalement travaillé avec 193 points. Sur ces 193 points censés localiser au moins la présence de la végétation, 79 seulement identifiaient la présence d'*A. artemisiifolia*.



**Figure 4 Représentativité des types d'habitat contenant les points mesurés**

Les données Rapid Eye (5 m de résolution spatiale) constituent un bon rapport qualité-prix et pourraient ainsi être un substitut intéressant aux données à résolution spatiale plus fine. Au vu de la coïncidence des dates avec les données terrain, les images Rapid Eye acquises (figure 3 et tableau 3) ont été considérées comme étant celles devant probablement permettre une meilleure caractérisation de l'herbe à poux à Salaberry-de-Valleyfield. Cependant, des images Spot 4 datant du 1<sup>er</sup> septembre 2009 ont également été considérées dans la caractérisation de l'herbe à poux dans cette région.

**Tableau 3**    **Caractéristiques spatiales et spectrales de Rapid Eye**

<b>Bandes</b>	<b>Résolution spatiale (m)</b>	<b>Résolution spatiale (m)</b>
Bande 1 (Bleue)	440-510	5
Bande 2 (Vert)	520-590	5
Bande 3 (Rouge)	630-685	5
Bande 4 (Point d'inflexion rouge)	690-730	5
Bande 5 (Proche infrarouge)	760-850	5

## 4 ANALYSE DES DONNÉES

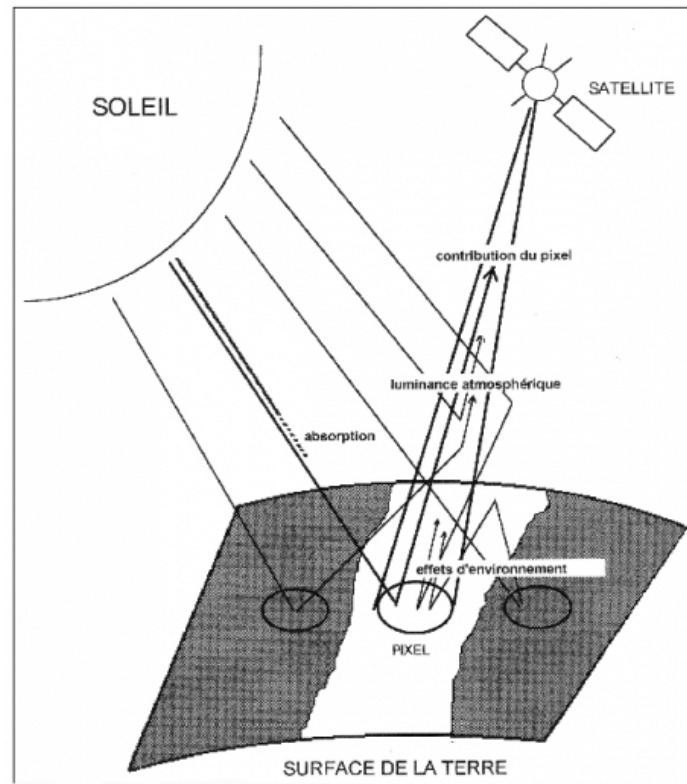
Il est important de souligner une fois de plus que cette étude est exploratoire. Dans ce contexte, nous avons développé des méthodologies plutôt qu'une méthodologie. Le choix même de divers supports spatiaux et d'images satellites différentes rentre dans cette logique. Il s'agissait en priorité d'avoir un éventail de variables assez large et varié pouvant aider à isoler les caractéristiques radiométriques d'*A. artemisiifolia*. Cependant, et au risque d'entrer en contradiction avec le dernier postulat, nous avons conscience de la nécessité de pouvoir rendre opérationnel les résultats de cette exploration, d'où le souci de standardiser les résultats obtenus.

Un éventail de trois groupes de variables a été utilisé: les bandes d'images de divers types, une liste étendue d'indices de végétation et des variables dérivées regroupant des informations pertinentes en une seule bande (Analyses en Composantes Principales). L'exploitation de ces variables s'est faite sur la base de deux méthodes générales: une méthode statistique utilisant les échantillons terrains pour établir une éventuelle corrélation avec les variables construites, et une méthode plus manuelle utilisant des échantillons d'*A. artemisiifolia* de façon visuelle pour essayer de caractériser son spectre radiométrique des autres types de végétation. L'essai de standardisation d'une méthode a ensuite été fait sur la base des résultats produits par ces deux méthodes. Toujours dans cette logique de standardisation et en tant qu'étape préliminaire à l'analyse des images, une transformation des unités de mesure brutes des images vers une unité de mesure relative a été appliquée à toutes les images.

### 4.1 Amélioration et standardisation des données au travers d'un calcul des réflectances

Toutes les images satellites obtenues avaient été préalablement géoréférencées et ortho rectifiées. Un challenge important de cette étude consistait à obtenir une information robuste qui soit reproductible et extrapolable. Dans cette optique, la correction atmosphérique qui a été appliquée à chaque image de tous les produits a une importance capitale. En l'occurrence il s'agissait de rendre les données de différentes sources comparables et donc ainsi, d'établir une échelle de valeurs relatives permettant une comparaison. En effet, les images brutes à notre disposition différaient considérablement les unes des autres en termes de comptes numériques.

Même si un simple ré-échantillonnage numérique peut transformer le codage numérique de Wv2 et Rapid Eye (11 bits et 12 bits respectivement) et le faire correspondre à celui des images Spot 4 (8 bits), cette méthode pourrait considérablement altérer la qualité des images, en plus de ne pas aider à corriger les effets atmosphériques (figure 5). Il est en effet présumé que les conditions atmosphériques ne sont pas semblables d'une date à une autre et d'un lieu à un autre. L'atmosphère des régions urbano-industrielles contient divers gaz et beaucoup de poussières. Avec la correction atmosphérique appliquée aux images, il y a un réel potentiel de pouvoir substituer des données issues de capteurs et de plateformes différents. De plus le calcul de certains indices de végétation exige des valeurs de réflectance plutôt que des données radiométriques brutes.



(Source : Tanné et al., 1986).

Figure 5 Le signal reçu par les capteurs opérant dans le domaine spectral de l'émission solaire est sujet à des modifications dues à l'environnement et à l'atmosphère (Tanné et coll., 1986).



La correction atmosphérique va transformer des données radiométriques brutes en réflectances. La méthode  $\cos(t)$  (Chavez, 1996) a été utilisée pour appliquer une correction atmosphérique à toutes les images. Cette méthode tient compte des variations des coordonnées solaires en fonction de la date et du temps auxquels l'image a été prise. Elle incorpore une procédure permettant d'estimer les effets d'absorption des gaz atmosphériques et la diffusion de Rayleigh, en plus d'améliorer la qualité de l'image. Les données numériques des images brutes sont préalablement converties en radiances exprimées en  $\text{mWcm}^{-2}.\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ . Ces calculs ont été faits en utilisant les valeurs de gain et offset contenues dans les métadonnées des images. L'offset est une composante additive de la transformation linéaire entre les valeurs digitales des images brutes et les radiances. Le gain est une composante multiplicative de la transformation linéaire entre les valeurs digitales des images brutes et les radiances. En plus des valeurs radiatives, les modèles intègrent également l'angle de vue du capteur (figure 6), la date et le temps UTC (Temps Universel Coordonné) de la prise de chaque image, la longueur d'onde centrale en micro mètres de chaque bande des images intégrées, des valeurs digitales de matières ayant une réflectance égale ou proche de zéro (eaux claires profondes issues des images). L'élévation angulaire du soleil à partir de l'horizon au moment où les images ont été prises (figure 6), l'irradiance spectrale solaire, calculée à partir de la longueur d'onde centrale de la bande et du temps de la prise d'image.

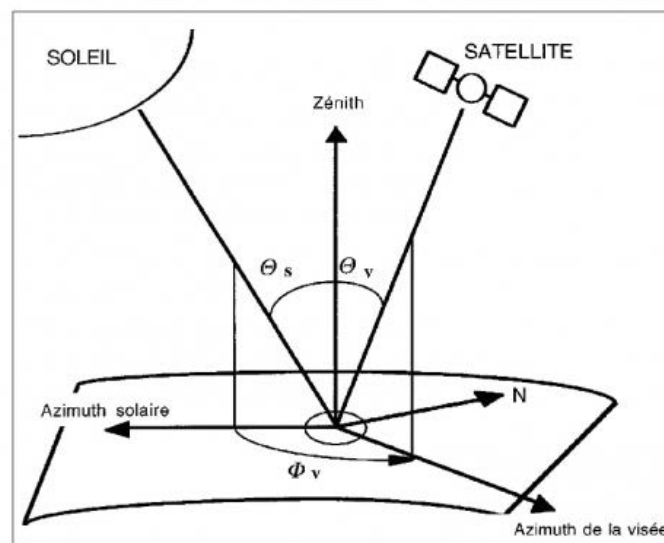


Figure 6 Les angles sont importants pour l'étalonnage et la correction des effets atmosphériques (Tanré et coll., 1986).

Le résultat consiste en des images avec des réflectances proportionnelles dont la valeur varie entre 0 et 1. La qualité de la correction de chaque bande a été évaluée au travers d'une régression linéaire entre les données brutes et les données corrigées (figures 7a, 7b et 7c). De plus des tests ultérieurs ont été faits sur la base d'une comparaison des corrélations entre les variables créées et les bandes corrigées d'une part, et entre les variables créées et les données brutes d'autre part.

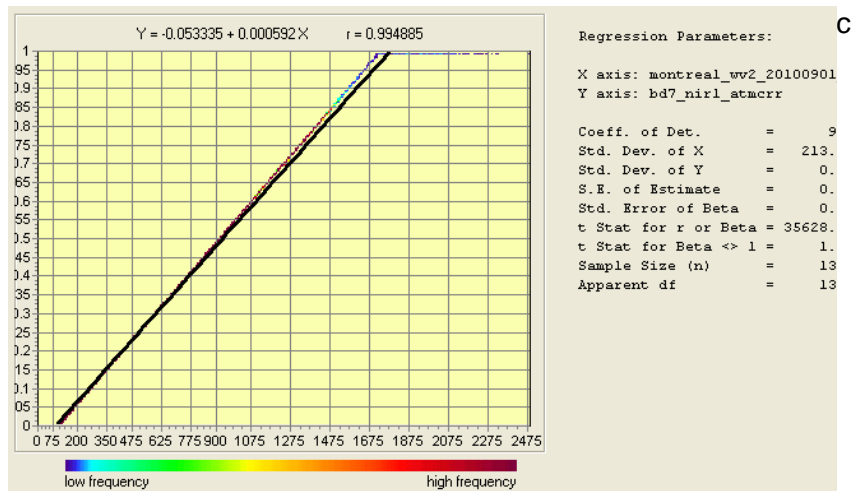
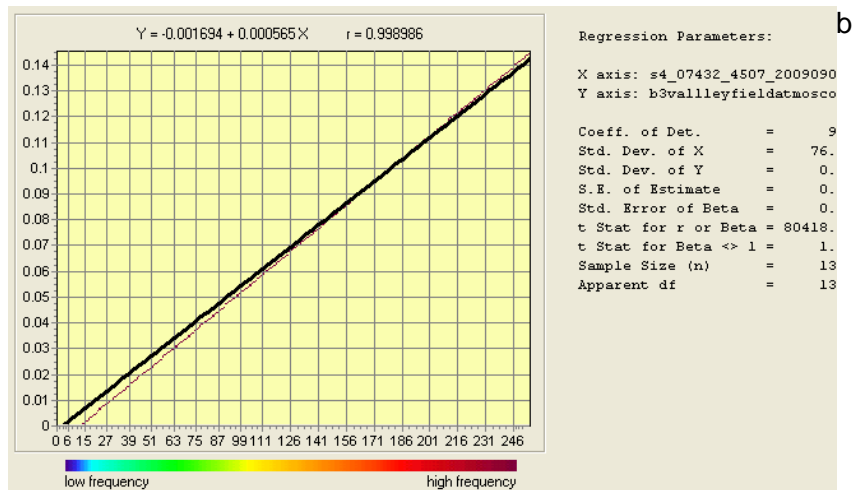
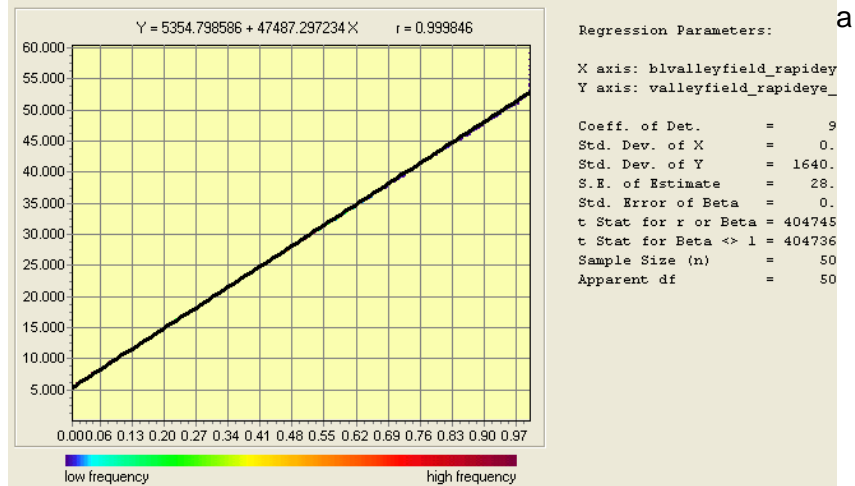


Figure 7 Test de la qualité des corrections atmosphériques, échantillons pour Rapid Eye (a), Spot 4 (b) et Worldview 2 (c)

## 4.2 Construction des indices de végétation

Le calcul des indices de végétation revêt une importance particulière pour cette étude :

- Ils permettent une combinaison productive des bandes traditionnellement dédiées à la caractérisation de la végétation.
- Ils expriment effectivement une variation de l'activité photosynthétique des plantes
- Certains d'entre eux sont adaptés au milieu particulier étudié.

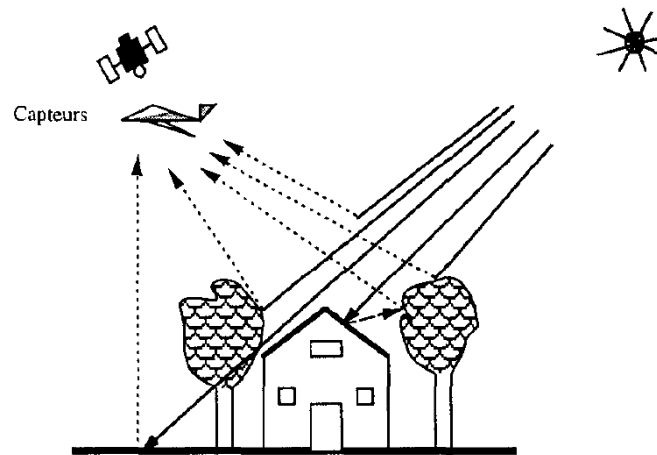
Nous avons produit un éventail d'indices de végétation (tableau 4) se différenciant en général entre eux par trois types de particularités. On peut identifier un groupe dont les valeurs expriment une grandeur proportionnelle à l'importance de l'activité photosynthétique des plantes, un deuxième groupe exprime exactement l'inverse, et un troisième groupe dont le calcul plus complexe intègre le calcul d'un profil du sol. Comme il était aussi question de tester l'apport de nouvelles bandes que sont le point d'inflexion rouge de Wv2 et Rapid Eye, et la bande proche Infrarouge 2 de Wv2, chacun des indices présents a donc été fait en double pour tenir compte de ces bandes. Ceci a été fait en substituant la bande rouge traditionnelle à la bande point d'inflexion rouge, et la bande proche infrarouge traditionnelle à la bande proche infrarouge 2 dans le cas de Wv2. Dans le cas des indices nécessitant le calcul d'un profil du sol, le nombre d'indices calculés devait donc nécessairement être multiplié par 4 plutôt que par 2.

