

Typologie et caractérisation spatiale de l'envahissement et de la maladie corticale du hêtre en Outaouais



Par : Marie-Ève Roy

Philippe Nolet

Mars 2015



Équipe de rédaction :

Marie-Ève Roy, M.Sc.

Philippe Nolet, M.Sc.

Équipe technique et terrain :

Marie-Ève Roy, M.Sc.

Pascal Rochon, M.Sc.

Régis Pouliot, technicien

Caroline Gagné, Étudiante au doctorat

Coordonnateur scientifique : Philippe Nolet, M.Sc.

Institut des Sciences de la Forêt tempérée

58 Principale, Ripon, Québec, J0V 1V0

Tél : 819-983-6589 ; Fax : 819-983-6588

Courriel : marie-eve.roy@uqo.ca

Site internet : isfort.uqo.ca

Université du Québec en Outaouais

283, boulevard Alexandre-Taché, Gatineau, Québec, J9A 1L8

Remerciements

Ce projet a été rendu possible grâce à une subvention du programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier (PMVRMF) Volet-I du MFFP. Nous remercions aussi grandement nos techniciens et analystes, Pascal Rochon et Régis Pouliot, ainsi que Caroline Gagné et Julie Poirier pour leur participation dans la réalisation des inventaires.

Citation suggérée :

Roy, M-E. et P. Nolet. 2015. Typologie et caractérisation spatiale de l’envahissement et de la maladie corticale du hêtre en Outaouais. Institut des Sciences de la Forêt tempérée. Université du Québec en Outaouais. Ripon, Qc. Rapport technique. 62 p. + Annexes

Résumé

Dans les forêts de l'Outaouais, l'avancée de la maladie corticale du hêtre (MCH) et l'envahissement par le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*) dans les stades de régénération peuvent avoir d'importantes répercussions sur la structure, la composition et la dynamique forestière.

L'outil de description des érablières en termes d'envahissement par le hêtre montre que le type le plus fréquemment rencontré est un peuplement fortement envahi par les gaules et perches de hêtre (plus de 5m²/ha), avec une régénération faible en érable à sucre (moins de 1m²/ha). Les forêts fortement envahies par le hêtre en régénération avec peu d'érable à sucre en sous-étage représentent plus de 57% des parcelles étudiées.

La densité de hêtre est l'un des principaux facteurs qui influencent la densité de la régénération de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) pour les semis, gaules, et perches. Par exemple, la densité de gaule d'érable à sucre est plus faible lorsqu'on retrouve de fortes densités de gaule et perche de hêtre (≥ 4 m²/ha). La densité de gaule d'érable à sucre est aussi plus forte dans la zone infestée. Pour le hêtre, la densité de semis est 2 fois plus faible dans la zone infestée. Aussi, les peuplements sans perturbation récente ont des densités de gaule et perche de hêtre plus faibles (3.5 m²/ha) que les peuplements après coupe partielle (CDL) (5.4 m²/ha) ou après coupe de jardinage (CJ).

La MCH est dans la phase d'avancée dans la région de l'Outaouais. Les zones dites infestées sont localisées principalement à l'est. Des foyers de dépérissement et de mortalité importante des hêtres atteints sont aussi présents. À l'échelle du peuplement, l'intensité de la présence de la cochenille augmente avec l'augmentation du diamètre moyen des hêtres. Dans la zone infestée, le pourcentage moyen de mortalité des tiges de hêtre est 3 fois plus élevé que dans la zone saine (10% vs. 3%). On observe aussi que la mortalité est positivement corrélée avec l'augmentation du diamètre moyen des hêtres dans le peuplement.

La proportion de semis de hêtre d'origine végétatif est plus élevée dans la zone infestée. L'hétérogénéité de la répartition des peuplements en termes d'envahissement par le hêtre est particulièrement importante dans l'est de l'Outaouais.

Résumé	3
Liste des figures	5
Liste des tableaux	6
Liste des cartes	7
1. Introduction	8
2. Approche et méthodologie	9
2.1. Plan d'échantillonnage	9
2.2. Protocole de prise de mesure	10
2.3. Établissement de la typologie des érablières à hêtre	13
2.4. Terminologie pour la caractérisation de la MCH	15
2.5. Validation de la typologie de l'envahissement par le hêtre	16
2.6. Transformations des données et analyses statistiques	17
3. Résultats et discussion	18
3.1. Caractérisation de la MCH en Outaouais	18
3.1.1. Fréquence et répartition de la MCH sur le territoire de l'Outaouais	18
3.1.2. Facteurs qui influence l'intensité de la présence de la cochenille	21
3.1.3. Facteurs qui influence la mortalité des tiges de hêtres	22
3.1.4. Prévisions d'évolution de la MCH en Outaouais	24
3.2. Caractérisation de l'envahissement par le hêtre dans les érablières de l'Outaouais	25
3.2.1. Les facteurs qui influencent la régénération en érable à sucre	28
3.2.2. Les facteurs qui influencent la régénération en hêtre	31
3.3. Liens entre la maladie corticale et l'envahissement par le hêtre	38
3.3.1. L'envahissement par le hêtre dans la zone saine et la zone infestée	38
3.3.2. L'origine des semis (sexués vs végétatifs) en liens avec la MCH	39
3.3.3. Est-ce que la MCH entraîne une augmentation de la régénération en érable ou en hêtre?	40
3.3.4. Indications sur l'avenir des érablières à hêtre de l'Outaouais après la MCH	42
3.3.5. Tendances entre le type de perturbation, l'envahissement et la MCH	43
3.4. Analyse spatiale de la répartition de la MCH et l'envahissement par le hêtre	43
4. Recommandations et conclusion	47
4.1. En liens avec la maladie corticale du hêtre	47
4.2. En liens avec l'envahissement par le hêtre	47
Littérature	49
Les Cartes	52
Annexes	62

Liste des figures

Figure 1. Représentation schématique des parcelles centrales (PET) et satellites (PS).	11
Figure 2. Pourcentage moyen de tiges de hêtre selon le niveau d'infestation	20
Figure 3. Pourcentage de mortalité des tiges de hêtre selon la classe de diamètre.....	21
Figure 4. Indice d'intensité de la présence de la cochenille selon le DHP moyen en hêtre des parcelles dans la zone infestée.	22
Figure 5. Pourcentage de mortalité des tiges de hêtre selon la classe de DHP pour les regroupements de parcelles dans la zone saine et la zone infestée.....	24
Figure 6. Représentation simplifiée de la densité moyenne de petit semis d'érable à sucre selon la surface terrière en érable à sucre et la classe de densité de gaule de hêtre	29
Figure 7. Représentation simplifiée de la densité moyenne de gaule d'érable à sucre selon la zone, la surface terrière en érable à sucre et la classe de densité de gaule et perche de hêtre.....	30
Figure 8. Représentation simplifiée de la densité moyenne de perches d'érable à sucre selon la surface terrière en hêtre	31
Figure 9. Représentation simplifiée de la densité moyenne de petit semis de hêtre selon la zone, la surface terrière en hêtre et le pH	33
Figure 10. Représentation simplifiée de la densité moyenne de grand semis de hêtre selon la surface terrière, le pH et le type de perturbation, ainsi que pour la zone.....	35
Figure 11. Représentation simplifiée de la moyenne de densité de gaule de hêtre en fonction de la zone et du type de perturbation	36
Figure 12. Représentation simplifiée de la densité moyenne de gaule et perche de hêtre selon la zone et le type de perturbation.	37
Figure 13. Ratio de semis d'origine sexué/total (sexué et végétatif) en fonction de l'état de la parcelle, de la densité de semis et du pourcentage de lumière.	40
Figure 14. Changement de pourcentage de densité de régénération de hêtre/ hêtre et d'érable à sucre en fonction de la distance d'une parcelle centrale	46