**Tableau 4 Liste des Indices de végétation calculés**

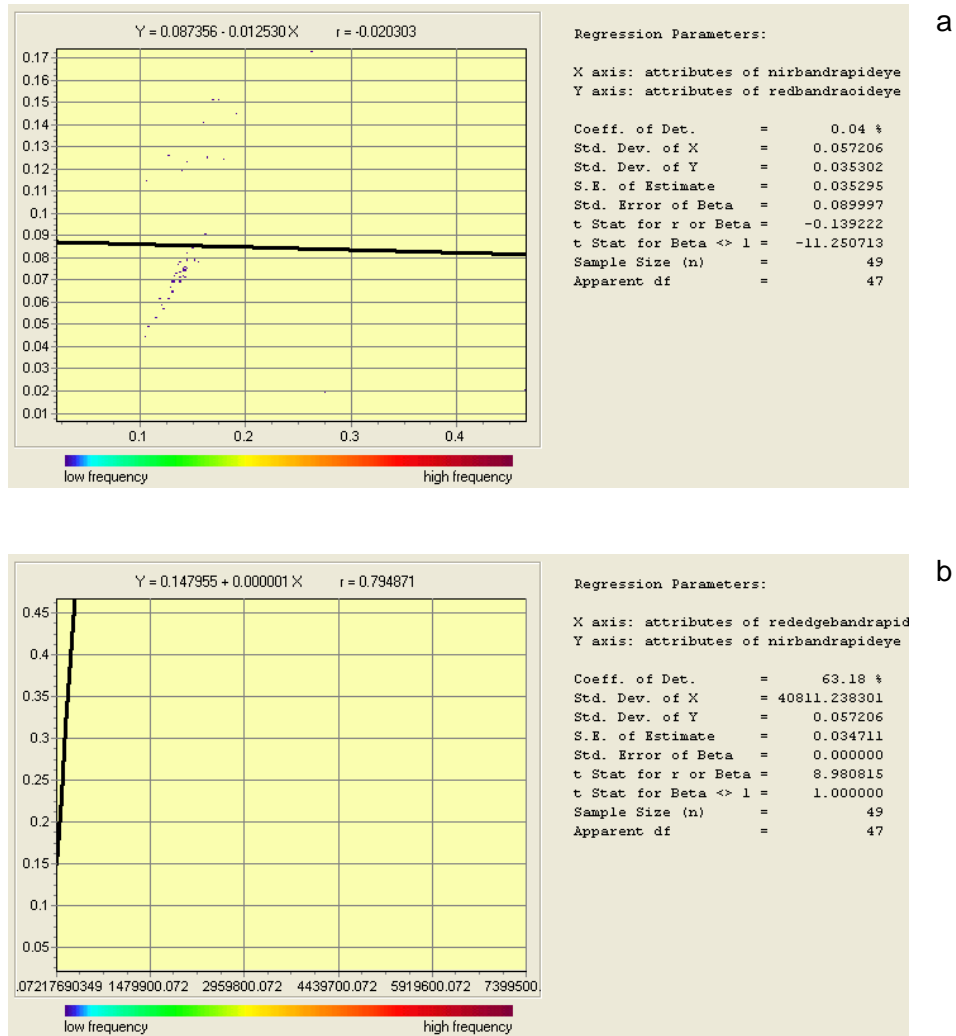
Indice	Définition	Variable indépendante dans le calcul du profil du sol intégré	Appliqué au produit
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index		Wv2, Rapid Eye, Spot 4
TVI	Transformed vegetation Index		Wv2, Rapid Eye, Spot 4
TTVI	Thiam's Transformed Vegetation Index		Wv2, Rapid Eye, Spot 4
Ratio	Ratio		Wv2, Rapid Eye
MSAVI1	Modified Soil-Adjusted vegetation Index 1		Wv2, Rapid Eye
MSAVI 2	Modified Soil-Adjusted vegetation Index 2		Wv2, Rapid Eye
TSAVI1	Transformed soil Adjusted vegetation Index 1	Rouge, point d'inflexion rouge	Wv2, Rapid Eye
TSAVI2	Transformed soil Adjusted vegetation Index 2	Rouge, point d'inflexion rouge	Wv2, Rapid Eye
RVI	Ratio Vegetation Index		Wv2, Rapid Eye, Spot 4
NRVI	Normalized Ratio Vegetation Index		Wv2, Rapid Eye, Spot 4
PVI	Perpendicular Vegetation Index	Proche infrarouge 1 et 2	Wv2, Rapid Eye
PVI1	Perpendicular Vegetation Index1	Proche infrarouge 1 et 2	Wv2, Rapid Eye
PVI2	Perpendicular Vegetation Index2	Rouge, point d'inflexion rouge	Wv2, Rapid Eye
PVI3	Perpendicular Vegetation Index3	Rouge, point d'inflexion rouge	Wv2, Rapid Eye
WDVI	Weighed Difference Vegetation Index	Proche infrarouge 1 et 2	Wv2, Rapid Eye
CTVI	Corrected Transformed Vegetation Index		Wv2, Rapid Eye, Spot 4
AVI	Ashburn Vegetation Index		Wv2, Rapid Eye
SAVI	Soil Adjusted vegetation Index		Wv2, Rapid Eye
DVI	Difference Vegetation Index	Proche infrarouge 1 et 2	Wv2, Rapid Eye

En effet plusieurs facteurs peuvent affecter la réponse spectrale et partant le calcul des indices de végétation. Parmi ces facteurs, il y a ceux inhérents aux capteurs tels que la visée verticale et la résolution spatiale. Plus grossière sera cette résolution spatiale, plus confondue sera la réponse spectrale. Les indices développés peuvent être moins adaptés à un milieu particulier. Le risque de confusion spectrale est effectivement beaucoup plus grand dans les milieux urbains (figure 8), notamment à cause du caractère épars de la végétation, ce qui est probablement le cas d'*A. artemisiifolia*. Un certain nombre d'indices ont été conçus dans le but de minimiser tous les effets extérieurs et pour mieux rehausser le signal issu de la végétation.

Certains des indices de végétation construits se modélisent comme une fonction de variables pouvant perturber le signal. Dans le cadre de ce projet, la minimisation de ces variables s'est traduite par le calcul de profils de sols, dont les pentes et les ordonnées ont été intégrées dans le calcul des indices de végétation (tableau 4, figures 9a et 9b).



**Figure 8** Mélange de la réponse spectrale au niveau du capteur satellitaire ou aéroporté en milieu urbain (Bannari et coll. 1997)



**Figure 9** Profils du sol : exemples de courbes de régressions pour le calcul des indices de végétation intégrant la bande rouge et le proche Infrarouge (a), le point d'inflexion rouge et le proche Infrarouge (b)

### 4.3 Analyses en Composantes principales des images

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) produit des nouvelles images décorrélées entre elles, à partir des bandes originales. En général les trois premières composantes expliquent les 95% à 99% de la variance des bandes originales. Les trois premières composantes expliquent généralement la variance de trois types de surfaces : Les surfaces végétales, les surfaces humides et les surfaces imperméables. Deux types d'ACP ont été faits pour tous les produits intégrés dans cette étude. L'ACP standardisé donne un même poids à toutes les bandes

originales introduites dans l'analyse. L'ACP non standardisé peut donner plus de poids à une bande particulière. L'objectif premier de l'application de l'ACP était de pouvoir identifier les groupes de bandes expliquant le mieux la présence d'*A. artemisiifolia*, il s'agissait également de combiner utilement différentes bandes, au lieu de les analyser une à une, pour pouvoir en extraire une information pouvant servir à isoler et mieux prédire la présence d'*A. artemisiifolia*.

#### **4.4 Essai de séparation d'*A. artemisiifolia* au travers d'une méthode manuelle**

En premier abord, nous avons essayé de caractériser le spectre radiométrique de l'herbe à poux de façon manuelle, en nous servant du logiciel Ecognition Developers (Trimble). La philosophie de ce logiciel est basée sur la technologie orientée objet. C'est-à-dire que possibilité est offerte de faire des traitements sur des objets plutôt que sur des pixels (un pixel pouvant être un objet). Tout est basé sur une segmentation préalable des images. La segmentation qui a été faite avait pour objectif de caractériser les images au travers de leurs formes et de leurs caractéristiques spectrales. Les paramètres de forme et de compacité ont été réglés et affinés pour pouvoir obtenir une représentation satisfaisante des formes des objets tout en les regroupant par proximité spectrale. L'objectif précis de ces segmentations était de classifier la végétation avec le plus de précision possible, et partant de caractériser le spectre radiométrique de l'herbe à poux. Il faut cependant noter que cette technologie fonctionne mieux avec des images à très haute résolution spatiale. C'est pour cette raison qu'elle a été préférentiellement appliquée aux images Wv2 et Rapid Eye (figure 10).

Parmi les classes créées à partir d'échantillons visuels, deux d'entre elles revêtaient une importance particulière: la première classe exprimant la présence de la végétation luxuriante, et la deuxième exprimant une végétation dégradée plus éparse. La méthode du plus proche voisin a été utilisée pour faire des classifications supervisées.

Les points représentant la présence d'*A. artemisiifolia* ont été utilisés pour créer un nouveau fichier de forme représentant une zone tampon autour de ces points. L'objectif était de les intégrer dans le logiciel Ecognition Developers de façon à ce qu'ils soient bien visibles, et de les utiliser ensuite pour créer des échantillons supposés représenter les caractéristiques spectrales d'*A. artemisiifolia* (figures 10 et 11). La double fenestration simultanée du logiciel permet de visualiser d'un côté les images réelles ou classifiées et de l'autre les échantillons d'*A. artemisiifolia* transformées en Buffer (figure 11). De cette façon on a une description précise de



la classe à laquelle appartient l'échantillon d'*A. artemisiifolia* à identifier. Un effort particulier a été fait pour repérer le centre des buffers, question de ne pas s'éloigner des coordonnées géographiques GPS de départ. Ce sont finalement des objets représentant une certaine homogénéité (compacité de la méthode orientée objet) qui sont échantillonnés.



Figure 10 Segmentation et classification des images WorldView 2 de l'île de Montréal

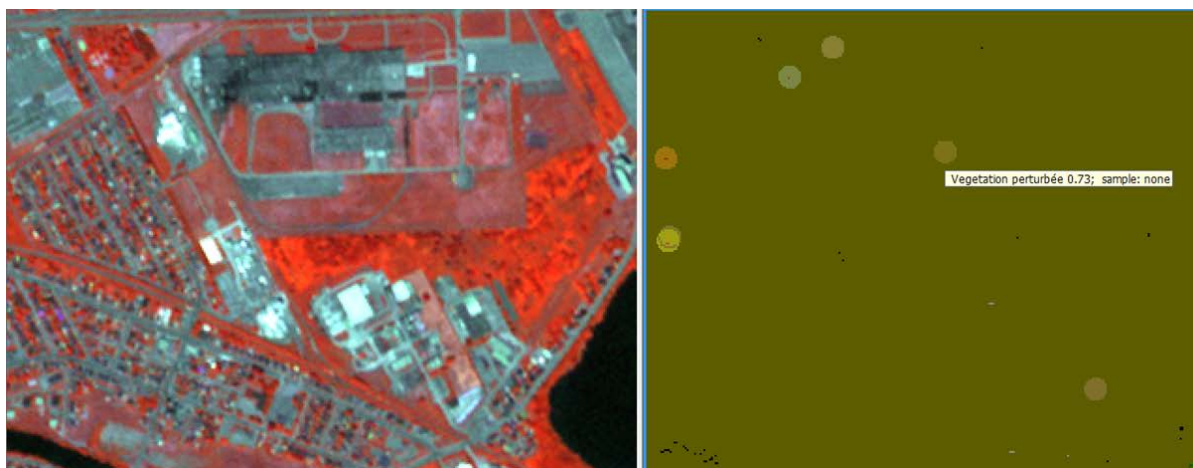


Figure 11 Échantillonnage de l'herbe à poux par méthode visuelle et utilisant une classification objet orientée

À la fin du processus on obtient des données permettant de représenter et comparer le degré de chevauchement entre *A. artemisiifolia* et la végétation dégradée d'une part, et entre *A. artemisiifolia* et la végétation luxuriante d'autre part (figure 12). Dans l'optique de caractériser l'ambrosie, cette évaluation permet de déterminer les bandes spectrales et les variables se chevauchant le moins avec la végétation. Un essai de classification de la présence de l'ambrosie a ensuite été fait sur la base de ces échantillons.

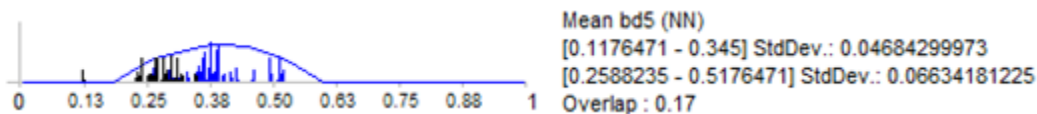


Figure 12 Exemples d'échantillons obtenus décrivant le chevauchement entre *A. artemisiifolia* (en noir) et la végétation dégradée (en bleu) pour les images Rapid Eye de Salaberry-de-Valleyfield.

## 4.5 Analyses statistiques

En parallèle à cette méthode manuelle, une méthode basée sur des analyses statistiques a été développée. Les échantillons de points recueillis sur le terrain ont été utilisés pour extraire les valeurs de toutes les variables produites (bandes des produits, indices de végétation, ACP). Les tableaux obtenus ont ensuite été utilisés pour faire des ACP et de simples tests de corrélations (Spearman). L'objectif était d'identifier les variables étant le plus clairement corrélées à la présence de l'herbe à poux. Ceci a été appliqué séparément à chaque produit. Tous les tests ont été faits sur la base d'un intervalle de confiance de 95%.

## 4.6 Précision de la séparabilité par la méthode de la logique floue

Pour obtenir une meilleure précision dans la séparabilité entre *A. artemisiifolia* et les autres types de végétation, une méthode par logique floue (Fuzzy-Logic) a été implémentée. La théorie par logique floue exprime bien le langage humain de l'ambiguïté et de l'ambivalence. Le principe fonctionnel consiste à attribuer des valeurs d'appartenance à des variables prédictives lorsque la variable à prédire est présente. Ces valeurs d'appartenance varient entre 0 et 1. La valeur 0 exprimant la non-appartenance et la valeur 1 l'appartenance maximale. Lorsqu'une règle ne correspond pas exactement à celle définie par le modélisateur (0 ou 1), elle varie dans les valeurs strictement supérieures à 0 et strictement inférieures à 1 ( $\mu(x) > 0 < 1$ ). Cette

méthode permet un contrôle beaucoup plus accru sur les variables, vu que c'est le modélisateur qui définit lui-même les règles à intégrer dans la construction de la fonction d'appartenance. Il s'appuie cependant sur ce qu'on appelle une base de connaissance qui peut dériver d'une étude statistique, ou simplement d'une connaissance experte ou établie. Les règles de la méthode par logique floue sont considérées comme des approximateurs universels. Cette propriété leur permet d'être capables de refléter toute fonction continue dans un domaine compact avec un certain degré de précision (Ngom et coll. 2011).

La méthode tenait compte en amont des variables significativement et positivement corrélées à la présence d'*A. artemisiifolia* (95 % IC). Un calcul des intervalles de confiance (95% IC) indiquant la présence d'*A. artemisiifolia* a été fait pour ces variables. Les valeurs minimales et maximales des intervalles de confiance ont alimenté les fonctions d'appartenance de la logique floue. Une fonction d'appartenance à croissance monotone a été appliquée (figure 13).

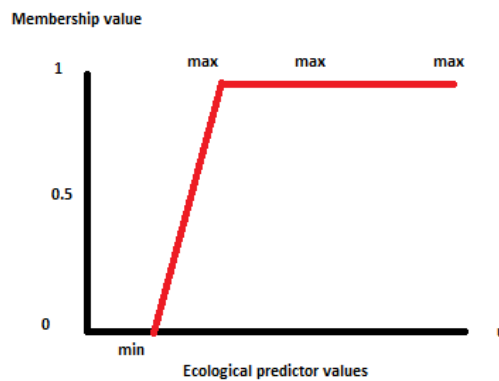


Figure 13 Fonction d'appartenance à croissance monotone (Ngom et coll., 2011).

$$\mu(x) = 0 \text{ si } x < \text{minCI}$$

$$\text{autrement } \mu(x) = \frac{(x - \text{minCI})}{(\text{maxCI} - \text{minCI})}$$

Avec:

$\mu$  représentant les valeurs floues possibles pour des valeurs crispées  $x$  d'une variable prédictive.

*maxCI* représentant la valeur maximum de l'intervalle de confiance calculé.

*minCI* représentant la valeur minimum de l'intervalle de confiance calculé.

Le résultat de l'analyse en logique floue est passé par le filtre des classes de végétation, c'est-à-dire qu'elle n'a été appliquée qu'à la végétation classifiée. Les images Spot 4 de l'île de Montréal et Salaberry-de-Valleyfield ont été classifiées par la méthode du maximum de vraisemblance, et non pas par méthode orientée objet (plus proche voisin). La végétation a été ensuite extraite par de simples requêtes spatiales.

#### **4.7 Tests des performances d'identification d'*A. artemisiifolia***

Une portion de 20% des points mesurés a été réservée pour le calcul de la sensibilité et spécificité de la prédiction. Dans le cas de la ville de Montréal, les parcelles cadastrales ont fait l'objet d'un calcul représentant une moyenne du risque par méthode floue de la présence d'*A. artemisiifolia*. En d'autres termes les cartes résultant de la logique floue et représentant la probabilité de présence d'*A. artemisiifolia* ont été utilisées comme sources pour allouer des valeurs moyennes aux parcelles cadastrales. Les valeurs prédites (points et polygones) ont été comparées aux valeurs mesurées (nombre de plants d'herbe à poux, infestation des parcelles).

#### **4.8 Essai de standardisation de la méthode**

Dans le souci d'opérationnaliser la méthode, nous avons testé deux options :

- Utiliser les valeurs des intervalles de confiance (lorsqu'*A. artemisiifolia* est présente) des variables les plus performantes en termes de prédiction d'*A. artemisiifolia* et les appliquer à toutes les images.
- Identifier la variable statistique la plus stable, c'est-à-dire la plus fréquemment corrélée de façon significative à la présence d'*A. artemisiifolia* et produisant un bon score de prédiction. Ensuite, prendre les valeurs d'intervalle de confiance (lorsqu'*A. artemisiifolia* est présente) de cette variable dans les images dont la date correspond le plus aux dates de relevés de terrain.