Liste des tableaux

Tableau 1. Provenances de différentes informations utilisées	10
Tableau 2. Description de la méthode de classification de l'infestation et de l'état des tiges de hêtre.....	12
Tableau 3. Description de la typologie pour la MCH	13
Tableau 4. Densité de semis, gaules et perches de hêtre et d'érable à sucre associée aux différents codes	14
Tableau 5. Description de la typologie pour l'envahissement par le hêtre	14
Tableau 6. Description de la typologie simplifiée de l'envahissement par le hêtre	15
Tableau 7. Occurrence du nombre de parcelles selon les différences observées entre la densité mesurée et celle estimée visuellement à l'aide de la typologie développée.	16
Tableau 8. Liste de variables utilisées pour les analyses statistiques.....	17
Tableau 9. Pourcentage de parcelles représentées par la typologie de la MCH	18
Tableau 10. Pourcentage moyen de tiges de hêtre mortes, dépérissantes, infestées et saines dans les différentes sous-zones	19
Tableau 11. Densité moyenne de tige de hêtre saine par classe de diamètre, pour les zones infestées par la cochenille seulement et celles avec présence de la MCH	20
Tableau 12. Comparaison de modèles pour expliquer l'intensité de la présence de la cochenille.	22
Tableau 13. Comparaison de modèles pour expliquer le pourcentage de mortalité des hêtres.	23
Tableau 14. Résumé d'informations météorologiques sur les grands froids de janvier	25
Tableau 15. Résultats de la typologie de l'envahissement par le hêtre	27
Tableau 16. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de petit semis d'érable à sucre.	28
Tableau 17. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de gaule d'érable à sucre.	29
Tableau 18. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de perche d'érable à sucre.....	31
Tableau 19. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de petit semis de hêtre.	32
Tableau 20. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de grand semis de hêtre.	34
Tableau 21. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de gaule de hêtre.	36
Tableau 22. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de gaule et perche de hêtre.	37
Tableau 23. Pourcentage de parcelle selon les différents niveaux d'envahissement que l'on retrouve dans les différentes sous-zones.	38
Tableau 24. Moyenne du pourcentage de lumière, de la surface terrière, de la surface terrière en perche, du % de couvert en gaule et du pH entre les parcelles saines et infestées.	38
Tableau 25. Résumé des tendances de variation de densité de gaules et semis d'érable et de hêtre entre les parcelles saines et les parcelles infestées.	39

Liste des cartes

Carte 1. Front d'avancée de la cochenille et état d'infestation des hêtres par la maladie corticale en Outaouais, portrait de 2014	52
Carte 2. Surface terrière en tiges de hêtres saines, infestées par la cochenille, avec la MCH et perte de cime, avec la MCH et perte de plus de 75% de la cime et mortes	53
Carte 3. Front d'avancé de la cochenille et état d'infestation des hêtres par la maladie corticale en Outaouais, prévision pour 2020 et 2026 et 2026 avec facteurs abiotiques.	56
Carte 4. Intensité d'infestation des hêtres par la cochenille en Outaouais, portrait de 2014.	57
Carte 5. Surface terrière en tiges de hêtre par classe de taille	58
Carte 6. Pourcentage de mortalité des tiges de hêtre en Outaouais, portrait de 2014.	59
Carte 7. Niveau d'envahissement par le hêtre et de présence de l'érable à sucre	60
Carte 8. Suggestion de récolte de hêtre et de dégagement des gaules de hêtre	61

1. Introduction

Les peuplements d'érablière à hêtre sont touchés par plusieurs problématiques au Québec. Dans la région de l'Outaouais, depuis une dizaine d'années, plusieurs études ont relaté un envahissement par le hêtre en sous-étage (Nolet *et al.* 2008, Duchesne et Ouimet 2009). L'envahissement par le hêtre a été observé en Outaouais spécifiquement, au Québec (Duchesne *et al.* 2005; Gravel, Beaudet & Messier 2011), et aussi dans le nord-est américain (Hane 2003). À la problématique de l'envahissement par le hêtre, s'est ajoutée l'arrivée de la maladie corticale du hêtre (MCH). La maladie corticale du hêtre résulte d'une interaction entre un insecte, la cochenille du hêtre (*Cryptococcus fagisuga* Lindinger), qui n'est pas indigène en Amérique du Nord et un pathogène fongique (2 types indigènes : *Nectria ochroleuca* et *Nectria galligena*; et un type introduit : *Nectria coccinea* var. *faginata*) (Witter *et al.* 2005 dans Nolet 2012). Cette maladie fait déjà des ravages dans plusieurs états américains et dans les provinces maritimes (Houston 1975, McNulty & Masters 2005). La mortalité causée par la MCH ne vient pas régler la problématique de l'envahissement par le hêtre. En présence de la MCH, on observe souvent une régénération très dense en hêtre.

Les problématiques reliées à l'envahissement par le hêtre et la MCH peuvent avoir des conséquences importantes sur les calculs de possibilité en Outaouais. Par exemple, un peuplement ayant été jardiné et ayant recouvré depuis sa surface terrière initiale pourrait se retrouver, suite à une plus forte mortalité chez le hêtre, avec une surface terrière inférieure au seuil minimal accepté pour qu'une coupe soit effectuée (ex. :24m²/ha). Un tel phénomène a pour conséquence de réduire les superficies pouvant être traitées, ainsi que de diminuer le volume (toutes essences) pouvant être récolté en Outaouais. L'envahissement par le hêtre, quant à lui, peut avoir un effet sur la possibilité forestière si les strates envahies sont considérées comme non régénérées. Toutefois, avant même de pouvoir considérer les effets de cette double problématique dans les calculs de possibilité forestière ou d'évaluer les effets des traitements sylvicoles pour y faire face, une typologie des érablières affectées par les problèmes d'envahissement et de MCH à l'échelle régionale s'impose. Pour la MCH, étant donné qu'elle en est à sa première phase et qu'elle provient du sud-est, l'hypothèse est qu'elle serait davantage concentrée dans le sud-est de la région. Pour l'envahissement par le hêtre, bien que nous sachions que ce phénomène est courant en Outaouais, nous ne savons pas comment il se répartit. Aussi, il est important d'identifier les facteurs qui prédisposent aux deux problématiques. La typologie des érablières affectées par les problèmes d'envahissement et de MCH sert deux objectifs principaux, soit de caractériser rapidement un peuplement (quantitativement) sans avoir à faire un inventaire détaillé et de faciliter la communication entre intervenants puisqu'une érablière envahie par le hêtre n'a pas nécessairement la même signification pour tous les forestiers.

Pour la MCH et l'envahissement, il est nécessaire de connaître : 1) **Leur répartition géographique** et la répartition spatiale de l'envahissement à différentes échelles, 2) **L'intensité de la MCH**, la proportion de tiges affectée par niveau d'infestation et par classe de DHP, 3) **L'intensité de l'envahissement**, la densité de tiges de hêtre par stade de développement (semis, gaule, perche) et la densité de régénération en essences désirées (érable à sucre) pour ces mêmes stades.

Ainsi, les objectifs de la présente étude sont:

- Établir une typologie des érablières à hêtre en fonction (1) du degré d'infestation par la MCH et (2) du niveau d'envahissement par le hêtre.
- Déterminer la fréquence de la répartition de ces types sur le territoire de l'Outaouais.
- Déterminer les facteurs (région, latitude, longitude, surface terrière en hêtre, pente, pourcentage de lumière, diamètre moyen des hêtres, historique de perturbation, etc.) qui influencent la répartition et l'intensité de la MCH.
- Déterminer les facteurs qui influencent l'envahissement par le hêtre, ainsi que ceux qui influencent la régénération en érable à sucre, tous deux pour les stades de semis, gaules et perches.
- Vérifier les liens entre la MCH et l'envahissement par le hêtre en vue de mieux comprendre leur interaction.