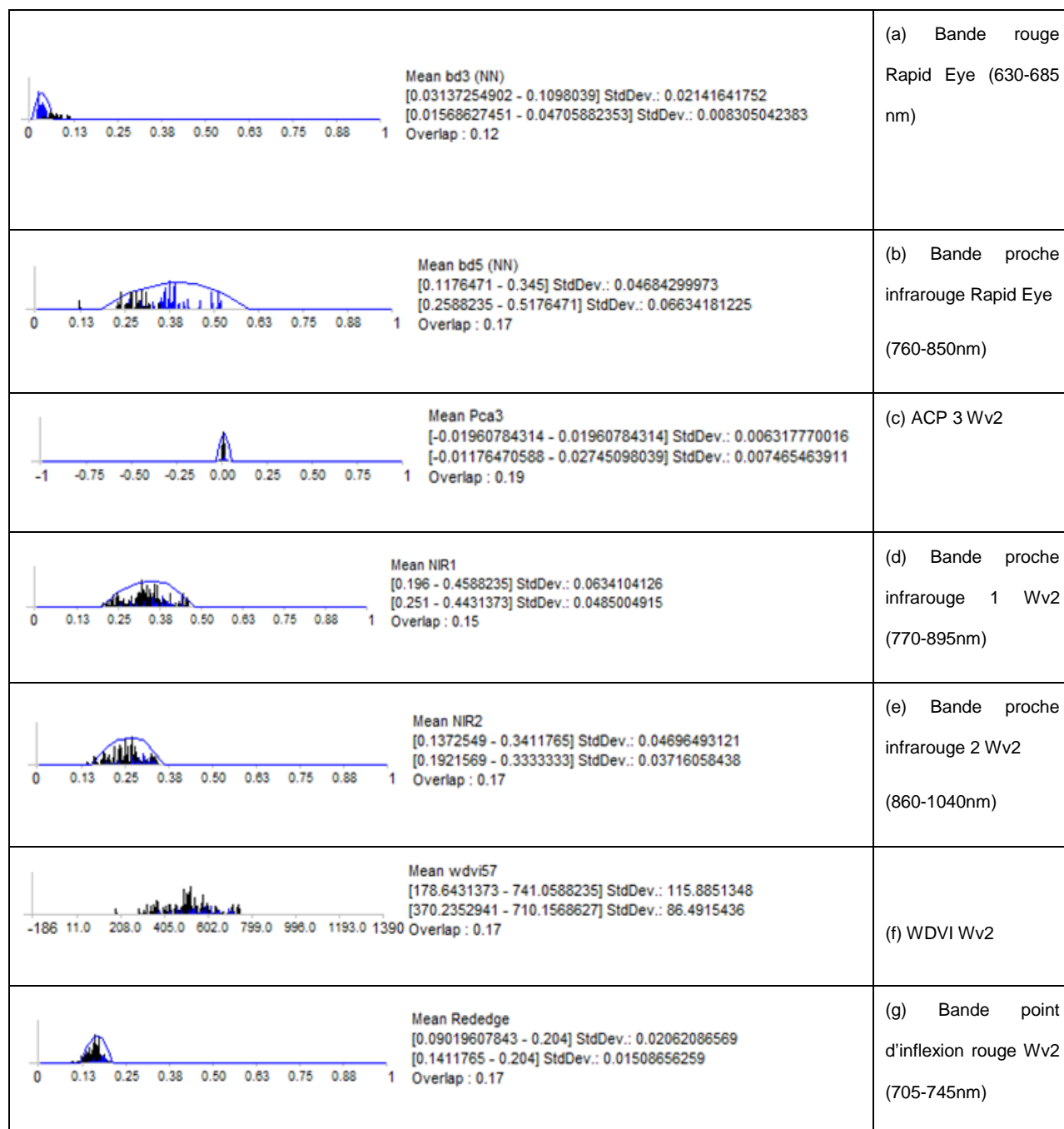
Cette tentative de standardisation n'est bien évidemment qu'un essai. Il faudrait tenir compte du fait que les images diffèrent les unes des autres, notamment en termes de résolution spatiale et de longueurs d'ondes, que l'écologie va varier d'un lieu à un autre.

## 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

La méthode manuelle et la méthode statistique n'ont pas donné des résultats concordants. Seuls les indices de végétation exprimant une décroissance du caractère chlorophyllien des plantes se sont montrés positivement et significativement corrélés à la présence de l'herbe à poux. Une composante issue des ACP s'est particulièrement démarquée, et a produit de bons résultats avec les données Wv2. La bande verte dans tous les cas a montré un bon potentiel pour prédire la présence de l'herbe à poux. Cependant l'essai de standardisation de la méthode n'a pas donné des résultats concluants. De plus la séparabilité entre l'ambrosie et les autres plantes envahissantes n'est pas garantie.

### 5.1 La bande verte : un meilleur potentiel discriminant

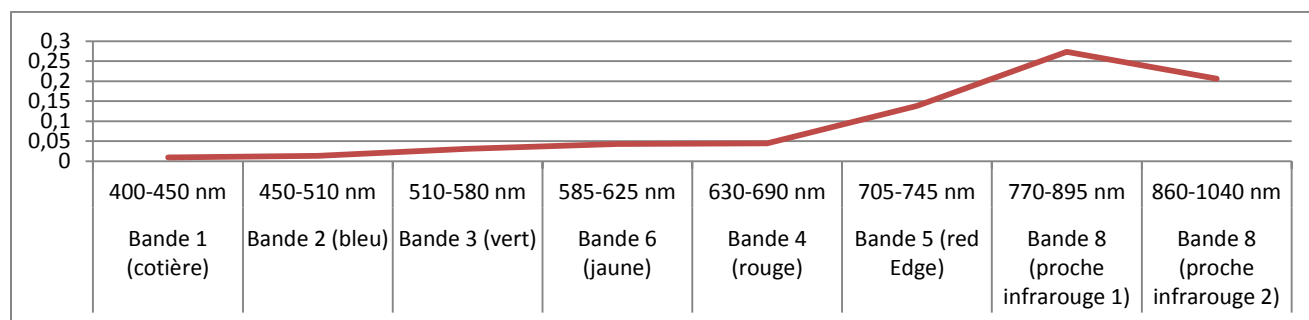
La méthode d'échantillonnage manuelle a permis de comparer le degré de croisement spectral entre *A. artemisiifolia* et la végétation perturbée. En effet il ressort dans tous les cas que les signatures spectrales d'*A. artemisiifolia* sont plus confondues à celles de la végétation perturbée qu'à celles de la végétation luxuriante. La bande rouge des images Rapid Eye de Salaberry-de-Valleyfield a montré le plus faible degré de croisement avec la végétation perturbée (figure 12a). C'est la bande proche infrarouge qui a montré le plus de concordance entre les données de Rapid Eye et celles de Wv2 (figure 14b et 14 d). La bande proche infrarouge 2 et la bande point d'inflexion rouge de Wv2 ont également montré un bon potentiel discriminatoire de l'herbe à poux (figure 14e et 14g). Le *Weighted Difference Vegetation Index* de Wv2 a également montré un degré de confusion pas très élevé (figure 13f). La composante 3 de l'ACP de Wv22 (figure 14c), décrivant plus les surfaces imperméables, a montré un degré de confusion légèrement moins élevé que les autres variables, mais elle a le mérite d'être la seule variable ayant montré une forte concordance avec les résultats de la méthode statistique. Cette variable a en effet montré une bonne stabilité dans les performances prédictives issues de ces analyses statistiques.



**Figure 14** Analyse du degré de croisement entre *A. artemisiifolia* (en noir) et la végétation perturbée (en bleu) : (a) Bande rouge Rapid Eye; (b) Bande proche infrarouge Rapid Eye; (c) Composante 3 de l'analyse ACP de Wordlview 2; (d) Bande proche infrarouge 1 Wordlview 2; (e) Bande proche infrarouge 2 Wv2 ;(f) Weighed Difference Vegetation Index (WDVI) de Wordlview 2; (g) Bande point d'inflexion rouge de Wordlview 2.



L'importance de l'infrarouge rejoint les conclusions de Maupin et Boivin (2001). L'importance du rouge, quant à elle, est en adéquation avec les conclusions de Auda et coll. (2008<sup>a</sup>). Il existe en tous cas une bonne concordance générale entre la caractérisation d'*A. artemisiifolia* au travers des images Wv2 sur l'île de Montréal et celle de Rapid Eye à Salaberry-de-Valleyfield (figures 14, 15 et 16). Il faut cependant noter une différence d'une valeur de 3%, entre les réflectances moyennes de l'ambrosie sur l'île de Montréal et les réflectances moyennes de l'ambrosie à Salaberry-de-Valleyfield. Cette différence peut être due à plusieurs facteurs: différences de dates de prises d'images, différences des caractéristiques des capteurs. Toujours est-il que la courbe générale décrivant le spectre de cette plante tel qu'analysé ici au travers des images Wv2 (figure 15), a de fortes similitudes visuelles, notamment dans le point d'inflexion rouge et le proche infrarouge, avec celle décrite par Nàdo et coll. (2011) qui ont utilisé des images Wv2 pour caractériser le domaine spectral de l'ambrosie dans des champs en Hongrie (figure 16). On est tenté de conclure que les données Wv2 présentent une bonne stabilité quant à la caractérisation de l'herbe à poux. Mais il faudrait bien considérer le fait que les milieux écologiques d'études sont différents. Notre problématique à nous revient à distinguer l'ambrosie de la végétation perturbée et non des parcelles de champs (milieu urbain oblige). Ce qui pose la question de l'adéquation entre nos objectifs généraux qui consistent à caractériser le domaine spectral de l'ambrosie et l'adéquation avec les données terrain disponibles, qui ne reflètent pas forcément la variété écologique pouvant caractériser la présence de l'ambrosie.



**Figure 15 Réflectances moyennes de l'ambrosie sur l'île de Montréal d'après les images Worldview 2**

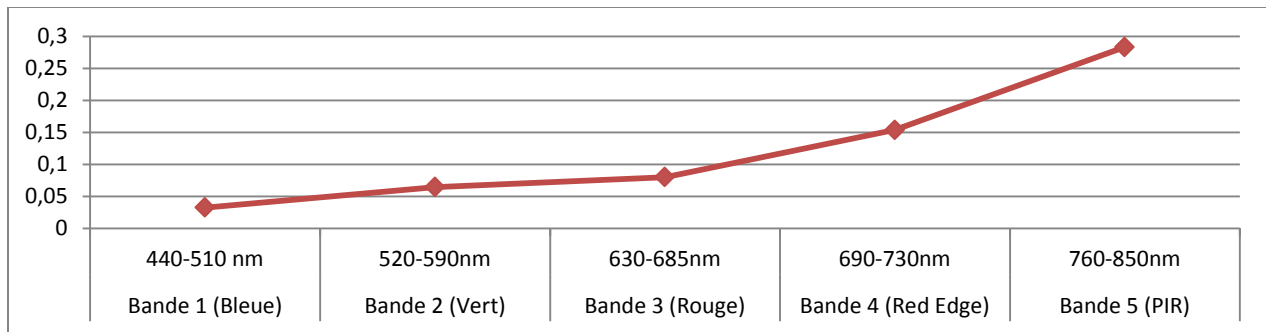


Figure 16 Réflectances moyennes de l'ambrosie à Salaberry-de-Valleyfield d'après les images Rapid Eye

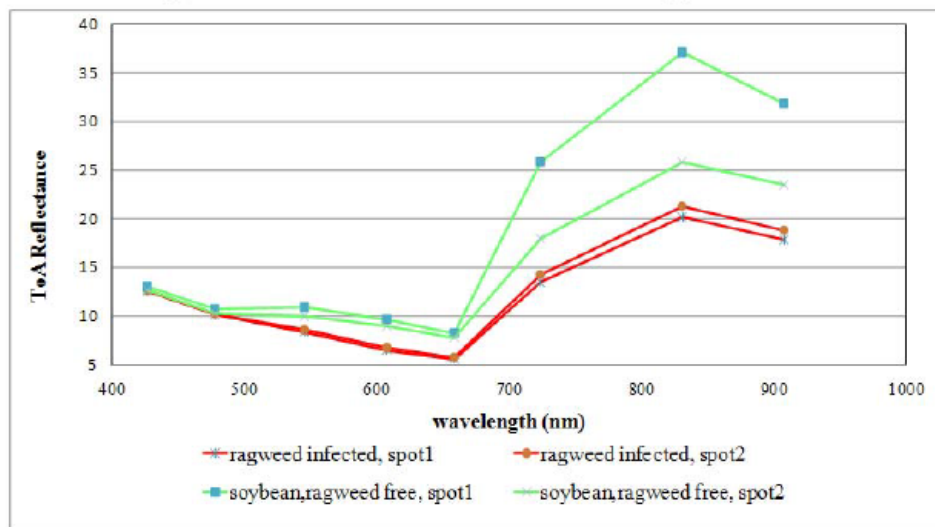


Figure 17 Réflectance comparée de l'ambrosie des champs de cultures hongrois d'après les images Worldview 2 (Nàdo et coll., 2011)

Des analyses statistiques, il ressort que les bandes infrarouges ne sont pas significativement corrélées à la présence d'*A. artemisiifolia* (voir tableaux de corrélations en annexe 1). Les bandes suivantes : côtière, bleue, verte, jaune, et rouge de Wv2 sont significativement et positivement corrélées à la présence d'*A. artemisiifolia* (95% IC). Cependant les meilleures performances de prédiction ont été produites par la composante 3 de l'ACP et la bande verte (Tables 5 et 6). La composante 3 correspondait plus aux surfaces imperméables dans ses valeurs maximales. Si les indices de végétation NRVI et TSAVI 1 sont significativement et positivement corrélées à la présence d'*A. artemisiifolia*, elles ne montrent pas une bonne



stabilité lorsque l'on compare leurs performances de prédiction entre les données cadastrales et les points GPS. En effet une bonne sensibilité n'implique pas forcément une bonne spécificité.

**Tableau 5 Performances en pourcentages des variables issues de Worldview 2, significativement et positivement corrélées à la présence d'*A. artemisiifolia* lorsqu'appliquées aux parcelles cadastrales de l'île de Montréal**

Seuils	Seuil minimum =0,1*		Seuil minimum = 0,5**	
	Sensibilité	Spécificité	Sensibilité	Spécificité
PCA 3	98%	3%	<b>70%</b>	<b>96%</b>
PCA 1 Standardisé	98%	5%	44%	27%
NRVI	97%	0,87%	66%	12%
TSAVI 1	100%	0%	96%	0,8%
bande 1 (côtière)	87%	5%	58%	25%
bande 2 (bleu)	88%	7%	58%	29%
bande 3 (vert)	93%	8%	<b>61%</b>	<b>52%</b>
bande 4 (rouge)	94%	7%	61%	44%
bande 5 (Point d'inflexion rouge)	100%	5%	60%	38%

\*Valeurs prédites supérieures ou égales à 0,1 (dans un intervalle de valeurs compris entre 0 et 1 et issu de la méthode de la logique floue)

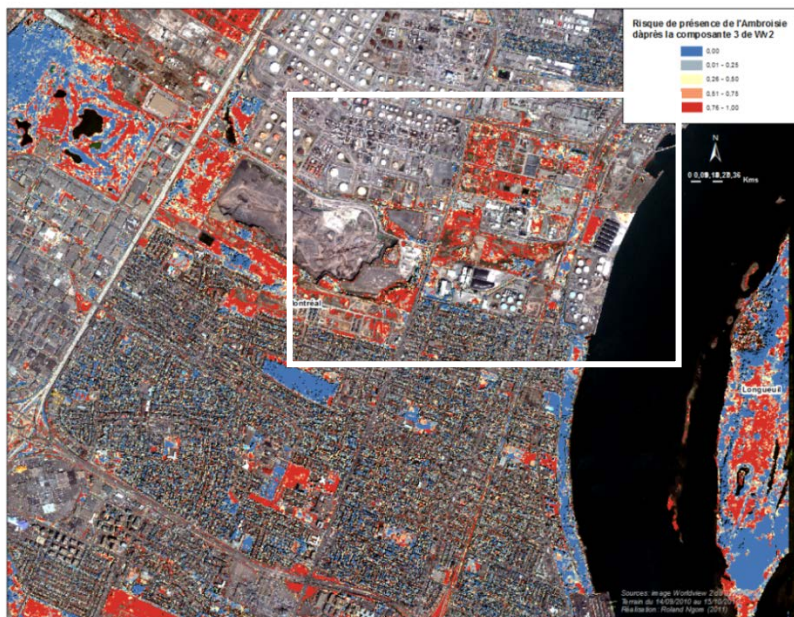
\*\*Valeurs prédites supérieures ou égales à 0,5 (dans un intervalle de valeurs compris entre 0 et 1 et issu de la méthode de la logique floue)

**Tableau 6 Performances en pourcentages des variables issues de Worldview 2, significativement et positivement corrélées à la présence d'*A. artemisiifolia*, lorsqu'appliquées aux points géopositionnés de l'île de Montréal**

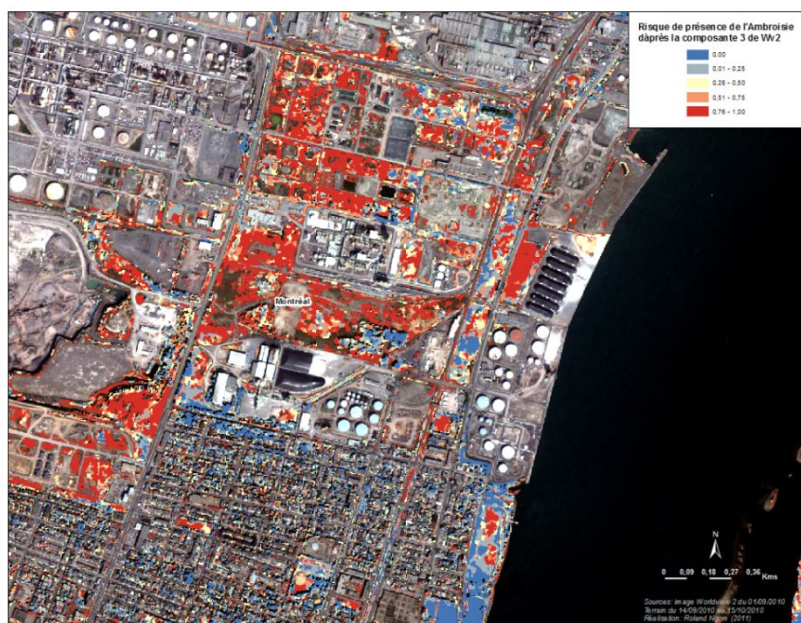
Variable	Pourcentage de présences bien prédites*
PCA 3	<b>67%</b>
PCA 1 Standardisé	<b>60%</b>
NRVI	48%
TSAVI 1	<b>88%</b>
bande 1 (côtière)	40%
bande 2 (bleu)	45%
bande 3 (vert)	<b>57%</b>
bande 4 (rouge)	51%
bande 5 (point d'inflexion rouge)	47%

\* issu de la méthode de la logique floue

Une analyse visuelle des cartes produites par la composante 3 de l'ACP issue des images Wv2 et la bande verte de Wv2, montre qu'*A. artemisiifolia* est moins présente autour des habitats domestiques que dans des zones à caractère industriel (figures 18 (a), 18 (b) et 19).