2. Approche et méthodologie

2.1. Plan d'échantillonnage

Identification des érablières à hêtre

Les érablières à hêtre de l'Outaouais ont été ciblées dans cette étude. Celles-ci sont définies en utilisant des parcelles d'échantillons temporaires (PET) dont la surface terrière en érable à sucre ou hêtre est d'au moins 50% (avec au moins une tige de plus de 9.1 cm au DHP de hêtre). De plus la présence de hêtre devait être plausible, donc ne dépassant pas la limite de distribution nord du hêtre à grandes feuilles. En utilisant ces critères, les érablières à hêtre ont été identifiées et localisées sur système d'information géographique (ArcGIS, ESRI 2009) en utilisant les données des cartes écoforestières du 4^{ème} décennal.

La caractérisation spatiale

Un système d'échantillonnage aléatoire stratifié a été utilisé afin de sélectionner les parcelles d'études. Afin de couvrir les différentes régions de l'Outaouais où les érablières à hêtre sont plausibles, le territoire a été quadrillé en 64 sections selon la latitude et la longitude. Parmi plus de 3000 PET fournies par le Ministère de la faune, des forêts et des parcs (MFFP), un échantillonnage aléatoire a été appliqué afin de sélectionner une paire de PET ((situés à plus de 200 m de distance) établies dans les années 2003-2007 dans des érablières à hêtre par sections (avec au moins 0.5% des PET disponibles). Afin de faciliter l'échantillonnage, les parcelles devaient se trouver à moins de 1.5 km d'un chemin.

Les facteurs potentiellement associés à la répartition et l'intensité de la MCH et de l'envahissement

Outre la localisation spatiale (latitude, longitude), les informations des PET, du modèle d'élévation numérique et des peuplements des cartes écoforestières ont été superposées et regroupées dans une table de donnée (Tableau 1). Un ajout de PET supplémentaires a été effectué parmi les PET présélectionnées afin d'avoir au moins 40 PET par classe potentielle d'envahissement (1- nul ou faible, 2- moyen ou élevé) et au moins 10 PET par classe de pourcentage de couvert en hêtre (1- faible, 2- moyen, 3- élevé) (Tableau 1).

Tableau 1. Provenances de différentes informations utilisées dans la présente étude.

Informations disponibles	Classes utilisées selon les données disponibles	Provenances
Type de perturbation et année d'origine, drainage, pente, type de dépôt	CDL ou CDL plus de 25 ans, CJ moins de 25 ans, CT plus de 25 ans et aucune perturbation récente Mêmes classes ou termes que dans les cartes	Carte écoforestière
Élévation, Pente, Orientation	Mêmes classes ou termes que dans le modèle	Modèle d'élévation numérique
DHP par essences pour toutes les tiges de plus de 2cm de DHP	Pour le potentiel d'envahissement : nul ou faible (0-500 tiges de hêtre/ha), moyen (501-3500 tiges de hêtre/ha), élevé ou très élevé (plus de 3500 tiges de hêtre/ha) Pour le pourcentage de la surface terrière en hêtre des arbres de plus de 9.1cm de DHP: faible 0-10%, moyen 11-20%, élevé plus de 21%	Parcelle d'échantillonnage temporaire

La typologie

Les typologies d'envahissement et de MCH ont été préétablies à partir du dispositif du Lac Gagnon établi en 2006 (Delagrangé *et al.* 2010) qui s'étend sur une superficie de plus de 50 ha et qui couvre une variété de conditions d'envahissement. Les typologies préétablies ont été utilisées pour caractériser plus de 436 parcelles satellites, les mesures directes ont été faites dans les parcelles centrales (109).

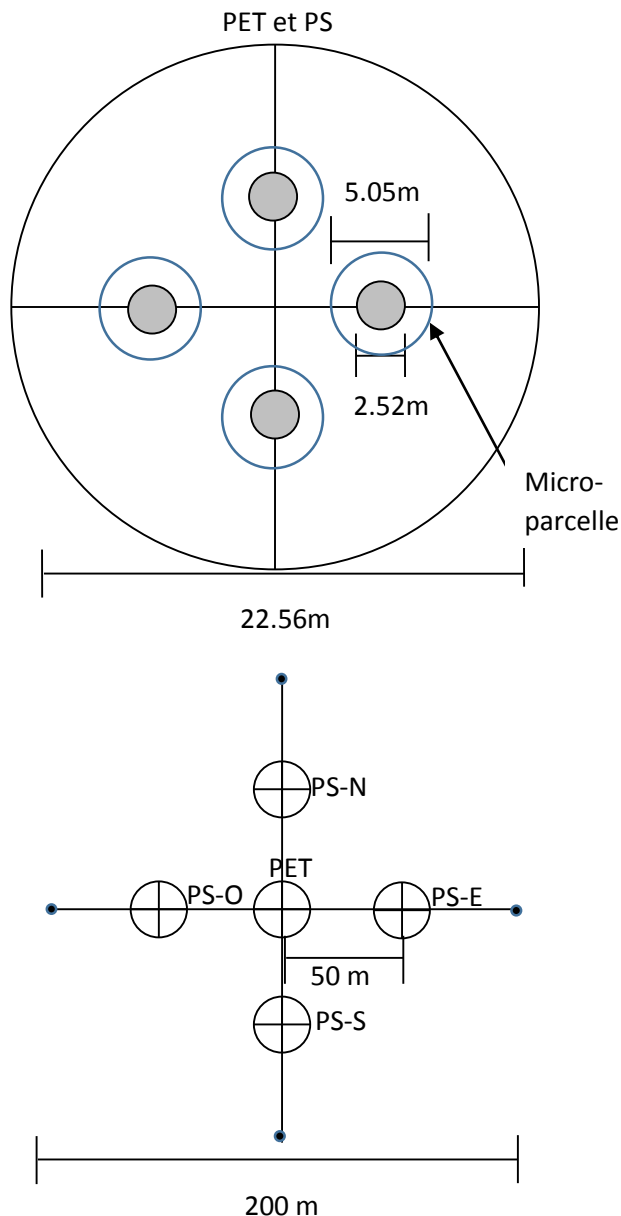
2.2. Protocole de prise de mesure

Nous avons utilisé deux types de parcelles, les parcelles **centrales** et les parcelles **satellites**. Chaque parcelle centrale (circulaire avec 11.28m de rayon) a été associée à 4 parcelles satellites disposées à 50 m de la parcelle centrale selon les axes Nord, Sud, Est, Ouest (Figure 1). Les parcelles satellites ont permis de mieux comprendre la répartition de l'envahissement et d'augmenter la superficie échantillonnée. Pour la totalité des parcelles (545), les hêtres ont été inventoriés (DHP au millimètre près) utilisant des parcelles circulaires de 400m². La surface terrière a été prise à l'aide d'un prisme facteur 2 dans lequel on a effectué le dénombrement des tiges de plus de 9,1cm par essences et par classes de tailles ; perches (DHP 9.1 à 19.9 cm), moyens fûts (DHP 20 à 39,9 cm), gros fûts (DHP 40 à 59,9 cm) et très gros fûts (DHP > 59,9 cm).

Mesure de l'envahissement par le hêtre

D'abord, pour chacune des parcelles centrales (109) des inventaires de semis (4 micro-parcelles de 5m²) et gaules (4 micro-parcelle de 20m²) de hêtre, d'érable à sucre et autres essences forestières d'intérêts ont été effectués (Figure 1). Conformément à la classification du MFFP, une gaule comporte un DHP compris entre 2 et 9.1 cm et une hauteur d'au moins 1.3m, et les semis considérés dans la présente étude ont plus de 10 cm de haut et moins de 2 cm de DHP. Pour les semis, le nombre par essences forestières d'intérêt (hêtre, érable ou autre) a été inventorié. On a distingué les petits semis (entre 10 et 60cm de hauteur) des semis moyens (plus de 60 cm de hauteur, mais moins de 1cm de DHP) et des grands semis (entre 1 et 2cm de DHP). Pour les gaules, le nombre par essences forestières d'intérêt (hêtre, érable ou autre) et classe de taille (2, 4, 6, 8 cm) a été inventorié. Dans les micro-parcelles d'inventaires de gaules, le pourcentage de couvert arbustif en gaule a été estimé, ainsi que le pourcentage de lumière à l'aide d'un densitomètre

concave sphérique à la hauteur de 1.3m. Dans chaque micro-parcelles d'inventaire de semis, le mode de reproduction (drageonnement ou sexué) de 2 tiges de hêtre choisi aléatoirement a été noté. Dans les parcelles satellite, 4 mesures du pourcentage de couvert arbustif en gaule et du pourcentage de lumière, situées à 5m du centre de la parcelle selon les axes Nord, Sud, Est, Ouest, ont été prises.



PET et PS:

Pour tous les hêtres de plus de 9.1cm de DHP : DHP, niveau d'infestation de la maladie (1 à 5) et pour les niveaux 2 et 3 (classe de décompte de colonies)

PET :

Dans les MP (5m²): Nombre de semis par essences d'arbres, le mode de reproduction de 2 hêtres rencontrés

Dans les MP (20m²) : Nombre de gaules par classe de taille et par essences d'arbres, % du couvert arbustif et % de lumière

Au centre : point de prisme et pH (à partir de 2 échantillons de sol)

PS:

Point de prisme au centre

2 mesures du % du couvert arbustif et % de lumière

Figure 1. Représentation schématique des parcelles centrales (PET) et satellites (PS).

Mesure de la maladie corticale du hêtre

Pour chaque tige de hêtre mature (DBH 9.1cm et plus) présente dans la parcelle, le DHP et le niveau d'infestation par la maladie corticale (ou la cochenille) ont été mesurés (Tableau 2). La

méthodologie utilisée est basée sur celle développée par la Direction de l'environnement et de la protection des forêts (DEPF) et la littérature sur la MCH.

Tableau 2. Description de la méthode de classification de l'infestation et de l'état des tiges de hêtre.

Niveau d'infestation	État de la maladie	Mesure complémentaire
1 (Sain)	Pas de signe de l'insecte ou du champignon (<i>Cryptococcus</i> ou <i>Nectria</i>)	Aucune
2 (Présence de cochenille)	<i>Cryptococcus</i> présent, présence de craque dans l'écorce, arbre vigoureux et canopée intacte à plus de 75%	Nombre de colonies de <i>Cryptococcus</i> A= très peu, B= moyen, C= fort, mais pas sur tous les côtés, D= très fort à plusieurs endroits (Indice dans 10cm ² ¹ par classe)
3 (Présence de champignon et perte de cime)	Beaucoup de craque dans l'écorce, présence de chancre dû aux colonies de champignon <i>Nectria</i> , dommage au niveau de la couronne de l'arbre ou perte de branche importante et canopée intacte entre 25 et 75%	Nombre de colonies de <i>Cryptococcus</i> A= très peu, B= moyen, C= fort, mais pas sur tous les côtés, D= très fort à plusieurs endroits (Indice dans 10cm ² par classe)
4 (Perte de plus de 75% de la cime)	Grande abondance de craque dans l'écorce, gros chancre encerclant ou ceinturant l'arbre, dommage important au niveau de la couronne de l'arbre, moins de 25% de la canopée intacte	
5 Mort infesté	Arbre mort sur pied en raison de la MCH	
6 Mort	Arbre mort sans pouvoir identifier la cause	

La cochenille mesure entre 0,5 et 1 mm et se nourrit de la sève (McCullough *et al.* 2005). Son alimentation cause une blessure sur l'écorce, empêchant la cicatrisation due à une substance qu'elle sécrète (Lavallée & Laflamme 2010). Le champignon qui produit des fructifications en grappes de couleur rouge, infestera les blessures causées par l'insecte sur l'écorce (McCullough *et al.* 2005). Le temps écoulé entre l'attaque de la cochenille et l'apparition des périthèces est de 3-6 ans (Lavallée & Laflamme 2010). Le champignon annellera l'arbre et les feuilles des arbres affectées cesseront de croître (deviendront jaunes à brunes).



Photo 1. A) Présence de cire blanche sécréter par la cochenille du hêtre (*Cryptococcus fagisuga* Lindinger) et B) craques sur l'écorce du hêtre. Photo : Marie-Eve Roy.

¹ Localisé afin d'être représentatif de l'infestation de l'arbre (moyen)

2.3. Établissement de la typologie des érablières à hêtre

Pour la maladie corticale du hêtre

La typologie a été faite en tenant compte du **pourcentage de la surface terrière en hêtre** pour les arbres de plus de 9.1cm, du **pourcentage de hêtre atteint** par la MCH, de la **classe de taille** et du **niveau d'infestation** (Tableau 3). Les classes de taille et le niveau d'infestation ont aussi été pris en compte dans les détails des typologies; représentés par le deuxième terme (ex : A3_f2). Pour les parcelles avec au moins une tige de hêtre infestée, on a noté la classe de taille avec le plus grand pourcentage de la surface terrière en hêtre (**p** : perchis (9.1 à 19.9 cm), **f** : fût (plus de 19.9 cm)) et le niveau d'infestation majoritairement rencontré (plus grand % de tiges) soit ; **1** : présence de la cochenille (insecte), perte de cime de moins de 25%, **2** : présence de la MCH (Maladie) et perte de cime de plus de 25%, **3** : mort (Tableau 2 et 3). Ainsi par exemple, un peuplement A1_p2 : est un peuplement avec une surface terrière en hêtre entre 12 et 26, dont moins de 33% des tiges sont affectée; la majorité des tiges affectées sont des perches avec présence de MCH et une perte de cime de plus de 25%.

Tableau 3. Description de la typologie pour la MCH. Description des codes utilisées représentant : la surface terrière en hêtre (A, B, C et D), le % de hêtre atteint (0,1,2 et 3), la classe de taille (p et f) et le niveau d'infestation (1, 2 et 3).

Surface terrière en hêtre (ST)	Code ST	% hêtre atteint	Code % atteint	Perche (p)			Fût (f)		
12 à 26	A	0	0	Insecte(1)	Malade(2)	Mort(3)	Insecte	Malade	Mort
7 à 11	B	moins de 33%	1						
3 à 6	C	33-66%	2						
1 à 2	D	plus de 66%	3						

Pour l'envahissement par le hêtre

La typologie pour l'envahissement par le hêtre a été déterminée à partir de **classes de densité de tiges de hêtre et d'érable à sucre** par **classe de taille**. Les classes de densités sont 0, 1, 2, 3 et 4 (Tableau 4). Ces classes réfèrent à des densités estimées sur le terrain en nb/m² et en m²/ha, selon les valeurs que l'on retrouve au Tableau 4. Les classes de taille pour le hêtre sont gaule (entre 2 et 9.1 cm de DHP), et perche (9.1 à 19.9 cm) et pour l'érable à sucre, les classes semis, gaules et perches. La combinaison des 5 classes de densités pour les différentes classes de tailles pour le hêtre (2) et l'érable à sucre (3) totalise plus d'une centaine de possibilités. Ainsi, à partir des densités estimées pour les différentes tailles pour le hêtre et l'érable, des regroupements ont été faits afin d'obtenir la typologie décrite au Tableau 5. Cette typologie, utilise les termes **1**, **2** et **3** pour référer à l'abondance du hêtre et de l'érable à sucre; **1** représente des densités faibles et **3** des densités fortes. La typologie utilise aussi les termes **g** et **p** pour référer aux classes de tailles *gaule* et *perche* respectivement; **gp** signifie gaule et perche et **g-p** signifie gaule et/ou perche (Tableau 5). Finalement, le premier terme réfère au hêtre et le second (i.e. après « _ ») à l'érable à sucre. Par exemple, un peuplement 3g_1, est un peuplement fortement dominé par des gaules de hêtre et dans lequel il y a une faible régénération d'érable à sucre, tous stades confondus. Les détails de cette typologie et les densités estimées se retrouvent au Tableau 5.