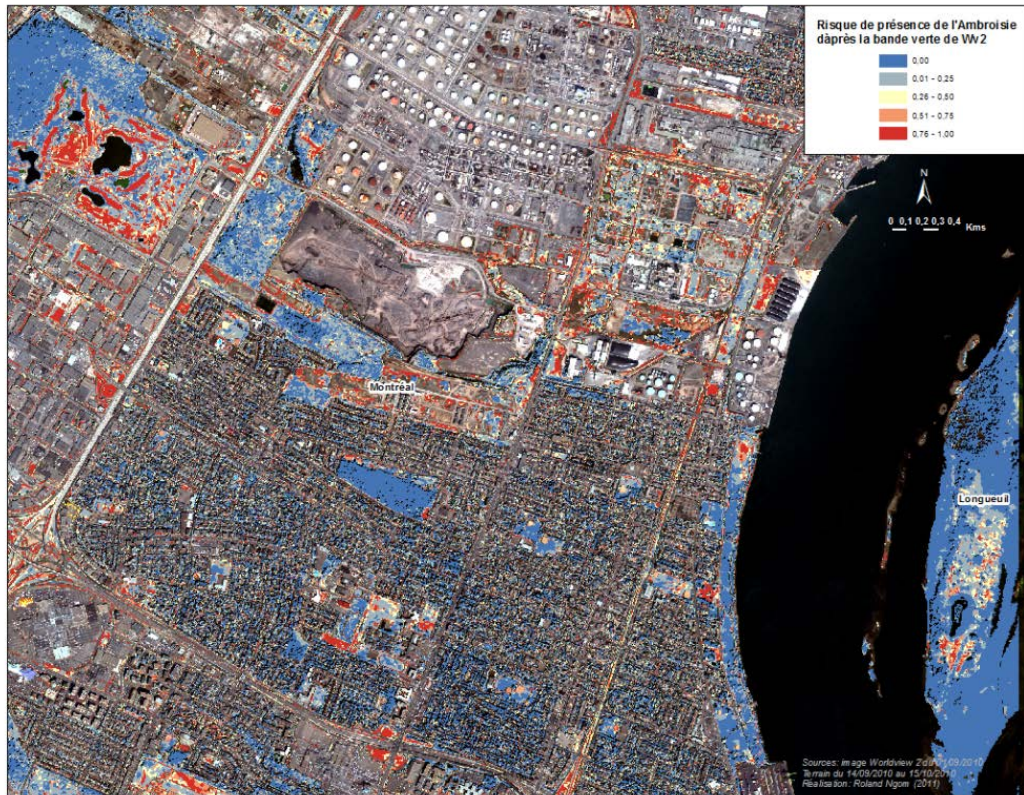


(a)  
*La couleur rouge indique une plus grande certitude de la présence de l'herbe à poux, sur une échelle de 0 à 1*



(b)  
*Zoom fait à partir de la carte 18 (a)*

**Figure 18** (a) Carte de prédiction d'*A. artemisiifolia* selon la composante 3 de l'Analyse en Composante Principale de Worldview 2 de l'île de Montréal, (b) Zoom sur la zone nord Est



La couleur rouge indique une plus grande certitude de la présence de l'herbe à poux, sur une échelle de 0 à 1

**Figure 19** Carte de prédiction d'*A. artemisiifolia* selon la bande verte de Worldview 2 à l'île de Montréal

De même, on remarque visuellement la présence prépondérante d'*A. artemisiifolia* aux bords des routes asphaltées (figures 18 (a), 18 (b) et 19). Il faut cependant noter que la caractérisation de la végétation basse accotée aux immeubles (lorsqu'elle existe) n'est pas aisée à ce niveau, ce qui est probablement le cas de l'ambrosie.

Seules la bande verte et la composante 1 de l'ACP de Rapid Eye qui correspond sensiblement à la présence des surfaces imperméables (valeurs élevées pour les surfaces imperméables) de la Composante 3 de Wv2 sont significativement corrélés à la présence d'*A. artemisiifolia*. La bande verte montre la meilleure performance de prédiction d'*A. artemisiifolia* (tableau 7).



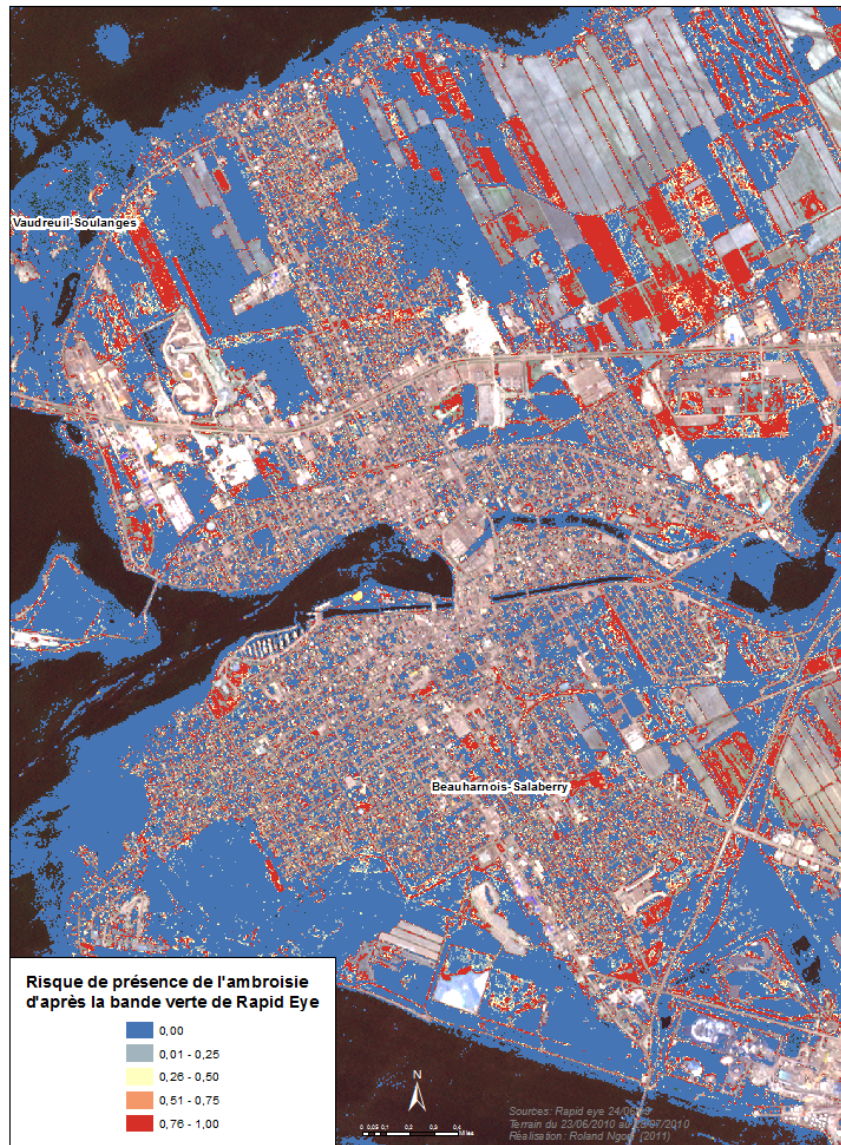
**Tableau 7 Performances en pourcentages des variables issues de Rapid Eye, significativement et positivement corrélées à la présence d’A. artemisiifolia lorsqu’appliquées aux points géopositionnés de Salaberry-de-Valleyfield**

Seuil	Seuil minimum =0.1*		Seuil minimum=0.5**	
Variabes	Sensibilité	Spécificité	Sensibilité	Spécificité
bande 2 (vert)	61%	70%	<b>56%</b>	<b>95%</b>
PCA 1	58%	68%	<b>54%</b>	<b>82%</b>

*\*Valeurs prédites supérieures ou égales à 0,1  
(dans un intervalle de valeurs compris entre 0 et 1 et issu de la méthode de la logique floue)*

*\*\*Valeurs prédites supérieures ou égales à 0,5  
(dans un intervalle de valeurs compris entre 0 et 1 et issu de la méthode de la logique floue)*

À Valleyfield, le résultat de la cartographie de la prédiction de la bande verte de Rapid Eye, montre également une présence remarquable d’A. *artemisiifolia* sur les voies de communication et les bords de parcelles (figure 20). **On peut voir une différence entre l’infestation en milieu habité et l’infestation des champs alentour.** Cette dernière n’est pas systématique, et montre que la majorité des parcelles est non infestée. Salaberry-de-Valleyfield a en effet une plus grande présence de la végétation dite luxuriante autour de la ville (voir figure 3 dans la section 3.2). La prédiction de la présence d’A. *artemisiifolia* dans ces espaces végétaux se traduit par un risque moins élevé que dans la ville proprement dite, la couleur rouge indiquant une plus grande certitude de la présence de l’herbe à poux, sur une échelle de 0 à 1 (figure 20).



**Figure 20** Carte de prédiction d'*A. artemisiifolia* selon la bande verte de Rapid Eye à Salaberry-de-Valleyfield

L'analyse des images spot 4 de l'île de Montréal montre une corrélation positive et significative entre la bande verte, la bande rouge, la composante 1 de l'ACP (exprimant plus la présence des surfaces imperméables), et le NRVI (voir annexe 1). Comme dans le cas de Wv2, la bande verte montre une meilleure stabilité lorsque l'on considère ses performances prédictives appliquées aux parcelles cadastrales et aux points GPS (tableaux 8 et 9). Cependant les valeurs moyennes de risques prédites pour les parcelles cadastrales dépassent rarement le

seuil de 0.1. Ceci est probablement un artéfact de la résolution spatiale des images Spot 4. De même il est difficile de distinguer la présence d'*A. artemisiifolia* autour des objets tels que les routes (figure 21). L'analyse des images Spot 4 de Salaberry-de-Valleyfield n'a montré aucune corrélation significative entre les variables produites et la présence d'*A. artemisiifolia*. Toutefois la composante 3 de l'ACP des images de spot 4 était la seule variable contribuant de façon importante à la composante statistique dans laquelle se retrouvait la présence d'*A. artemisiifolia*. Cette composante des images de spot 4 exprimait plus la présence des surfaces imperméables. Il faut cependant noter que les images SPOT 4 de Salaberry-de-Valleyfield ont été faites deux mois après la collecte des données terrain. Il est probable que la phénologie de la plante avait considérablement changé à cette date-là.

**Tableau 8 Performances en pourcentages des variables issues de Rapid Eye, significativement et positivement corrélées à la présence d'*A. artemisiifolia*, lorsqu'appliquées aux parcelles cadastrales de l'île de Montréal**

<b>Variables</b>	<b>Sensibilité*</b>	<b>Spécificité*</b>
bande 1 (vert)	<b>59%</b>	<b>58%</b>
bande 2 (rouge)	26%	49%
PCA 1	39%	50%
NRVI	66%	3%

*\*Issue de la méthode de la logique floue*

**Tableau 9 Performances en pourcentages des variables issues de Spot4, significativement et positivement corrélées à la présence de *A. artemisiifolia*, lorsqu'appliquées aux points Géopositionnés de l'île de Montréal**

<b>Variables</b>	<b>Pourcentage de présences bien prédites*</b>
bande 1 (vert)	<b>50%</b>
bande 2 (rouge)	48%
PCA 1	45%
NRVI	<b>58%</b>

*\*Issu de la méthode de la logique floue*

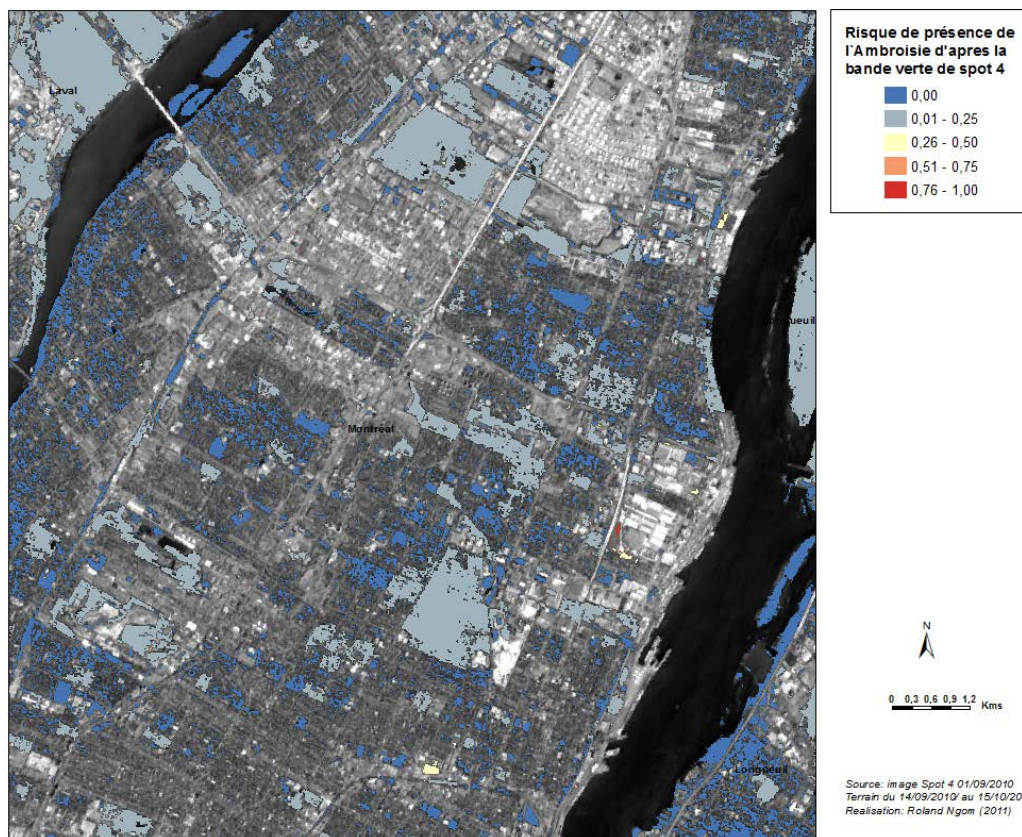


Figure 21 Carte de prédiction d'*A. artemisiifolia* selon la bande verte de Spot 4 de l'île de Montréal

## 5.2 De la difficulté de standardiser une méthode

Étant donné les discordances entre les résultats de la méthode manuelle et ceux de la méthode statistique, il paraissait logique de s'appuyer sur les résultats des performances prédictives des variables pour identifier celles ayant le plus fort potentiel de discrimination d'*A. artemisiifolia*. Il ressort des analyses précédentes que la composante des ACP des différentes images correspondant plus aux surfaces imperméables dans ses valeurs maximales revient fréquemment comme une variable clé pouvant permettre de mieux distinguer *A. artemisiifolia* des autres plantes. De même la fréquence de la variable NRVI (cette variable indique exactement l'inverse de ce qu'indique le NDVI), et l'absence de significativité statistique entre les bandes infrarouges et la présence d'*A. artemisiifolia*, indiquent une faible activité chlorophyllienne de cette plante dans les milieux étudiés. Ceci peut être caractéristique des milieux dans lesquels les échantillons ont été collectés : des milieux beaucoup plus urbanisés

que ceux étudiés par la plupart des auteurs cités plus haut. Il est aussi possible, mais moins probable, que malgré les corrections subies par les échantillons, les éléments adjacents aux plantes aient été insérés dans le spectre de la végétation. De plus le fait que les signatures spectrales de cette herbe soient très proches des basses herbes éparses constituant la végétation perturbée en général, induit une confusion probable. C'est-à-dire que l'on sait qu'*A. artemisiifolia* se retrouvera dans la végétation dégradée, mais en l'état actuel de l'étude, aucune conclusion sérieuse ne peut être tirée quant à sa distinction précise des autres espèces de plantes se retrouvant également dans la végétation dégradée.

Néanmoins, dans l'objectif d'opérationnaliser l'application de la méthode statistique développée plus haut, un essai de reproduction des composantes standard comprenant les bandes qui expliquaient le mieux la variance de la composante «surface imperméable » a été fait. Malheureusement, le résultat ne s'est pas avéré concluant. En effet les bandes des différents produits ne coïncident pas exactement dans leurs résolutions spectrales. Substituer la bande jaune de Wv2 par une autre bande de résolution spectrale a peu près égale n'a abouti qu'à rendre plus complexe la problématique. La variable la plus prometteuse a été ensuite considérée, il s'agit de la bande verte. Les valeurs d'intervalles de confiance des données dont la date de création était la plus proche de celle de la collecte sur le terrain ont été considérées (en l'occurrence Rapid Eye). Elles ont été utilisées comme proxy pour appliquer la méthode de la logique floue aux autres données. Un essai avec les données Spot 4 et Wv2 de l'île de Montréal (tableau 10) nous a conforté dans notre intuition que les conditions étaient beaucoup trop différentes d'un milieu à l'autre pour que le modèle puisse fonctionner de cette façon-là et donner des résultats stables.

**Tableau 10 Performances en pourcentages des bandes vertes issues de Spot4 et Worldview 2, utilisant les valeurs issues de Rapid Eye (Considérées comme standards).**

<b>Variables</b>	<b>Sensibilité</b>	<b>Spécificité</b>
Bande verte Spot4 île de Montréal (Parcelles cadastrales)	59%	58%
Bande verte Wv2 île de Montréal (Parcelles cadastrales)	34%	37%



## 6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats de cette étude marquent la forte empreinte du milieu dans lequel l'étude a été menée, un milieu beaucoup plus urbanisé que la plupart des études équivalentes. Si la méthode manuelle développée dans cette étude et basée sur une analyse orientée objet semble rejoindre les conclusions de certains auteurs quant à l'importance du rouge et de l'infrarouge dans l'étude d'*A. artemisiifolia*, elle n'a cependant pas pu être confortée au moment de valider le potentiel prédictif de ces bandes. En revanche la bande verte a montré une grande stabilité quant à son potentiel prédictif d'*A. artemisiifolia*, et ce malgré les différences de qualité d'images, de dates et de supports spatiaux (zones d'études). Il apparaît que cette variable pourrait être utilisée pour prédire la présence d'*A. artemisiifolia* dans un milieu aussi urbanisé que l'île de Montréal. Il faudrait cependant noter que les images ayant la plus fine résolution spatiale produisent une cartographie beaucoup plus fidèle à la description faite sur le terrain quant à la présence de cette plante sur les bords de routes, les bords de parcelles de cultures, et dans les espaces à caractère plus industriel. Les présents résultats montrent cependant une forte confusion entre végétation perturbée et *A. artemisiifolia*, ceci introduit la problématique de la séparation réelle entre *A. artemisiifolia* et les autres plantes perturbées.

En termes d'opérationnalisation, il se trouve que la difficulté de la caractérisation de l'herbe à poux dans ces milieux urbanisés est au moins déjà réduite à celle d'une végétation perturbée, cartographiable avec une bonne précision, grâce à des images haute résolution. Si l'on considère que l'ambrosie est parmi les espèces dominantes des plantes envahissantes en milieu urbain, tout au moins sur l'île de Montréal (Vincent et Bergeron, 1985), on pourrait dire que ce résultat est une avancée certaine dans sa caractérisation en milieu fortement urbanisé.

L'une des suites les plus simples de cette étude pourrait être de faire des prédictions sur la base de la méthode développée dans cette étude, et des meilleurs résultats actuellement obtenus. L'idée est de permettre la réalisation d'un terrain dont les objectifs soient couplés à ceux de la télédétection (figure 22). On pourrait en effet considérer la bande verte, la bande rouge, le point d'inflexion rouge, la bande infrarouge et la composante (ACP), décrivant le mieux la présence de l'herbe à poux dans la présente étude. Une commande prioritaire d'images pour un intervalle précis de dates serait faite, de préférence avant la pollinisation de l'ambrosie (Juillet-début août). En effet si l'utilité de la carte prédictive de l'ambrosie est bien d'aider à la prévention des rhinites, il vaudrait mieux disposer de cette carte avant la

pollinisation effective de la plante pour promouvoir des interventions efficaces. Il faudra également veiller sur le terrain à utiliser des GPS différentiels professionnels et à obtenir des points représentant aussi bien la présence que l'absence de l'ambrosie, dans le but d'améliorer la précision des analyses. La diversité écologique incluant rural et urbain est un facteur important pour étudier l'éventuelle discordance entre la réflectance de l'ambrosie en milieu rural et celle en milieu urbain.

<p><b>Étape 1 :</b>  <b>Commande à l'avance prioritaire d'images satellites pour une date précise (avant pollinisation)</b>  <i>Date <math>t_0-t_n</math></i></p>	<p><b>Étape 2 :</b>  <b>Acquisition d'images et prétraitements par le biais du fournisseur</b>  <b>Collecte d'échantillons terrain</b>  <i>Date <math>t_0</math></i></p>	<p><b>Étape 3 :</b>  <b>Production de cartes de risques de présence de l'ambrosie sur le modèle actuel</b>  <i>Avant Date <math>t_1</math></i></p>	<p><b>Étape 4 :</b>  <b>Validation des prédictions</b>  <i>Date <math>t_1</math> (Dans les plus brefs délais)</i></p>
---	--	--	---

**Figure 22** Étapes proposées pour une approche plus opérationnelle de validation de la prédiction de l'herbe à poux

Sur la base de cette prédiction additionnelle, un intervalle de confiance standardisé (des valeurs de réflectances) sera défini, mais cette fois sur un même type de produit (même résolution spatiale et spectrale). Si l'écart type ou la variance et les moyennes entre les données de la présente étude et celles de l'étude à venir ne diffèrent pas significativement, la méthode aura gagné en stabilité, à condition que la sensibilité et la spécificité des prédictions soient satisfaisantes. S'il s'avère que ces valeurs sont trop différentes, il sera envisagé d'utiliser les valeurs d'intervalles de confiance offrant les meilleures performances prédictives à la fois pour la présente étude et celle à venir comme proxy. Cette étape supplémentaire entre résolument dans un objectif d'opérationnalisation, s'appuyant sur la stabilité des résultats basés sur la répétitivité.

Il faudrait noter que le succès d'une telle approche est largement dépendant des conditions météorologiques (nuages) pour une bonne prise d'images, de la capacité effective des fournisseurs d'images à produire et délivrer des images de qualité dans les délais requis, sans compter le fait qu'une commande prioritaire augmenterait le coût de production des images.

En termes d'opérationnalisation, utiliser des images ayant la meilleure résolution spatiale donnera des cartes plus détaillées et plus précises. Cependant il faudrait considérer divers aspects : au cas où il s'avèrerait dispendieux d'acquérir des images de type Wordlview 2, il vaudrait mieux considérer l'utilisation d'un produit ayant un meilleur rapport qualité-prix. Les données Rapid Eye pourraient effectivement être mieux adaptées pour ce type de projet.



## **7 REMERCIEMENTS**

Remerciements à Sophie Gaudreau de la Direction de la santé publique de l'île de Montréal et à Diane Lyse Benoit de Agriculture et Agroalimentaire Canada pour les données terrain. Remerciements au Ministère des Ressources naturelles et de la Faune pour les images Spot 4.



## 8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Auda et coll. (2008<sup>a</sup>) détection des plantes invasives par télédétection : un cas d'étude, l'ambrosie en région Rhône Alpes, France. *International Journal of Remote Sensing*. Vol 29, No 4, 1109-1124.
- Auda et coll. (2008<sup>b</sup>) Enjeux et perspectives de la télédétection multi temporelle à Très Haute Résolution Spatiale. XIèmes Journées Scientifiques Madagascar 2008
- Bassett IJ., Crompton CW. (1975) The biology of Canadian weeds *Ambrosia artemisiifolia* L. and *A. psilostachya* DC. *Canadian Journal of Plant Science* 55:463–476.
- Bannari A., Morin D., He DC. (1997) Caractérisation de l'environnement urbain à l'aide des indices de végétation dérivés des données de hautes résolutions spatiale et spectrale. *Télédétection des milieux urbains et périurbains*. Éd. AUPELF-UREF. p, 47-64
- Chavez PS. (1996). Image-based atmospheric corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (9): 1025-1036.
- Joly M., Bertrand P., Gbangou RY., White MC., Dubé J., Lavoie C. (2011) Paving the Way for Invasive Species: Road 1 Type and the Spread of Common Ragweed 2 (*Ambrosia artemisiifolia*). *Environmental Management* Volume: 48, Issue: 3, Pages: 514-522. PubMed: 21710219
- Maupin P., et Apparicio P. (2004) Relationships between *Ambrosia artemisiifolia* sites and the physical and social environments of Montreal (Canada). 0-7803-8742-2/04/\$20.00 (C) IEEE.
- Maupin P., et Boivin MC. (2001) Reconnaissance des populations d'*Ambrosia artemisiifolia* sur l'île de Montréal à l'aide d'un capteur hyperspectral. Étude des propriétés spectrales et de l'écologie végétale (L'île de Montréal Canada : direction de la santé publique de l'île de Montréal)
- Nádor G., et coll. (2011) Ragweed identification by worldview2 data. *Remote Sensing Directorate Institute of Geodesy, Cartography and Remote Sensing*. <http://dgl.us.neolane.net/res/img/aa0472a0cae3a1509de171a78a820f29.pdf>. Accédé le 16 décembre 2011
- Ngom, R., Berrang Ford L., Hongoh, V. (2011). Fuzzy-Logic vs. logistic regression and maximum entropy to predict habitat suitability of relevant vector species in Canada (Submitted).
- Simard MJ., Benoit DL. (2010) Distribution and abundance of an allergenic weed, common 26 ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), in rural settings of southern Québec, Canada. *Canadian Journal of Plant Science* 90:549–557
- Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J.J., Perbos J. et Deschamps PY. (1986) Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S), Document Laboratoire d'Optique Atmosphérique, 265 p.
- G. Vincent and Y. Bergeron, (1985) Weed synecology and dynamics in urban environment. *Urban Ecology*, vol. 9, no. 2, pp. 161–176.





## 9 RESSOURCES INTERNET

Worldview 2: <http://worldview2.digitalglobe.com/>

Rapid Eye: <http://www.rapideye.net/index.html>

Spot 4: [http://spot4.cnes.fr/spot4\\_gb/satellit.htm](http://spot4.cnes.fr/spot4_gb/satellit.htm)



## ANNEXE 1 : TABLEAUX DE CORRÉLATIONS

Tableau 11 Corrélations des variables importantes de Worldview 2 (île de Montréal)

Variables	Remarques sur les variables	Coefficient de corrélation	P
bande 1		0,3	0
bande 2		0,34	0
bande 3		0,3	0
bande 4		0,33	0
bande 5		0,32	0
bande 6	Non significative à titre indicatif*	-0,054	0,45
bande 7	Non significative à titre indicatif*	-0,06	0,38
bande 8	Non significative à titre indicatif*	-0,034	0,63
NDVI	Rouge & proche infrarouge 1	-0,18	0,009
NDVI	Rouge & proche infrarouge 2	-0,29	0
NDVI	Point d'inflexion rouge et proche infrarouge 2	-0,17	0,01
CTVI	Rouge & proche infrarouge 1	-0,18	0,09
CTVI	Point d'inflexion rouge & PIR 1	-0,33	0
DVI	Rouge & proche infrarouge 2	-0,22	0,001
DVI	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 2	-0,22	0,001
MSAVI 2	Rouge & proche infrarouge 1	-0,14	0,04
MSAVI 2	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 2	-0,17	0,01
NRVI	Rouge & proche infrarouge 1	0,18	0,009
NRVI	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 2	0,17	0,01
PVI	Rouge & proche infrarouge 1	-0,22	0,001
PVI	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 2	-0,27	0,0001
PVI1	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 1	-0,22	0,001
PVI1	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 1	-0,22	0,001
Ratio	Rouge & proche infrarouge 1	-0,18	0,009
RVI	Rouge & proche infrarouge 1	0,18	0,009
RVI	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 2	0,17	0,01
TSAVI 2	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 1	-0,1724	0,01
TTVI	Rouge & proche infrarouge 1	-0,18	0,009
TTVI	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 2	-0,17	0,01
TVI	Rouge & proche infrarouge 1	-0,18	0,09
TVI	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 2	-0,17	0,01
WDVI	Rededge & proche infrarouge 1	-0,19	0,007
WDVI	Point d'inflexion rouge & proche infrarouge 2	-0,15	0,02
PCA 3	Composante 3 ACP	0,37	0
STD PCA 1	Composante 1 ACP Standardisée	0,21	0,003
Std PCA 3	Composante 3 ACP Standardisée	0,34	0

\*à un intervalle de confiance de 95%

**Tableau 12 Corrélations des variables importantes de Rapid Eye (Salaberry-de-Valleyfield)**

<b>Variables</b>	<b>Remarques sur les variables</b>	<b>Coefficient de corrélation</b>	<b>P</b>
bande 1	Non significative à titre indicatif*	0,08	0,22
bande 2		0,17	0,01
bande 3	Non significative à titre indicatif*	0,1	0,16
bande 4	Non significative à titre indicatif*	0,13	0,05
bande 5	Non significative à titre indicatif*	0,0035	0,96
NDVI	Rouge & proche infrarouge (Non significative a titre indicatif*)	-0,05	0,46
NDVI	Point d'inflexion rouge et proche infrarouge	-0,06	0,39
NRVI	Rouge & proche infrarouge (Non significative a titre indicatif*)	0,052	0,46
PCA 1	Composante 1 ACP	0,15	0,03

\*à un intervalle de confiance de 95%

**Tableau 13 Corrélations des variables importantes de Spot 4 (île de Montréal)**

<b>Variables</b>	<b>Remarques sur les variables</b>	<b>Coefficient de corrélation</b>	<b>P</b>
bande 1		0,24	0
bande 2		0,24	0
bande 3	Non significative à titre indicatif*	0,0114	0,84
bande 4	Non significative à titre indicatif*	0,0461	0,43
NDVI		-0,11	0,04
NRVI		0,11	0,04
CTVI		-0,11	0,04
RVI		0,11	0,04
TTVI		-0,11	0,04
PCA 2	Composante 2 ACP	-0,16	0,005
PCA 1	Composante 1 ACP	0,32	0

\*à un intervalle de confiance de 95%

## ANNEXE 2 : PRÉCISION DE LA CLASSIFICATION DE LA VÉGÉTATION

Tableau 14 Précision de la classification des images Worldview 2 (île de Montréal)

Classes/Échantillons	Végétation luxuriante	Végétation perturbée	Somme
Végétation luxuriante	27	6	33
Végétation perturbée	2	45	47
<b>Totaux</b>			
Précision totale	0,9		
Coefficient de Kappa	0,78		

Tableau 15 Précision de la classification des images Rapid Eye (Salaberry-de-Valleyfield)

Classes/Échantillons	Végétation luxuriante	Végétation perturbée	Somme
Végétation luxuriante	32	5	37
Végétation perturbée	3	10	13
<b>Totaux</b>			
Précision totale	0,84		
Coefficient de Kappa	0,7		



## **ANNEXE 3 : PROTOCOLE TERRAIN SALABERRY-DE-VALLEYFIELD**

### **Inventaire d'herbe à poux en milieu urbain**

#### **But**

Les relevés permettront d'établir une connaissance de la densité de la population d'herbe à poux dans les différents habitats. Le projet permettra aussi de caractériser les habitats les plus propices à l'établissement et à la croissance de l'herbe à poux en ville.

Hypothèses :

1. La connaissance de la distribution de l'herbe à poux permettra d'évaluer le lien entre la distribution de l'herbe à poux et l'incidence de la rhinite.
2. La présence d'herbe à poux vigoureuse est associée à la présence d'espaces verts peu aménagés ou de terrains perturbés.

#### **Méthodologie de l'inventaire par quadrat**

##### **Stratification de l'échantillonnage dans la zone**

La zone d'étude est divisée en secteurs d'une superficie de 1,5 km<sup>2</sup> (voir cartes). La ville de Valleyfield est divisée en 13 secteurs et St-Jean en 18 secteurs. La disposition aléatoire des points d'échantillonnage est faite en choisissant, à l'avance, 24 points par secteur au moyen de tables de chiffres aléatoires ou autre de façon à obtenir 12 points valable sur le terrain.

Les différents habitats urbains étudiés sont de type résidentiel, aménagé, industriel et perturbé. Un minimum de 2 des 4 types d'habitats doit être représenté par secteur, les habitats non représentés dans un secteur devront être fait dans un autre secteur de façon à ce que l'on s'approche le plus possible de 78 quadrats (hasard et sélectionné) par habitat pour Valleyfield soit 6 quadrats x 13 secteurs et de 108 quadrats pour St-Jean.

### Positionnement des quadrats dans les secteurs

- On choisira 3 positionnements aléatoires par secteur et par habitat. Pour chaque positionnement, 1 quadrat sera installé au hasard et 1 quadrat (sélectionné) sera installé là où il y a de l'herbe à poux. Les quadrats ont une superficie de 50 x 50 cm.
- Les quadrats seront **tous géo-référencés à l'aide d'un GPS** offrant une précision de  $\pm 1$  m et un plan de localisation sera tracé afin de pouvoir retrouver exactement le quadrat.
- Une fiche de notation sera remplie pour chaque quadrat afin de décrire l'habitat et de noter le nombre de plants d'herbe à poux.
- Dans les habitats industriels et aménagés, il faudra aussi noter à chaque mètre, l'absence ou la présence d'herbe à poux le long d'un transect partant du quadrat et s'étendant sur 10 m.

### Entrées de données

Les données prises sur le terrain seront entrées dans un fichier. Ces fichiers seront imprimés, vérifiés par comparaison avec les données brutes puis corrigés.

### Matériel nécessaire

- Quadrats
- Corde de 10 m de long avec des repères à tous les mètres
- Cartes des secteurs
- GPS
- Table de chiffres aléatoires
- Tablette pour écrire
- Sac de plastique pour protéger les feuilles au cas de pluie

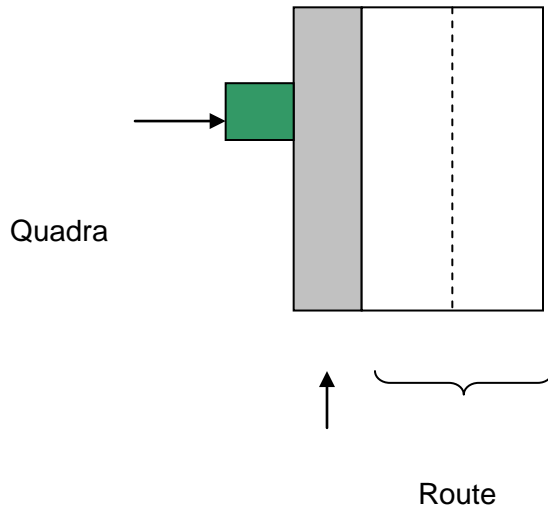
### Besoins de la Ville :

- Carte géo-référencée de la Ville (format ARGIS ou DWG)
- Permis pour inventorier sur le territoire
- Liste des travaux d'infrastructure ou résidentiel qui pourrait influencer les valeurs de l'inventaire
- Liste des propriétaires de grands terrains
- Avoir une personne ressource à la ville – lien de communication
- Schéma d'aménagement- étude du territoire

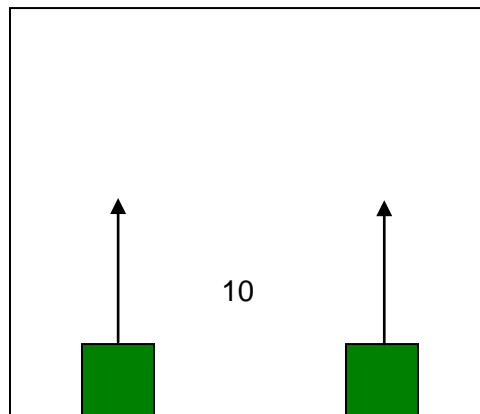


Exemple de disposition des quadrats et des transects.

Lorsque le quadrat est placé le long d'un trottoir, un côté du quadrat sera placé du long du trottoir du côté des habitations non pas dans la rue. S'il n'y a pas de trottoir, un côté du quadrat sera placé le long de l'accotement de la rue. S'il n'y a pas d'accotement, un côté du quadrat sera placé le long du gravier sans végétation.



Trottoir, gravier  
ou  
accotement



Au hasard

Selectionné  
avec H&P

Dans les habitats industriels et aménagés, un transect de 10 mètres de long sera positionné à partir du quadrat vers l'intérieur du terrain. À chaque mètre l'absence ou présence de l'herbe à poux sera noté (voir Fiche notation).