Tableau 4. Densité de semis, gaules et perches de hêtre et d'érable à sucre associée aux différents codes, ainsi que la description de l'estimation terrain de cette densité en nb/m² ou en m²/ha.

Code	0	1	2	3	4
Semis ERS	Total de petit et grand semis entre 0 et 2 inclusivement/rayon de 3,5m	Total de petit et grand semis entre 3 et 10 inclusivement/rayon de 3,5m	Total de petit et grand semis entre 11 et 40 inclusivement, si total de grand semis est entre 0 et 4 inclusivement/rayon de 3,5m	Total de petit et grand semis entre 11 et 40 inclusivement, si total de grand semis est plus grand que 4/rayon de 3,5m	Total de petit et grand semis est de plus de 40/rayon de 3,5m
Gaules ERS et HEG	0-0.01 m²/ha (Pas de gaules visibles/rayon de 3,5m)	0.01-1 m²/ha (DHP 4cm : 1-3 tiges/rayon de 3,5m; DHP 8cm : 1-2 tiges/rayon de 5,75m)	1.01-2 m²/ha (DHP 4cm: 3-6 tiges/rayon de 3,5m; DHP 8cm: 2-4 tiges/rayon de 5,75m)	2.01-4 m²/ha (DHP 4cm: 3-12 tiges/rayon de 2,5m; DHP 8cm: 1-3 tiges/rayon de 2,5m)	Plus de 4 m²/ha (DHP 4cm: plus de 12 tiges/rayon de 2,5m; DHP 8cm: plus de 3 tiges/rayon 2,5m)
Perches ERS et HEG (Estimation DHP 15 cm)	0-0.01 m²/ha (Pas de perches visibles/rayon de 11m)	0.01-1 m²/ha (1-2 tiges/rayon de 11m)	1.01-2 m²/ha (2-5 tiges/rayon de 11m)	2.01-4 m²/ha (1-4 tiges/rayon de 5,75m)	Plus de 4 m²/ha (plus de 4 tiges/rayon de 5,75m; plus de 1 tige/rayon de 2,75m)

Tableau 5. Description de la typologie pour l'envahissement par le hêtre. Code et description des différents types pour l'évaluation de l'envahissement par le hêtre. La densité en gaule et perche de hêtre et d'érable à sucre estimé entre parenthèse est en m²/ha.

Typologie	Description
3gp_1	Très forte présence de gaules et perches de hêtre (> 5), nul à faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 1)
3gp_2g-p	Très forte présence de gaules et perches de hêtre (> 5), présence moyenne d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (entre 1 et 4)
2gp_1	Présence moyenne à forte de gaules (entre 1 et 4) et perches (entre 1 et 4) de hêtre (total : entre 4 et 5), faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 1)
2gp_2g-p	Présence moyenne à forte de gaules (entre 1 et 4) et perches (entre 1 et 4) de hêtre (total : entre 4 et 5), présence moyenne d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (entre 1 et 4)
3g_2g-p	Forte présence de gaules de hêtre (> 2; total entre 2 et 4), présence moyenne ou forte d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 2)
3g_1	Forte présence de gaules de hêtre (> 2; total entre 2 et 4), faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 2)
3gp_3g-p	Forte présence de gaules et perches de hêtre (> 5), forte présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 4)
1gp_1	Présence moyenne à faible de gaules (entre 0.5 ² -1) et perches (entre 0.5-1) de hêtre (total entre 1 et 4), faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 2)
1gp_3g-p	Présence moyenne à faible de gaules (entre 0.5-1) et perches (entre 0.5-1) de hêtre (total entre 1 et 4), présence moyenne à forte d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 4)
1g-p_1g-p	Présence faible à nul de gaule et/ou perche de hêtre (< 1), faible à moyenne présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (entre 0.5 et 4)
1g-p_2g-p	Présence faible à nul de gaule et/ou perche de hêtre (< 1), moyenne à forte présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 4)
2g-p_1g-p	Présence moyenne de gaule ou de perche de hêtre (entre 1 et 4), faible à moyenne présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (entre 0.5 et 4)
2g-p_2g-p	Présence moyenne de gaule (moins de 2) ou de perche (< 2) de hêtre (total entre 1 et 4), moyenne à forte présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 4)
3p_1	Forte présence de perche de hêtre (> 2; total entre 2 et 4), faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 2)
3p_2g-p	Forte présence de perche de hêtre (> 2; total entre 2 et 4), présence moyenne ou forte d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 2)

² La valeur médiane de 0.5 m²/ha du code 1 (Tableau 4) a été utilisée pour cette estimation.

L'analyse spatiale de l'envahissement par le hêtre

L'utilisation d'une typologie plus simplifiée a été utilisée pour la cartographie et les analyses spatiales de l'envahissement (Tableau 6). Les tendances spatiales de distribution de l'envahissement par le hêtre pour les peuplements ont été évaluées pour les peuplements «*très envahis par le hêtre avec peu d'érable à sucre (typologie 1)*» et «*peu envahis par le hêtre avec présence d'érable à sucre (typologie 6)*», parmi l'ensemble des 109 parcelles centrales. Pour toutes les parcelles (centrales et satellites) se trouvant à moins de 50 km d'une parcelle centrale (*typologie 1 ou 6*), la distance les séparant les unes des autres a été calculée (formant ainsi une table de plusieurs milliers de lignes). Cette table met en relation **la distance qui sépare les parcelles les unes des autres**, ainsi que **la différence d'envahissement par le hêtre** que l'on a estimée entre ces parcelles. La différence de densité de «*hêtre/hêtre + érable*» a été calculée. Pour ce dernier calcul, nous avons utilisé les classes de densités en m²/ha de gaules et perches de hêtre et d'érable à sucre estimées sur le terrain. Ensuite, la moyenne et l'écart-type de la densité de «*hêtre/hêtre + érable*» ont été calculés selon les distances (par regroupement de 100m (pour les distances de 100m à 1000m) et par regroupement de 1000m (pour les distances de 1000m à 50000m)).

Tableau 6. Description de la typologie simplifiée pour l'envahissement par le hêtre. Code et description des différents types, pour la typologie simplifiée servant à l'évaluation de l'envahissement par le hêtre en termes de densité en gaule et perche de hêtre et d'érable à sucre.