# ANNEXE 4 : PROTOCOLE TERRAIN DE L'ÎLE DE MONTRÉAL

TABLEAU DE CARACTÉRISATION

PARCELLES CARACTÉRISTIQUES	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Code WP SPS										
Photo No.										
Taille de la colonie m2										
Densité moyenne (%)										
Sociabilité										
Hauteur moyenne										
Substrat sous HP 1										
% substrat HP 1										
Substrat sous HP 2										
% substrat HP 2										
% de pente										
Drainage										
Compaction										

**DIAGNOSTIC**

cause de infiltration (sol : relief, compaction, drainage, couvert végétal : absent, présent, abondant, dominant, état du site : habitat type et étreiten)

Compaction de sol élevé	
Sol poreux	
Manque de couvert	

**STRATÉGIES D'INTERVENTION**

Destruction des plants	
Amélioration des conditions de croissance	
Installation d'un couvert végétal complet	

**RECOMMANDATION**

Enrichir le sol	
Aérer le sol	
Ensemencer le sol	
Faucher	
Reensemencer	

FICHE DE CARACTÉRISATION 2010 - HERBE À POUX - DSP CSSS - Fiche terrain

NOM ENQUÊTEUR :	HEURE D'ARRIVÉE:	DATE :
# GPS :	HEURE DE DÉPART:	# LOT:

Photographier le terrain

PRISE DE PHOTO	No.
----------------	-----

Valider l'occupation du sol

1	Duplex, résidence p. âgées, loft, lieux de cultes
2	Unifamilial, multiplex, immeuble, commerce, theatre, motel, hotel ,golf, stade
3	Institution publique, garage public, de stationnement, de réparation ou d'entretien automobile, usine, manufacture légère, réseaux éducation, réseau de la santé
4	Entrepôt et station de transport de marchandise, chemin de fer, utilités publique, parc
5	Bâtiment secondaire (hangar, garage, stationnement, abri, etc.), terrain de stationnement et tout type de terrain vacant

HABITAT TYPE	Aménagé (1)	Non aménagé (2)	Milieu naturel (3)
--------------	-------------	-----------------	--------------------

ENTRETIEN	Entretenu (1)	Négligé (2)	Perturbé (3)	Milieu naturel (4)
-----------	---------------	-------------	--------------	--------------------

Choix multiple possible

Description de l'habitat	Rue (1)	Parc (9)	Dépôt à neige (17)	Pâturage (25)
	Trottoir (2)	Espace vert (10)	Terrain vague (18)	Boisé (26)
	Boulevard (3)	Terrain fauché (11)	Terrain construction (19)	Friche (27)
	Autoroute (4)	Golf (12)	Emprise H-Q (20)	Clairière (28)
	Ruelle (5)	Gare de triage (13)	Emprise routière (21)	M. Humide (29)
	Terre-plein (6)	Industries (14)	Gazoduc (22)	Stationnement (30)
	Carré d'arbre (7)	Carrière (15)	Voie ferrée (23)	Terrain de jeux (31)
	Piste cyclable (8)	Cours d'école (16)	Terre de culture (24)	Autres (32)

TOPOGRAPHIE	Plat (1)	Ondulé (2)	Accidenté (3)
-------------	----------	------------	---------------

Parcourir le terrain en zigzag et repérer les parcelles (P) infestées
---

Caractériser chacune des parcelles en se référant au tableau de caractérisation (voir verso)
--

# ESSAI DE DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DU RISQUE DE PRÉSENCE DE L'HERBE À POUX (AMBROSIA ARTEMISIIFOLIA) AU QUÉBEC PAR TÉLÉDÉTECTION

## PHASE 2



Par :

Roland Ngom  
Pierre Gosselin

INRS-ETE  
INSPQ, INRS-ETE

Présenté à :

Ouranos et  
l'Institut national de santé publique

**Rapport R1448**

23 août 2013

**INRS**  
Université d'avant-garde

*Institut national  
de santé publique*  
**Québec** 

Roland Ngom, PhD (INRS ETE)  
Dr. Pierre Gosselin (INSPQ, INRS ETE)

Correspondance:

*INRS ETE*

*490, rue de la Couronne*

*Québec QC, G1K 9A9*

*Tel : 418 654-3849*

@: [roland\\_pierre.ngom@ete.inrs.ca](mailto:roland_pierre.ngom@ete.inrs.ca)

**Note:**

**Toute diffusion publique des éléments de ce rapport doit être faite avec l'assentiment de ses auteurs! Merci pour votre bonne compréhension.**

# TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>63</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>65</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>67</b>
1.1 Rappel des enjeux.....	67
1.2 État général de développement du projet en phase 1 .....	67
1.3 Contenu général de la phase 2.....	68
<b>2 DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>69</b>
2.1 Des images Rapid Eye de différentes zones .....	69
2.2 Application de la méthode de prédiction développée en phase 1 à d'autres sites .....	70
2.3 Approfondissement des analyses .....	72
2.3.1 Effets de l'habitat et confusion spectrale.....	72
2.3.2 Optimisation des valeurs d'intervalles de confiance .....	73
2.4 Analyse des performances .....	74
<b>3 RÉSULTATS</b> .....	<b>75</b>
3.1 Corrélations statistiques confirmées .....	75
3.2 Confusion spectrale active au niveau du pixel et variabilité radiométrique .....	77
3.3 Bonnes performances confirmées de la bande verte .....	78
<b>4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>83</b>
<b>PUBLICATIONS</b> .....	<b>85</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>87</b>
<b>ANNEXE 1 : ANALYSE DE VARIANCE</b> .....	<b>89</b>
<b>ANNEXE 2 : PERFORMANCES PRÉDICTIVES DES BANDES SÉLECTIONNÉES</b> .....	<b>91</b>





## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Corrélations significatives de Spearman entre les variables prédictives et la présence observée de l'ambroisie .....75
Tableau 2	Corrélations statistiques significatives entre la présence l'ambroisie avec les variables phytosociales .....76



# LISTE DES FIGURES

Figure 1	Données terrain des quatre nouvelles zones d'étude drapées sur des images Rapid Eye; Granby (a); pointe Nord-est de l'île de Montréal (b); pointe Sud-Ouest de l'île de Montréal (b); Québec.....	70
Figure 2	: Workflow des analyses.....	71
Figure 3	Procédure d'optimisation de l'intervalle de confiance .....	74
Figure 4	Variation des valeurs moyennes radiométriques de l'ambroisie et du NDVI à Granby .....	78
Figure 5	Variation de la réflectance de l'ambroisie dans le vert.....	78
Figure 6	Valeurs médianes des variances de l'ambroisie dans les bandes vertes, rouges et proche infrarouges pour tous les habitats sélectionnés et les produits Rapid Eye de Valleyfield et Worldview 2 de l'île de Montréal (Ngom & Gosselin, 2013).....	79
Figure 7	Performances prédictives des bandes vertes et rouges suivant les valeurs in situ et les valeurs optimisées.....	79
Figure 8	Performances prédictives de la bande verte avec valeurs des intervalles de confiance optimisées; pour la présence de l'ambroisie (a); pour l'absence de l'ambroisie (b); pour la présence et l'absence de l'ambroisie (c) .....	80
Figure 9	Exemple de carte de prédiction pour la pointe Nord-est de l'île de Montréal; prédiction typique sur les bords de route et en milieu plus végétalisé (a); prédiction typique en milieu résidentiel (b) .....	81
Figure 10	Valeurs des variances de l'ambroisie dans les bandes vertes, rouges et le NDVI <sup>1</sup> pour tous les habitats sélectionnés <sup>2 &amp; 3</sup> et les produits Rapid Eye de Valleyfield, Granby et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal.....	89
Figure 11	Valeurs AUC pour les prédictions avec les bandes sélectionnées pour les images Rapid Eye de Valleyfield, Granby, la pointe Nord-est de l'île de Montréal et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal.....	91
Figure 12	Valeurs AUC pour les prédictions avec les valeurs optimisées (intégrant l'ensemble des zones d'études des bandes vertes et rouges pour les images Rapid Eye de Valleyfield, Granby, la pointe Nord-est de l'île de Montréal et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal.....	91
Figure 13	Comparaison des valeurs AUC pour les prédictions avec des valeurs correspondant à la date de prises d'images et les valeurs générales des bandes sélectionnées pour les images Rapid Eye de Valleyfield, Granby, la pointe Nord-est de l'île de Montréal et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal.....	92
Figure 14	Indice de KAPPA pour les prédictions avec les bandes sélectionnées pour les images Rapid Eye de Valleyfield, Granby, la pointe Nord-est de l'île de Montréal et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal.....	92



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Rappel des enjeux

La diminution des effets allergènes de l'herbe à poux est un enjeu de santé publique identifié au Québec. Cet enjeu est d'autant plus important que la présence de l'herbe à poux risque d'être exacerbée sous l'effet des changements climatiques. Il est important de développer des méthodes de surveillance syndromiques intégrant l'analyse des écosystèmes, pour un meilleur contrôle de cette plante et une meilleure prévention de ses effets. Cependant, les méthodes de prévention actuelles restent artisanales et ne permettent pas d'optimiser la surveillance territoriale de l'herbe à poux. L'utilisation des images satellites paraît comme répondant avec satisfaction aux critères de couverture extensive du territoire et de mise à jour d'informations écosystémiques. Le présent projet a pour objectif principal d'explorer les possibilités d'utilisation de la télédétection pour la cartographie de l'herbe à poux au Québec.

## 1.2 État général de développement du projet en phase 1

Une étude préliminaire avait été menée et un rapport de cette étude avait servi de référence pour le dossier de demande de financement à Ouranos. Ce rapport est joint à celui-ci pour toute fin utile. Dans cette première étude, une exploration des possibilités de divers capteurs ayant différentes résolutions radiométriques et spatiales avait été faite afin d'établir la possibilité d'identifier un spectre radiométrique pouvant servir à la localisation de l'herbe à poux. Les premiers résultats montraient un potentiel des bandes optiques du visible et notamment la bande verte (510-590nm) pour prédire avec une certaine stabilité la présence de l'herbe à poux. Cette étude avait permis d'identifier un type de produit (Rapid Eye) présentant des avantages en termes de rapport rendement/prix, dans une perspective d'extension territoriale de la méthode à construire. Cependant, il avait été recommandé d'approfondir les analyses, notamment en testant la première méthode générale à d'autres sites.

### **1.3 Contenu général de la phase 2**

Ce rapport fait un état des lieux des analyses additionnelles faites, des résultats obtenus depuis lors, et des perspectives actuellement en développement et recommandables. La première partie présente les caractéristiques des données additionnelles, les méthodes utilisées pour prédire la présence de l'herbe à poux, des analyses visant à comprendre l'effet de facteurs écosystémiques et physiques sélectionnés sur la qualité et la robustesse de la prédiction. La deuxième partie consiste en la présentation de résultats et à leur interprétation. La troisième partie fait une analyse critique des résultats obtenus à ce stade et présente des pistes et perspectives possibles par rapport à la problématique.

## **2 DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE**

### **2.1 Des images Rapid Eye de différentes zones**

Des images Rapid Eye de quatre sites distincts ont été obtenues par commande prioritaire (figure 1) :

- La ville de Granby (date de prise d'images : 2012-07-30) (figure 1a)
- La pointe Nord-est de l'île de Montréal (date de prise d'images : 2012-07-20) (figure 1b)
- La pointe sud-ouest de l'île de Montréal (date de prise d'images : 2012-07-20) (figure 1c)
- La ville de Québec (date de prise d'images : 2012-07-14) (figure 1d)

En plus des images Rapid Eye de Valleyfield prise le 24 juin 2009.

La pertinence de faire une commande prioritaire réside dans les perspectives d'opérationnalisation de la méthode. Il s'agit de faire une commande d'images à l'avance pour une période précise avant même que le satellite ne passe dans la zone. L'intérêt est de pouvoir les traiter rapidement et obtenir des cartes de prédictions de l'ambrosie avant la période de pollinisation. Les dates de prise d'images pour ces quatre zones ont été décidées en collaboration avec les experts des directions de santé publique des zones concernées ainsi qu'avec l'apport d'experts d'Agriculture Canada. Des mesures terrains synchrones d'identification et localisation de l'ambrosie ont été menées en milieu urbain pour ces quatre sites.

**Figure 1** Données terrain des quatre nouvelles zones d'étude drapées sur des images Rapid Eye; Granby (a); pointe Nord-est de l'île de Montréal (b); pointe Sud-Ouest de l'île de Montréal (c); Québec

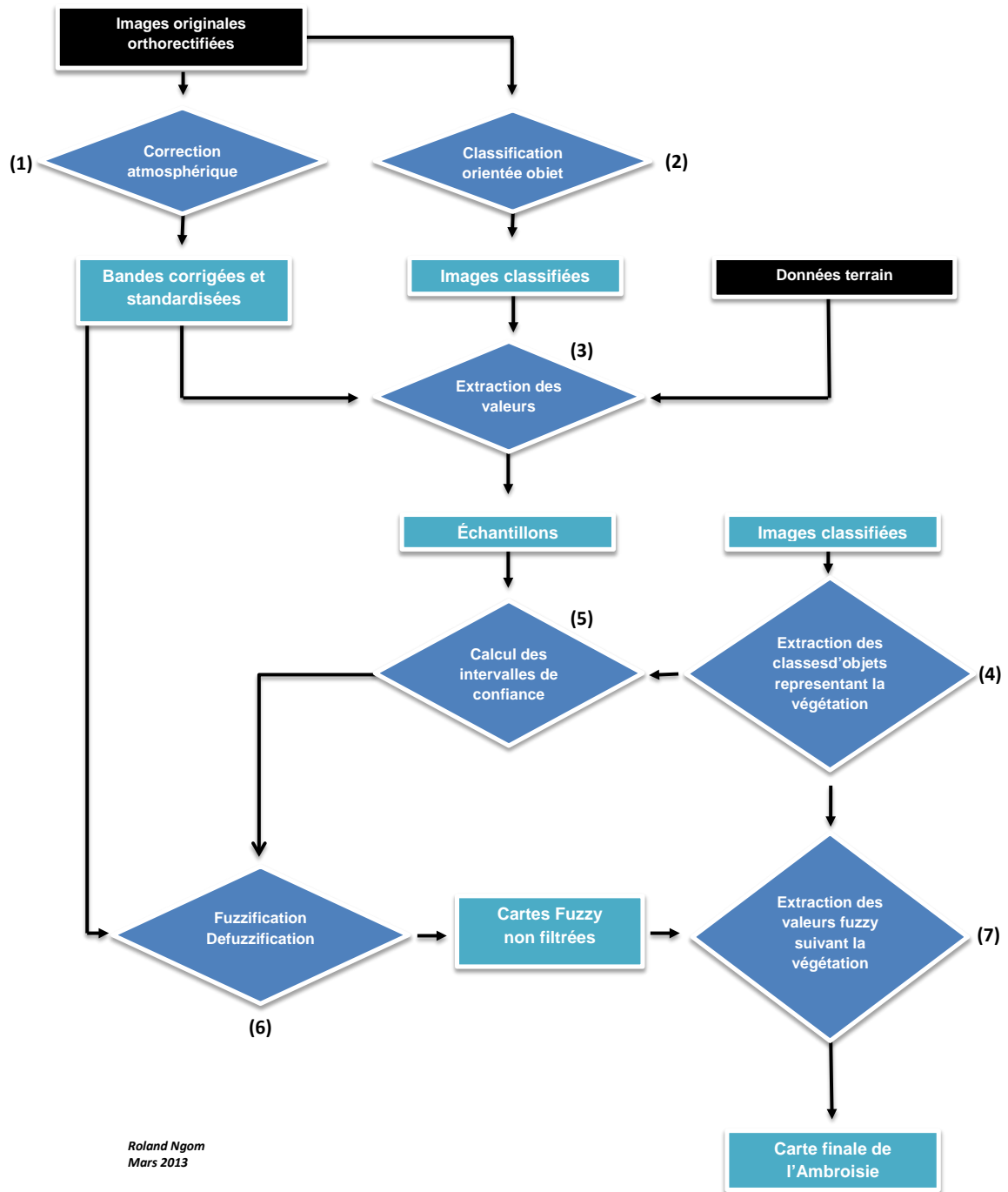


## 2.2 Application de la méthode de prédiction développée en phase 1 à d'autres sites

En général, la méthode décrite dans le premier rapport a été appliquée à chacune de ces images. Un rappel des étapes clés est décrit au travers de la figure 2. Il s'est agi de l'appliquer aux bandes des nouvelles images préalablement identifiées comme ayant un potentiel important pour la prédiction de la présence de l'Ambrosie. Les bandes vertes, rouges, rededge et proche infrarouges ont été utilisées. Comme dans la phase initiale, des analyses de corrélations entre les variables prédictives sélectionnées et la présence de l'Ambrosie ont été faites. Des analyses de corrélations mettant en exergue les facteurs phytosocioécologiques ont été réalisées en supplément.



Figure 2 : Workflow des analyses



Roland Ngom  
Mars 2013

Sept points essentiels points résumant la méthodologie :

- (1) Standardisation des images par le biais d'une correction atmosphérique
- (2) Classification objet orientée des images
- (3) Extraction des valeurs des images standardisées et extraction des valeurs des images classifiées aux données terrain
- (4) Extraction des classes d'objets représentant la végétation
- (5) Calcul des intervalles de confiances traduisant la présence de l'herbe à poux, à partir des échantillons terrains passés par le filtre des classes de végétation. Autrement dit, tous les échantillons supposés représenter la présence de l'herbe à poux doivent au préalable avoir été classés comme faisant partie de la classe végétation. Ceci permet de corriger les erreurs éventuelles dues notamment aux erreurs de mesures GPS.
- (6) Application de la fonction monotone croissante en logique floue aux images standardisées et en fonction des valeurs d'intervalles de confiance. Le choix de cette fonction repose sur la logique que la corrélation entre présence de l'ambrosie et les bandes du visible notamment le vert et le rouge est positive, autrement dit la valeur radiométrique de ces bandes va augmenter avec la présence de l'ambrosie (prière de se référer au premier rapport pour plus de détails)
- (7) Extraction spatiale des valeurs prédites filtrées par les classes d'objets représentant la végétation

Pour plus de détails techniques sur la méthode, prière de se référer au document décrivant les analyses préliminaires.