Typologie	Description	Densité gaule et perche hêtre (m ² /ha)	Densité gaule et perche érable (m ² /ha)
1	Forte présence de hêtre, pas ou peu d'érable	plus de 5	0 à 2
2	Forte présence de hêtre, présence d'érable moyenne ou forte	plus de 5	plus de 2
3	Présence moyenne de hêtre, pas ou peu d'érable	2 à 5	0 à 2
4	Présence moyenne de hêtre, présence moyenne ou forte d'érable	2 à 5	plus de 2
5	Faible présence de hêtre, pas ou peu d'érable	0 à 2	0 à 2
6	Faible présence de hêtre, présence moyenne ou forte d'érable	0 à 2	plus de 2

2.4. Terminologie pour la caractérisation de la MCH

Deux zones sont identifiées dans la présente étude, soit la **zone saine**, qui correspond à l'ensemble des regroupements de parcelles avec absence de la cochenille et du champignon (donc absence de la MCH), et la **zone infestée**. La zone infestée est divisée en trois, selon le développement et la progression de l'infestation par la cochenille et de la MCH: les sous-zones d'invasion, de destruction et de dévastation. La sous-zone d'invasion fait référence aux peuplements dont les arbres sont seulement infestés par la cochenille, mais pas par les champignons. Les peuplements peuvent être infestés par la cochenille pendant plusieurs années avant que le champignon n'infeste les arbres et que la maladie corticale n'apparaisse (Witter *et al.* 2005, Shigo, 1972). La sous-zone de destruction fait référence aux peuplements où les

populations de cochenille sont élevées et où l'infection due au champignon est présente (donc présence de la MCH); c'est là que l'on commence à observer de la mortalité chez les arbres (McCullough *et al.* 2005). La sous-zone de dévastation fait référence aux peuplements qui subissent une forte mortalité du hêtre; elle est déterminée dans la présente étude par une majorité des tiges de hêtre dans le stade 4 et 5 (Tableau 2).

Nous avons voulu modéliser l'avancée de la MCH et des différentes zones afin d'avoir une idée des secteurs qui seront touchés à court terme (jusqu'en 2026). Pour ce faire, nous avons utilisé la valeur médiane des valeurs que l'on retrouve dans la littérature pour **prédire l'avancée de la cochenille** (soit 10 km/année), ainsi que les valeurs que l'on retrouve pour **prédire le temps entre la colonisation par la cochenille et l'arrivée de la MCH** (soit moins de 6 ans). D'après Wieferich *et al.* (2011), la cochenille du hêtre peut se disperser à une vitesse allant jusqu'à 14 km/année, d'autres études mentionnent des vitesses égales et inférieures à 10 km/année (Witter *et al.* 2005, Shigo, 1972 dans Nolet *et al.* 2012). Une zone de tampon qui croît annuellement (de quelque km) a été appliquée, centrée sur les sous-zones de dévastation en 2014, afin d'évaluer l'avancée de ces sous-zones dans le temps.

2.5. Validation de la typologie de l'envahissement par le hêtre

Nous avons comparé l'information issue de la reconnaissance du type d'érablière envahie (caractérisation visuelle) à celle d'un inventaire quantitatif, afin de vérifier la valeur de la prise de donnée visuelle. On observe que pour la grande majorité des parcelles, la **densité estimée** est égale ou $\pm 1\text{m}^2/\text{ha}$ de la **densité réelle mesurée** (en vert et gris dans le tableau 7). En effet, l'écart entre les valeurs de densité mesurées quantitativement et celles estimées visuellement est égal ou $\pm 1\text{m}^2/\text{ha}$ pour près de 93% des parcelles. Nous en concluons que cette méthode est assez précise pour des études de caractérisation sur de grands territoires de phénomènes comme l'envahissement par le hêtre. Cette méthode d'estimation présente l'avantage de mesurer beaucoup plus rapidement (estimation de 8 fois plus rapide) des densités d'érable et de hêtre de différente taille dans une parcelle donnée.

Tableau 7. Occurrence du nombre de parcelles selon les différences observées entre la densité de perches de hêtre mesurée et celle estimée visuellement à l'aide de la typologie développée.

	Densité de perche de hêtre estimée (typologie) m^2/ha				
	0	1	2	3	4
0	70	13	10	3	
1	10	75	29	11	
2	1	26	45	24	2
3	2	10	31	27	15
4			1	9	22

2.6. Transformations des données et analyses statistiques

L'intensité de l'infestation par la cochenille est calculée en multipliant la proportion de tiges de hêtre vivantes qui sont affectées par la présence de la cochenille dans chaque parcelle, par la proportion de tige (A, B, C ou D : Description au Tableau 2), avec un facteur de conversion ($A*1$, $B*2$, $C*4$, $D*8$), qui fait référence à la densité de cochenille sur le tronc des hêtres.

Dans les parcelles centrales et satellites les densités de gaules et perches de hêtre ont été additionnées afin d'estimer globalement l'envahissement par le hêtre en m^2/ha . En plus des mesures d'infestations (zones, intensité, mortalité), plusieurs variables ont été mesurées et analysées en liens avec la MCH (Tableau 8).

Tableau 8. Liste de variables utilisées pour les analyses statistiques.

Variables pour les parcelles centrales	Variables pour les parcelles satellites
Mesure unique au centre: la latitude, la longitude, le pH, la perturbation, l'élévation, la pente, le DHP moyen des hêtres de la parcelle, la surface terrière (total, en hêtre, en érable à sucre, en perche de hêtre, en perche d'érable à sucre, en perche total, en fût d'érable, en fûts de hêtre, en fût total)	Mesure unique au centre: la latitude, la longitude, le pH, la perturbation, l'élévation, la pente, le DHP moyen des hêtres de la parcelle, la surface terrière (total, en hêtre, en érable à sucre, en perche de hêtre, en perche d'érable à sucre, en perche total, en fût d'érable, en fûts de hêtre, en fût total)
Mesuré en regroupant les données des 4 micro-parcelles : la densité (m^2/ha) en gaules de hêtre, d'érable et total, la densité (nb/m^2) de petits et grands semis de hêtre, d'érable et total, le pourcentage moyen de lumière et le pourcentage moyen de gaule	Mesuré en regroupant les données de 2 micro-parcelles : le pourcentage moyen de lumière et le pourcentage moyen de gaule

Les différentes analyses statistiques correspondent à une approche de **comparaison de modèles linéaires mixtes** (i.e. combinant des effets fixes et des effets aléatoires) avec le but de déterminer quel modèle parmi l'ensemble testé, expliquait le mieux la variabilité de nos données. Le numéro de la parcelle (incluant 5 parcelles) a été mis en facteur aléatoire afin d'éviter la pseudo-réplication. Plusieurs variables ont été considérées parmi la liste de variables mesurées (Tableau 8) et des modèles ont été testés et comparés selon la méthode de Anderson *et al.* (2000). Parmi les variables explicatives testées, 3 à 4 de celles-ci ont été retenues pour faire les modèles statistiques, selon les hypothèses de départ et les résultats des pré-analyses. Les modèles (complets, nuls, uniques, interactions et l'addition) avec ces variables et leurs possibles interactions ont été testées. Cependant, à des fins de simplification, seuls certains modèles sont présentés dans le corps du texte. Dans les tableaux 12, 13, et 16 à 22, une liste simplifiée des modèles a été dressée. La description de cette approche et des tableaux qui en découlent est présentée en Annexe. L'ensemble des analyses statistiques a été fait avec le logiciel R. Afin de s'approcher de la normalité des résidus et des autres critères d'utilisation de tests statistiques, certaines variables ont été transformées (racine carrée et $\log(x+1)$). Le choix des tests statistiques et des transformations sont indiqués en Annexe (Annexe_Tableau 1).

3. Résultats et discussion

3.1. Caractérisation de la MCH en Outaouais

3.1.1. Fréquence et répartition de la MCH sur le territoire de l'Outaouais

La MCH est dans la phase d'avancée dans la région de l'Outaouais, en 2014 (Carte 1). Le front d'avancée de la cochenille se trouve actuellement à l'ouest du Lac des Trente-et-un-Milles et du Réservoir Poisson Blanc. La zone infestée est localisée principalement au sud-est de l'Outaouais. Les peuplements inventoriés de la région de la MRC de Papineau sont presque tous touchés par la présence de la cochenille et plusieurs par la MCH (Carte 1). Actuellement, plusieurs régions et peuplements de hêtre dans l'ouest et le nord de l'Outaouais sont encore sains, c'est-à-dire sans présence de la cochenille ou de la MCH (Carte 1). Au total, plus de la moitié (58%) des parcelles inventoriées en Outaouais étaient saines.

Sur le territoire de l'Outaouais en 2014, on retrouve plusieurs peuplements sains avec une forte ou très forte surface terrière en hêtre, soit le type A0 (16%) et B0 (12%), représentant ensemble 28% des parcelles rencontrées (Tableau 9). On observe aussi, pour la totalité des 545 parcelles analysées, qu'aucune parcelle avec une forte surface terrière en hêtre (≥ 12) n'est dominée par des tiges malades ou mortes (i.e. les types suivants ne sont pas représentés sur le territoire : A3_p2, A3_p3, A3_f2 et A3_f3) (Tableau 9 et Carte 2).

Tableau 9. Pourcentage de parcelles représentées par la typologie de la MCH.

ST	% tiges atteintes	Sain		Insecte		Malade		Mort	
		perches	fûts	perches	fûts	perches	fûts	perches	fûts
A	0	4.40%	11.74%						
	1			0.18%	0.73%	0.18%			0.18%
	2			0.73%	0.73%	0.18%			0.18%
	3			0.92%	1.83%				
B	0	5.69%	6.79%						
	1			1.65%	0.73%				
	2			1.28%	0.92%			0.18%	
	3			3.12%	1.47%		0.37%	0.18%	0.18%
C	0	6.79%	6.42%						
	1			1.65%	1.10%			0.37%	0.18%
	2			1.47%	1.83%	0.73%	1.10%	0.18%	
	3		0.18%	1.83%	0.92%	0.18%	0.92%		0.37%
D	0	4.95%	4.04%						
	1			0.55%	0.55%			0.18%	0.18%
	2			0.18%	1.10%			0.37%	0.55%
	3		0.18%	1.10%	1.83%		0.18%	0.18%	0.92%
Total général		21.83%	29.36%	14.68%	13.76%	1.28%	2.57%	1.65%	2.75%

Gaules ³	12%
---------------------	-----

Légende. Détail du pourcentage de parcelles pour l'évaluation de la typologie selon la dominance des tiges de hêtre en perches (code : p) et en fûts (code : f) et pour les parcelles infestées : l'état dominant des tiges (présence de l'insecte (Insecte, code : 1), présence de l'insecte et du champignon (Malade, code : 2) ou (Mort, code : 3)).

³ Le code gaules indique des parcelles avec présence de gaules de hêtre, mais avec une surface terrière en perches et fûts de hêtre très faible.

Le type le plus fréquemment rencontré, soit A0_f (12%), est un peuplement sain avec une surface terrière de plus de 12 m²/ha dominée par les fûts de hêtre. Dans la zone infestée, le type le plus fréquent (B3_p1) est un peuplement dominé par les perches et infesté par la cochenille, avec une surface terrière entre 7 et 11 m²/ha, dont plus de 66% des tiges sont atteintes (Tableau 9). La typologie montre que les parcelles dont la surface terrière en hêtre est dominée par des tiges dépérissantes⁴ ou mortes, représentent seulement 8% des parcelles inventoriées (45/545).

Lorsqu'on regroupe les différents types, on peut voir que dans la zone infestée, une grande proportion des hêtres sont atteints par la cochenille seulement (i.e. pas encore par la MCH) (Carte 2, Tableau 10). Des foyers d'infestations avec des hêtres atteints par la MCH et ceux qui présentent des pertes de cimes importantes et une forte mortalité sont aussi présents dans le sud-est de l'Outaouais (Carte 2); ces sous-zones sont considérées comme sous-zones de destructions et de dévastations. Dans ces sous-zones, les pourcentages moyens de tiges (de plus de 9.1 cm de DHP) de hêtre dépérissantes⁵ et mortes sont de plus de 30% et 10% respectivement (Tableau 10).

Tableau 10. Pourcentage moyen de tiges de hêtre mortes, dépérissantes, infestées et saines dans les différentes sous-zones pour les 545 parcelles.

Zones	Sous-zones	Tiges mortes (%)	Tiges dépérissantes (%)	Tiges infestées (%)	Tiges saines (%)
Saine		3,0			97,0
Infestée	Invasion	8,3		52,0	59,7
	Destruction	10,4	30,3	67,8	22,8
	Dévastation	31,9	36	52,6	15,5

Aussi, le portrait actuel montre que l'on retrouve encore beaucoup de tiges saines dans les sous-zones d'invasion (Insecte) et dans les sous-zones de destruction et dévastation (Maladie) (Carte 2 et Tableau 10). Cependant, la grande majorité de ces tiges sont des perches (Tableau 11). En effet, en présence de la MCH, on retrouve en moyenne une densité de 2.91 m²/ha de perches saines de hêtre, comparativement à 0.41 m²/ha de moyens et gros fûts sains de hêtre. Dans la zone infestée, seulement 4% des tiges vivantes de hêtres de plus de 20cm de DHP n'avaient pas de signe de la présence de l'insecte et/ou de la MCH. Dans la littérature, on note qu'environ 1% des tiges de hêtres ont une résistance due à de faible concentration d'azote dans l'écorce (Houston 1994, Houston and Houston 2000), la concentration en azote étant un facteur limitant pour plusieurs populations de cochenilles (Wargo 1988, Houston 1994, Krabel and Petercord 2000, Motchula et Buddle 2009).

⁴ Fait référence aux codes 3 et 4 dans le tableau 2

⁵ Fait référence aux codes 3 et 4 dans le Tableau 2

Tableau 11. Densité moyenne de tige de hêtre saine par classe de diamètre (DHP cm), pour les zones infestées par la cochenille seulement et celles avec présence de la MCH, portrait de 2014 en Outaouais.

	DHP 10-20	20-30	30-40	Plus de 40
Moyenne de la densité (m ² /ha) de tiges de hêtre saine pour la zone d'invasion (cochenille seulement) (n= 115)	6,57	0,99	0,26	0,16
Moyenne de la densité (m ² /ha) de tiges de hêtre saine pour les zones de destruction et dévastation (MCH) (n= 87)	2,91	0,26	0,08	0,07

Dans les peuplements de la sous-zone dévastée, la mortalité des tiges de hêtre est de plus de 31%, comparativement à 3% dans les peuplements sains (Tableau 10). Le pourcentage de tiges infestées, ainsi que la mortalité des tiges varient entre les zones, mais aussi selon le DHP des tiges de hêtre (Figure 2). La mortalité est plus importante pour les plus grandes classes de DHP. On observe aussi que pour les plus petits DHP, il y a une plus grande proportion de tiges saines.