## **2.3 Approfondissement des analyses**

### **2.3.1 Effets de l'habitat et confusion spectrale**

Une analyse de l'effet de l'habitat sur le spectre radiométrique de l'ambrosie suivant des variations liées à l'écosystème et à la géographie en général a été faite. Elle était basée sur une approche comparative et déductive, incluant notamment les données phytosociales (sociabilité<sup>1</sup>, hauteur, densité) et l'indice de végétation NDVI. Les variances et les valeurs moyennes de l'ambrosie des bandes vertes, rouges et proche infrarouges ont été calculées pour différents types habitats (ceux dans lesquels se trouvaient les échantillons de l'ambrosie). Des tests de Student comparant les moyennes entre zones géographiques d'une part (sachant que leurs images ne correspondent pas toutes à la même période et donc que

---

<sup>1</sup> La sociabilité est le mode de groupement entre eux des individus de chaque espèce

les plantes pourraient se retrouver à différents stades phénologiques) et habitats à l'intérieur d'une même zone géographique ont été appliqués. Des analyses de confusion spectrales des pixels (Endmember et divergence) ont également été réalisées. De même, une analyse de la variabilité radiométrique de l'ambrosie dans différentes bandes suivant la synchronie entre la date de prise d'image et les données terrain a été faite. Cette étape était importante dans le sens qu'elle devait permettre de vérifier des hypothèses quant aux caractéristiques spectrales de l'ambrosie, leur stabilité, et la possibilité de les utiliser dans un modèle opérationnel (Ngom & Gosselin, 2013).

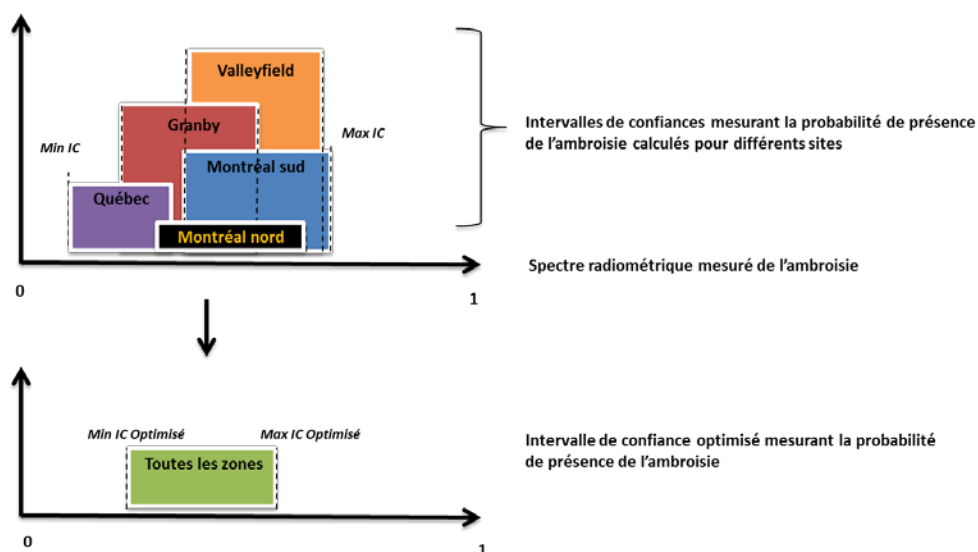
### **2.3.2 Optimisation des valeurs d'intervalles de confiance**

En vue de rendre le modèle extrapolable et de lui permettre de considérer la variabilité générale de l'habitat, un essai d'optimisation du spectre radiométrique de l'ambrosie utilisant les valeurs issues de toutes les images Rapid Eye a été fait, et sa prédictibilité testée. Cette optimisation utilise une agrégation de toutes les données mesurant la présence effective (lorsque la plante est effectivement présente) de l'ambrosie pour les zones couvertes par les images Rapid Eye : Valleyfield (juin 2009), Granby, Montréal (pointe Nord-est et Sud-ouest de l'île) et Beauport. Un intervalle de confiance optimisé est calculé pour ces données agrégées et utilisées comme intrant dans le modèle prédictif en lieu et place des valeurs in situ (par site distinct). L'intérêt d'implémenter une telle approche est multiple :

- L'approche en logique floue est sur une approximation universelle qui aide à réduire les erreurs et différences pouvant être induites par divers facteurs : erreurs de mesure, perturbations atmosphériques et différences géographiques (Benz et coll., 2004).
- La possibilité d'utiliser des images à plus grande couverture géographique pouvant parfois varier au niveau des dates et conditions de prise de vue. Il ressort donc ici un intérêt opérationnel évident : appliquer la méthode à l'ensemble du Québec, ou tout au moins à des zones plus étendues que celles étudiées.

Un essai d'optimisation des valeurs d'intervalles de confiance à la date exacte de prise d'images a également été effectué par site et pour les données agrégées (figure 3). Il faudrait cependant préciser que le calcul d'un intervalle de confiance optimisé a été fait seulement pour la variable prédictive qui avait été identifiée comme étant la plus stable pour prédire la présence de l'herbe à poux, en l'occurrence la bande verte.

Figure 3 Procédure d'optimisation de l'intervalle de confiance



IC : intervalles de confiance

Un essai d'amélioration de la performance prédictive a été fait en introduisant une règle additionnelle dans le modèle en logique floue, qui consistait à faire la somme fuzzy des résultats obtenus à partir des bandes vertes et rouges. Il s'agit d'une fonction croissante qui donne plus d'importance aux zones où le rouge et le vert ont tous les deux prédit la présence de l'ambroisie.

## 2.4 Analyse des performances

Des mesures de performance additionnelles aux mesures de spécificité et sensibilité ont été introduites il s'agit de l'Indice de Kappa et de l'AUC (Area Under Curve). Ces mesures ont été appliquées aux prédictions individuelles<sup>2</sup> sur les sites, ainsi qu'aux prédictions intégrant les valeurs optimisées.

<sup>2</sup> Prédications avec les valeurs calculées à partir des données de chaque site d'étude

### 3 RÉSULTATS

#### 3.1 Corrélations statistiques confirmées

Les résultats actuels confirment systématiquement l'importance du lien statistique entre la bande verte et la présence de l'ambroisie. Les variables ACP (Analyses en Composantes Principales) n'ont pas été considérées, car présentant des risques d'instabilités radiométriques élevés. La bande rouge s'est également révélée comme ayant un lien statistique fréquent mais moins systématique avec la présence de l'ambroisie (tableau 1). La corrélation négative avec le NDVI est également confirmée. Elle révèle que les valeurs radiométriques dans le vert et le rouge augmentent proportionnellement à la diminution des valeurs du NDVI.

**Tableau 1** Corrélations significatives de Spearman entre les variables prédictives et la présence observée de l'ambroisie

Zones d'études	Pointe Nord-est de l'île de Montréal		Pointe Sud-ouest de l'île de Montréal		Granby		Québec	
	Coeff. Corr.	Valeur p	Coeff. Corr.	Valeur p	Coeff. Corr.	Valeur p	Coeff. Corr.	Valeur p
Bande verte	0.54	0	0.09	0.0006	0.13	0	0.16	0.0002
Bande rouge	0.53	0	0.07	0.005	0.09	0.001		
Bande rededge	0.48	0						
Proche infrarouge								
NDVI	-0.53	0	-0.07	0.005			-0.13	0.003
Sociabilité	0.85	0						
Pente	0.92	0						

■ Données pas collectées pour la zone d'étude

Les valeurs du NDVI montrent systématiquement des corrélations négatives avec les valeurs phytosociales (tableau 2). Ces corrélations sont toutefois très élevées pour le site de Montréal Nord-est. Seul le site de Québec montre une corrélation significativement positive entre le NDVI et l'état de l'herbe à poux au moment de l'observation (tableau 2). Ce résultat laisse indiquer que l'herbe à poux serait plus vigoureuse à Québec qu'ailleurs. Cette conclusion n'a de validité que si la qualité des images n'est pas perturbée à un tel point que l'algorithme de correction atmosphérique administrée soit insuffisant pour les corriger.

**Tableau 2** Corrélations statistiques significatives entre la présence l'ambrosie avec les variables phytosociales

Zones d'études	Pointe Nord-est de l'île de Montréal		Pointe Sud-ouest de l'île de Montréal		Granby		Québec	
	Coeff. Corr.	Valeur p	Coeff. Corr.	Valeur p	Coeff. Corr.	Valeur p	Coeff. Corr.	Valeur p
Densité	-0.40*	0	-0.08*	0.002	-0.04**	0.09	-0.13*	0.003
Hauteur	-0.40*	0	-0.06*	0.01	-0.05**	0.08	-0.12*	0.002
Diamètre			-0.07*	0.003	-0.05	0.08	-0.13*	0.002
État de l'herbe à poux <sup>1</sup>			-0.06*	0.02	-0.08	0.002	0.13*	0.002
Superficie colonne	0.44*	0						
Sociabilité	-0.47*	0						
Pente	-0.51*	0						

<sup>1</sup> De moins vigoureux à plus vigoureux

\*95% d'intervalles de confiance

\*\*90% d'intervalles de confiance

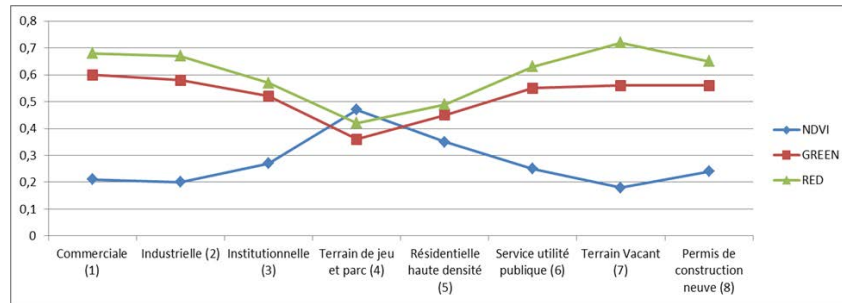
■ Données pas collectées pour la zone d'étude

### 3.2 Confusion spectrale active au niveau du pixel et variabilité radiométrique

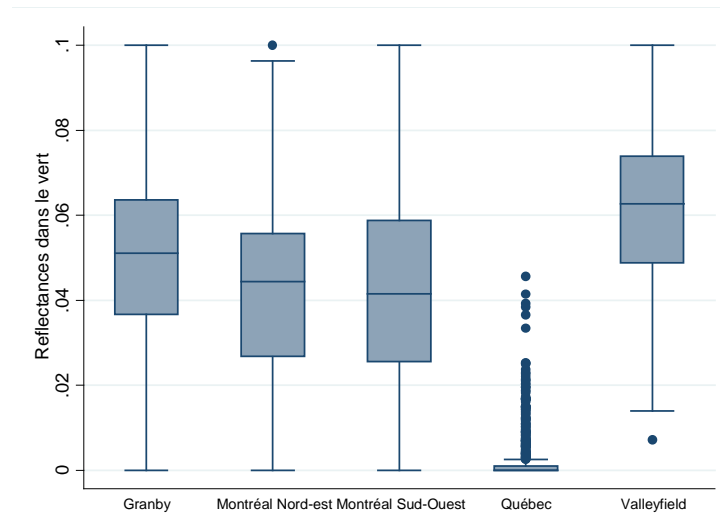
L'indice de séparabilité des pixels montre une tendance des valeurs radiométriques des pixels de l'ambrosie à se confondre aux milieux où les plantes ont été échantillonnées. L'influence des échantillons va se faire ressentir sur les valeurs finales des échantillons pour la zone (figures 4 et 5). En d'autres termes, si pour une zone  $x_1$  donnée, la majorité des échantillons se trouve en milieu asphalté ses valeurs radiométriques pour l'ambrosie seront différentes de la zone  $x_2$  dont la majorité des échantillons se trouvent dans les parcs. De même, l'effet de l'habitat se fera ressentir au sein même d'une zone  $x_1$  ou  $x_2$  avec une variabilité intra zone déterminée par la variété de l'habitat (Ngom & Gosselin, 2013).

C'est ainsi que les tests de Student ont montré des différences souvent significatives entre les valeurs moyennes des zones étudiées. C'est ainsi qu'on notera une différence statistiquement significative entre les valeurs moyennes du NDVI à Montréal (pour les données de 2010) et celles de Valleyfield. Mais on notera également des concordances statistiquement significatives comme celles entre zones résidentielles à Montréal et Valleyfield (Ngom & Gosselin, 2013). De manière générale, la zone de Québec ville est la seule ayant montré des valeurs radiométriques de l'ambrosie très éloignées de celles des autres zones. Toutes choses étant égales par ailleurs, la cohérence avec la corrélation positive et le NDVI s'expliquent ici, sans toutefois justifier de la bonne qualité des données originales de Québec ville. Il va sans dire que l'effet de l'habitat va varier suivant les saisons. Des valeurs radiométriques générales plus basses dans le visible (vert et rouge) témoignent en général d'un environnement plus humide alors que le contraire témoigne d'un environnement plus stressé. La date et les conditions de prise d'image s'avèrent donc être des éléments primordiaux pour toute tentative d'opérationnalisation future. Il s'avère important d'identifier une période précise (de préférence avant pollinisation) pour construire les cartes de prédiction, mais également de s'assurer des conditions météorologiques pour la prise d'images. En effet, la qualité des images peut altérer la cohérence générale des valeurs servant d'intrants pour la prédiction, ce qui pourrait avoir été le cas pour Québec.

**Figure 4** Variation des valeurs moyennes radiométriques de l'ambroisie et du NDVI à Granby



**Figure 5** Variation de la réflectance de l'ambroisie dans le vert

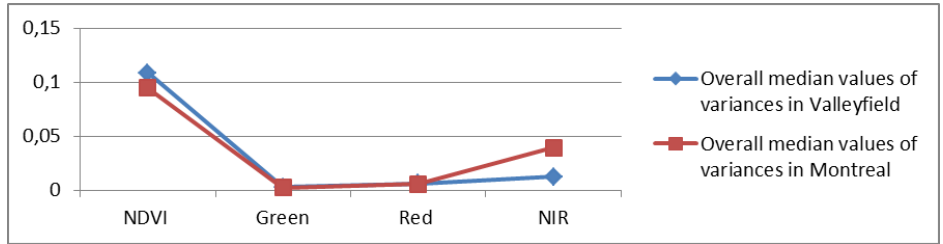


### 3.3 Bonnes performances confirmées de la bande verte

Les études de variances démontrent que la bande verte est celle dont les valeurs varient le moins (figure 6 et annexe 1), confirmant ainsi son potentiel dans la perspective d'une opérationnalisation avec une option de simplicité du système (réduction des intrants).

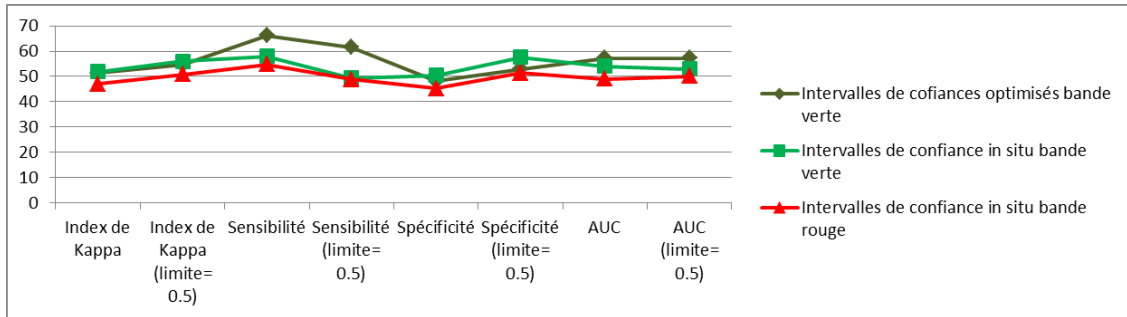


**Figure 6 Valeurs médianes des variances de l'ambrosie dans les bandes vertes, rouges et proche infrarouges pour tous les habitats sélectionnés et les produits Rapid Eye de Valleyfield et Worldview 2 de l'île de Montréal (Ngom & Gosselin, 2013)**

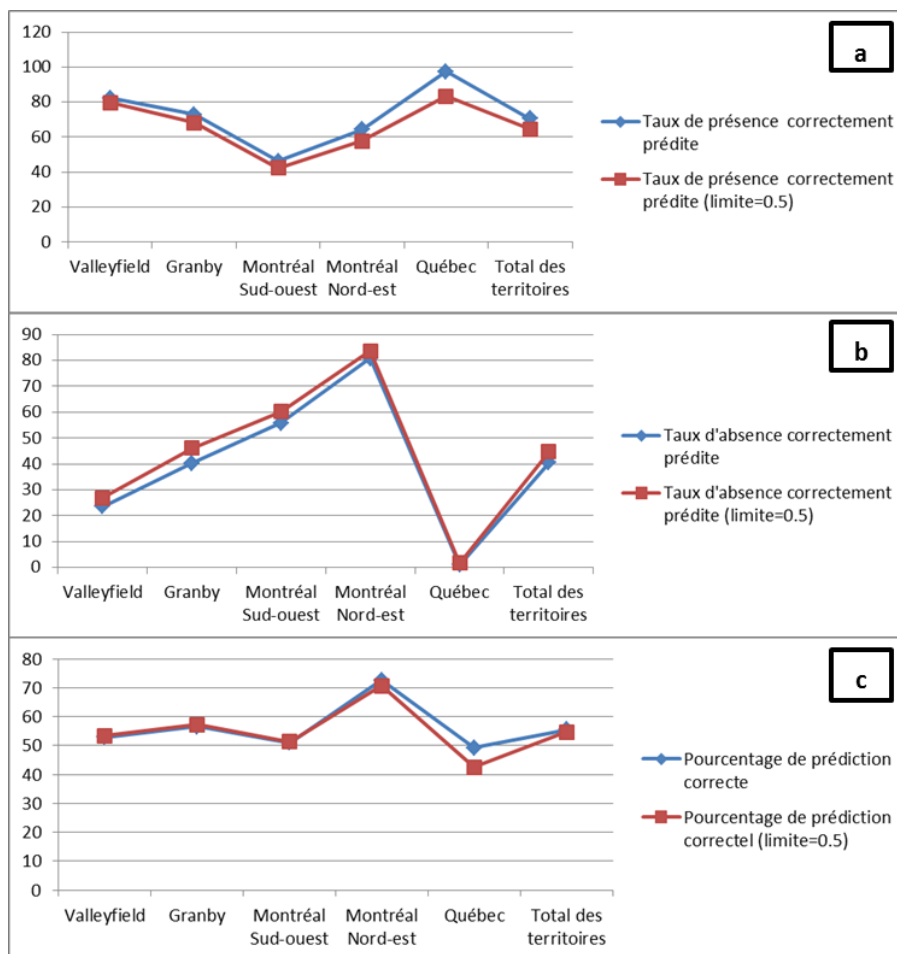


Les performances prédictives de la bande verte restent dans la même lignée que celles de la première étude oscillant autour de 50% et 60% (figure 8), avec cependant une exception pour Montréal Nord-est où toutes les bandes sélectionnées (bande verte, bande rouge en particulier) ont montré une performance avec des valeurs de prédiction systématiquement au-dessus de 60% et allant fréquemment au-delà de 70% (figures 7 et 8 et annexe 2). Ces performances restent inédites vu le domaine d'analyse (Végétation spécifique en milieu urbain).

**Figure 7 Performances prédictives des bandes vertes et rouges suivant les valeurs in situ et les valeurs optimisées**



**Figure 8 Performances prédictives de la bande verte avec valeurs des intervalles de confiance optimisées; pour la présence de l'ambroisie (a); pour l'absence de l'ambroisie (b); pour la présence et l'absence de l'ambroisie (c)**

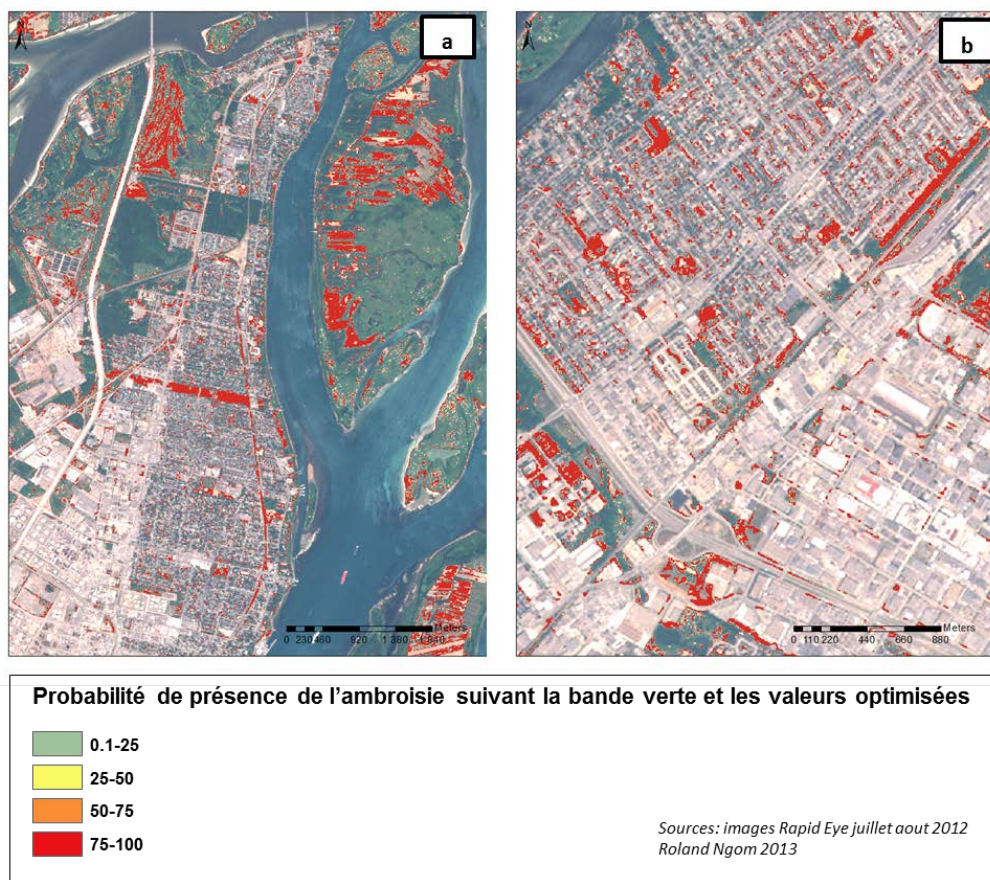


Les performances prédictives radiométriques optimisées sont légèrement moins bonnes que celles des valeurs in situ notamment pour la prédiction de l'absence de l'ambroisie (voir spécificité figure 7 et prédiction de l'absence figure 8), mais elles ont montré un potentiel important pour prédire la présence de l'ambroisie avec constance au-delà des variations géographiques et écosystémiques. En effet, les valeurs d'intervalles de confiance optimisées varient peu lorsque l'on considère les valeurs biaisées de Québec. En d'autres termes, si les valeurs moyennes radiométriques de l'ambroisie varient, elles restent dans un intervalle de confiance qui permet d'obtenir une performance générale de 55% (figure 8). Elles démontrent que le modèle peut faire face aux aléas dus aux conditions de prises d'images et aux

variations écosystémiques souvent mieux que les valeurs radiométriques correspondant aux dates de collectes et de prises d'images in situ.

Le rendu spatial de la prédiction confirme la présence de l'ambroisie aux bords des voies de communication, mais aussi une présence non systématique dans les zones périphériques à fort couvert végétal tel qu'illustré par la carte de prédiction de Montréal Nord-est (figure 9a). Les résultats montrent des «hot spots» en zone résidentielle (figure 9b). La carte permet ainsi une intervention ciblée.

**Figure 9** Exemple de carte de prédiction pour la pointe Nord-est de l'île de Montréal; prédiction typique sur les bords de route et en milieu plus végétalisé (a); prédiction typique en milieu résidentiel (b)





## 4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle en l'état actuel appliqué à des données extrêmement variables en termes de qualité et de géographie, permet des prédictions globales avec des performances correctes autour de 50%-60%, même si ces performances ont dépassé 70% dans le cas de Montréal Nord-est. Il démontre ainsi sa stabilité. Ceci est un progrès en soi dans le domaine, car personne à notre connaissance n'avait tenté de construire un modèle prédictif de l'ambrosie qui pourrait être opérationnalisé pour les milieux urbanisés, qui sont par définition très complexes à modéliser par imagerie satellitale. Nos résultats démontrent d'ailleurs que la bande verte et des images à très hautes résolutions sont nécessaires pour détecter cette herbe même dans les zones à tendance rurale. En effet, les conclusions de Simard et Benoit (2010) sur l'étude de l'ambrosie dans les milieux de culture à Valleyfield décrivant une présence de l'ambrosie plus aux bords des routes que dans les champs et entre les parcelles de cultures valident cette conclusion. Mieux encore une étude menée en chine a également identifié la bande verte comme permettant de distinguer la présence de l'herbe à poux dans les champs de cultures (Hongmu et coll., 2011).

La bande verte paraît comme étant la plus adéquate pour prédire la présence de l'Ambrosie. Cette conclusion est riche d'implications dans une perspective d'opérationnalisation future. En effet, les produits issus du visible ont en général une plus-value en termes de couts d'acquisition et de simplicité des traitements.

Il apparaît important de tenir compte des conditions météorologiques extrêmes, il peut s'avérer nécessaire d'intégrer ou développer des algorithmes de corrections atmosphériques plus sophistiquées (plus complexes) pour corriger les effets météorologiques. Une piste d'amélioration du modèle consiste à intégrer une analyse multicritère dans une première séquence au niveau de l'imagerie satellitale, avant de considérer la fusion avec d'autres sources d'information. Il s'agit d'exploiter la variabilité des habitats, afin d'améliorer les performances du modèle. Les techniques utilisant la connexion topologique des objets spatiaux (qui par ailleurs ont une définition thématique clairement identifiée) peuvent servir à intégrer les facteurs écosystémiques, en particulier la variation de l'habitat. Il faudrait en tous cas tester l'approche pour savoir si elle améliore les résultats actuels. Ceci impliquerait alors la considération de plusieurs spectres (suivant l'habitat). Cette approche aiderait également à pondérer l'effet des échantillons sur la variabilité des mesures radiométriques. Cette étape est

en tous cas conseillée avant toute réflexion sur une opérationnalisation concrète basée uniquement sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire. Une autre piste d'amélioration du modèle serait de considérer que toute mesure in situ aiderait à optimiser l'intervalle de confiance des valeurs radiométriques,

Toutefois, il faut noter que les critères d'analyse des performances des modèles ont été extrêmement sévères, avec l'intégration de mesures telles que la spécificité et la sensibilité basés sur l'utilisation de mesures au GPS (Points) à caractère non professionnel, et donc susceptible d'introduire des erreurs de mesures à précision métrique. En effet, ce n'est pas l'objet résultant de la classification orientée objet qui sert de référence, mais bien les points échantillonnés sur le terrain.

# PUBLICATIONS

## 1 article dans un journal avec comité de lecture :

[1] Ngom, R., Gosselin, P. (In press) Development of a remote sensing-based method to map likelihood of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) presence in urban areas IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS), En ligne. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2254469

## 1 présentation orale :

[2] Ngom, R., Gosselin, P. (Novembre 2012). Essai de développement d'une méthode de cartographie du risque de présence de l'herbe à poux (*Ambrosia artemisiifolia*) au Québec par télédétection. 5e symposium scientifique d'Ouranos 19-21 novembre 2012. Cœur des sciences, Université du Québec à Montréal.

## Articles de presse :

1 interview audiovidéo pour le site «Mon climat ma santé» 19 novembre 2012.

Détecter l'herbe à poux à partir de l'espace

par Éric-Pierre Champagne

La presse + Édition du 29 mai 2013, section ACTUALITÉS, écran 17

[http://plus.lapresse.ca/screens/4cea-6c90-51a52056-9bb0-42f4ac1c606a%7C\\_0](http://plus.lapresse.ca/screens/4cea-6c90-51a52056-9bb0-42f4ac1c606a%7C_0)

Développement d'une méthode de cartographie du risque de présence d'herbe à poux grâce à la télédétection

Par Jean-Daniel Bourgault

Modéré par Vincent JAY

Thématique : Science

Rubrique : Publications

Médiaterre, le système d'information mondial francophone pour le développement durable. Publié le 14/05/13 à 15h29 GMT

<http://www.mediaterre.org/amerique-nord/actu,20130514152940.html>

Allergies : la fleur du mal en sursis ?

Par Valerie Borde

Rubrique Société

L'Actualité du 22 mai 2013

<http://www.lactualite.com/societe/sante/allergies-la-fleur-du-mal-en-sursis%E2%80%89/>

Développement d'une méthode de cartographie du risque de présence d'herbe à poux par Mathilde Renaud 13 mai 2013

Actualités INRS centre Eau Terre Environnement





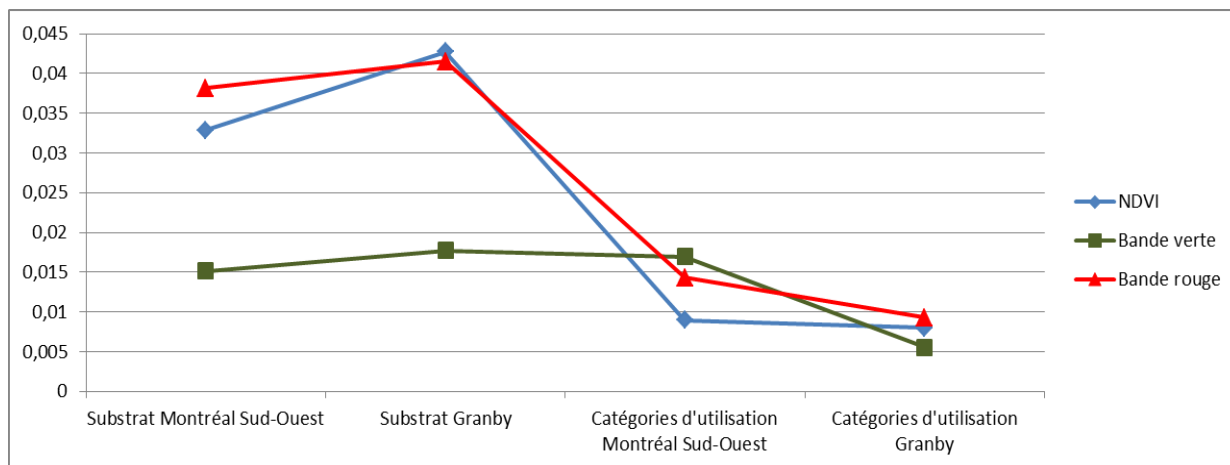
## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Benz, U.C., Hofmann, P., Willhauck, G, Lingenfelder, I., Heynen, M. (2004) *Multi-resolution, object oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information*. ISPRS Journal of photogrammetry & remote Sensing 58, 239-258.
- Hongmu, A., Mengzhu, F., Jianwei, G., Jianying, W., Fanghao (2011) *Evaluation of the control efficiency of flea beetle *Ophraella communa* on ragweed *Ambrosia artemisiifolia* based on canopy imaging spectrometer technique*, Acta Phytolacica Sinic. 03.
- Ngom, R., Gosselin, P. (In press) *Development of a remote sensing-based method to map likelihood of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) presence in Quebec* (manuscrit accepté par IEEE JSTARS).
- Simard, M.J., Benoit, D.L. (2010) «*Distribution and abundance of an allergenic weed, Common Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), in rural settings of southern Québec, Canada*», 27 Canadian Journal of Plant Science, 90, 549-557.



# ANNEXE 1 : ANALYSE DE VARIANCE

Figure 10 Valeurs des variances de l'ambroisie dans les bandes vertes, rouges et le NDVI<sup>1</sup> pour tous les habitats sélectionnés<sup>2 & 3</sup> et les produits Rapid Eye de Valleyfield, Granby et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal



<sup>1</sup> Differenced Normalized Vegetation Index

<sup>2</sup> Substrat : Aménagé, gazon, asphalte, présence autre végétation, gravier, terre, autres

<sup>3</sup> Catégorie d'utilisation : Commerciale, Industrielle, Institutionnelle, Terrain de jeu et parc, Résidentielle haute densité, Service utilité publique, Terrain Vacant, Permis de construction neuve



## ANNEXE 2 : PERFORMANCES PRÉDICTIVES DES BANDES SÉLECTIONNÉES

Figure 11 Valeurs AUC pour les prédictions avec les bandes sélectionnées pour les images Rapid Eye de Valleyfield, Granby, la pointe Nord-est de l'île de Montréal et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal

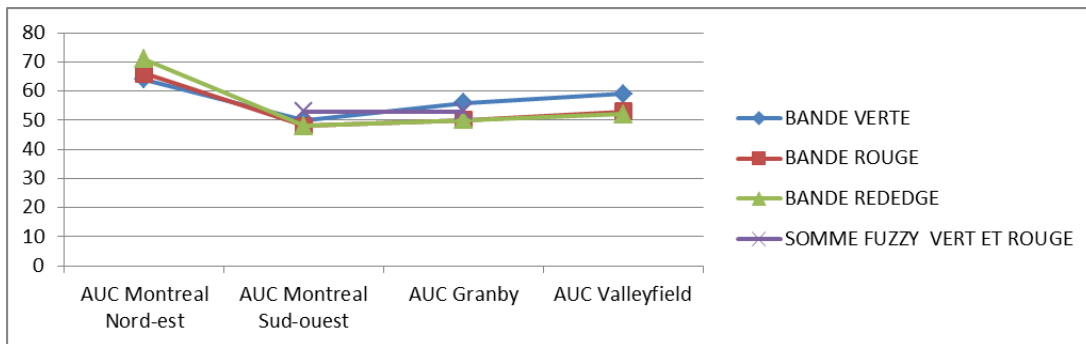
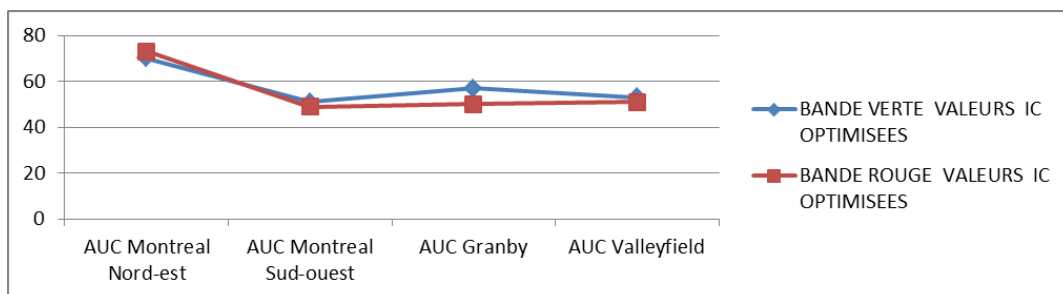
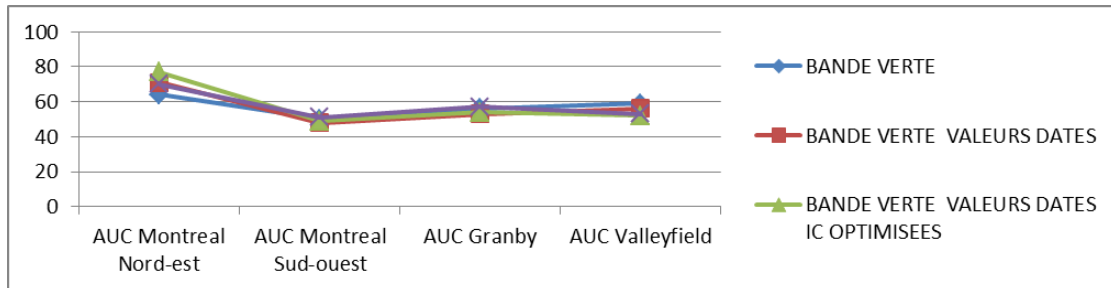


Figure 12 Valeurs AUC pour les prédictions avec les valeurs optimisées (intégrant l'ensemble des zones d'études des bandes vertes et rouges pour les images Rapid Eye de Valleyfield, Granby, la pointe Nord-est de l'île de Montréal et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal



**Figure 13** Comparaison des valeurs AUC pour les prédictions avec des valeurs correspondant à la date de prises d'images et les valeurs générales des bandes sélectionnées pour les images Rapid Eye de Valleyfield, Granby, la pointe Nord-est de l'île de Montréal et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal



**Figure 14** Indice de KAPPA pour les prédictions avec les bandes sélectionnées pour les images Rapid Eye de Valleyfield, Granby, la pointe Nord-est de l'île de Montréal et la pointe Sud-ouest de l'île de Montréal