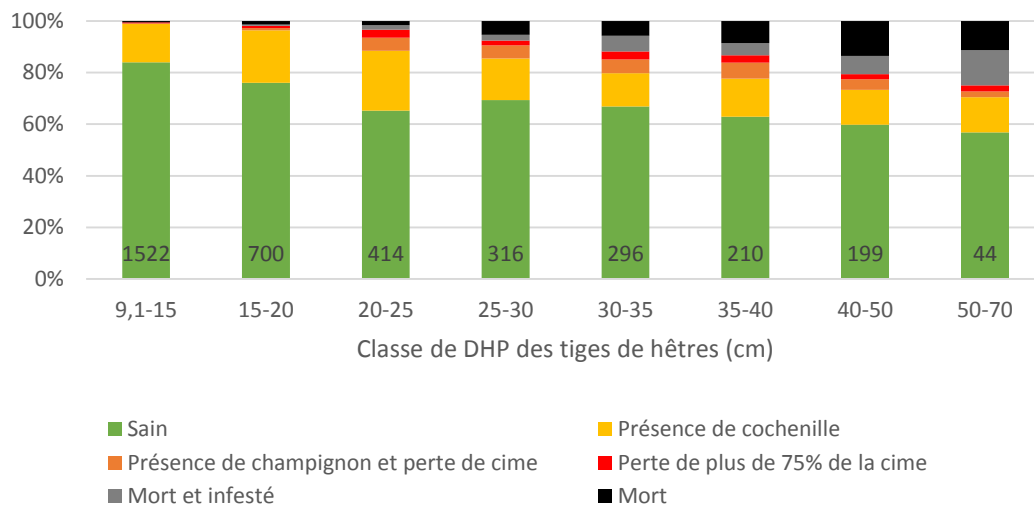


Figure 2. Pourcentage moyen de tiges de hêtre selon le niveau d'infestation (détails tableau 2), pour les 545 parcelles, par classe de diamètre (DHP). Les chiffres dans les colonnes représentent le nombre de tiges de hêtre mesurées par classe de diamètre.

Si l'on compare la zone saine avec la zone non-saine ou infestée (i.e. sous-zones d'invasion, de destruction et de dévastation), on observe que dans la zone infestée, le pourcentage de mortalité des tiges de hêtre de fort diamètre est important, soit près de 25% pour des diamètres entre 30-40 cm et de 37% pour des diamètres ≥ 40 cm (Figure 3). En effet, dans la zone infestée, plus d'une tige sur 4 de hêtre de diamètre ≥ 30 cm est morte. Ce pourcentage étant beaucoup plus faible dans la zone saine.

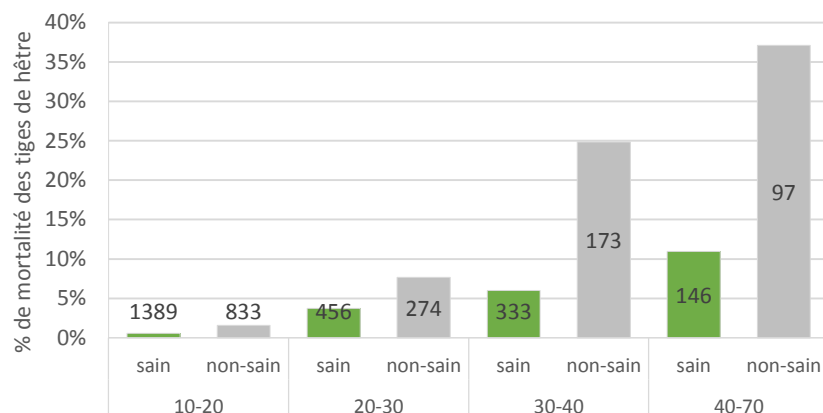


Figure 3. Pourcentage de mortalité des tiges de hêtre selon la classe de diamètre (DHP) pour l'ensemble des parcelles saines (sain) et infestées (non-sain). Les chiffres en haut des colonnes représentent le nombre de tiges de hêtre mesurées dans les différentes catégories.

Pour ce qui est de la cochenille seulement, l'intensité de celle-ci varie à l'intérieur de la zone infestée en Outaouais (Carte 4). Des zones de très fortes intensités de présence de la cochenille sont présentes dans la réserve faunique Papineau-Labelle (notamment à la limite nord entre l'Outaouais et les Laurentides), ainsi qu'entre Val-des-Monts et le sud du réservoir Poisson blanc.

3.1.2. Facteurs qui influence l'intensité de la présence de la cochenille

Parmi la liste de variables, le diamètre moyen des hêtres de la parcelle, la pente et la surface terrière en hêtre sont les variables présélectionnées pour faire les modèles (Tableau 12). Parmi les modèles testés, on note que la principale variable explicative est le diamètre moyen des hêtres de la parcelle (poids =98%), le modèle 1 étant largement le meilleur modèle testé (Tableau 12). Ainsi, on observe que l'intensité de la présence de la cochenille augmente avec l'augmentation du diamètre moyen des hêtres (Figure 4). Ces résultats concordent avec la littérature, (McNulty & Masters 2005, Forrester *et al.* 2003, Van Leaven & Evans 2005). Dans la littérature, on mentionne que la vulnérabilité des arbres à l'infestation dépend de plusieurs facteurs, dont leur âge (Griffin *et al.* 2003, Latty *et al.* 2003, Wiggins *et al.* 2004), leur taille, leur vigueur et leur niveau de stress (Witter *et al.* 2005). On suggère que les arbres plus gros ont plus de crevasses où la cochenille peut s'abriter (Houston and Valentine 1988, Wainhouse *et al.* 1988, Houston 1994). De plus, il est mentionné que les arbres formant le couvert forestier sont plus vulnérables à la MCH que ceux sous-couvert en raison de leurs taux de croissance plus rapide et leurs écorces plus minces (Wainhouse *et al.* 1988) : l'écorce plus mince peut faciliter la pénétration du stylet de la cochenille.

La Carte 5, montrant la surface terrière de hêtre selon les classes de tailles, permet de détecter au niveau du paysage, des zones avec une forte proportion de moyennes et grosses tiges, comme étant des zones possiblement plus vulnérable à la MCH. Dans la présente étude, il n'a pas été démontré d'effet du pH sur l'intensité de la présence de la cochenille (Annexe. Figure 1B), contrairement à d'autres études au sud-ouest du Québec (Motchula & Buddle 2009).

Tableau 12. Comparaison de modèles pour expliquer l'intensité de la présence de la cochenille.

	ID	K	AICc	Wt(%)	HYPOTHÈSES
DHP	1	3	557	98	L'intensité de la présence de la cochenille est plus forte sur des hêtres plus âgés et plus gros (écorce plus mince, plus de fentes, différente concentration de nutriments).
pente	2	3	576	0	L'intensité de la présence de la cochenille est plus faible sur des pentes fortes (l'exposition aux vents/pluies)
ST_H	3	3	579	0	L'intensité de la présence de la cochenille est plus forte pour des parcelles avec de plus forte surface terrière en hêtre
DHP+pente+ ST_H	4	5	572	0	Addition des hypothèses 1, 2 et 3
DHP+ST_H	5	4	565	2	Addition des hypothèses 1 et 3
DHP*ST_H	6	5	577	0	L'intensité de la présence de la cochenille augmente lorsqu'il y a une plus forte présence de gros hêtres

Valeur des paramètres du modèle 1	Value	Std.Error
Intercept	0,08328269	0,2605305
DHP	0,05657924	0,0113043

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire avec effets-mixtes (LME) avec l'effet aléatoire de la parcelle et comparaison de modèle. Les hypothèses correspondantes sont celles associées à la variable d'intérêt : Intensité de la présence de la cochenille d'une parcelle dans la zone infestée. Code : ST_H = Surface terrière en hêtre, DHP = Diamètre moyen des hêtres. Explication du tableau : La première colonne comprend la liste simplifiée des modèles testés, le ID représente son identifiant, la colonne K représente le nombre de paramètre estimés, la valeur d'AIC (Akaike information criterion) corrigée (AICc) est un indice qui permet de comparer les modèles entre eux : plus la valeur est faible meilleur est le modèle; Wt représente le poids du modèle par rapport aux autres modèles testés et peut s'interpréter comme étant la probabilité (%) que ledit modèle soit le meilleur. Les meilleurs modèles (avec un Wt $\geq 15\%$) sont représentés en gras.

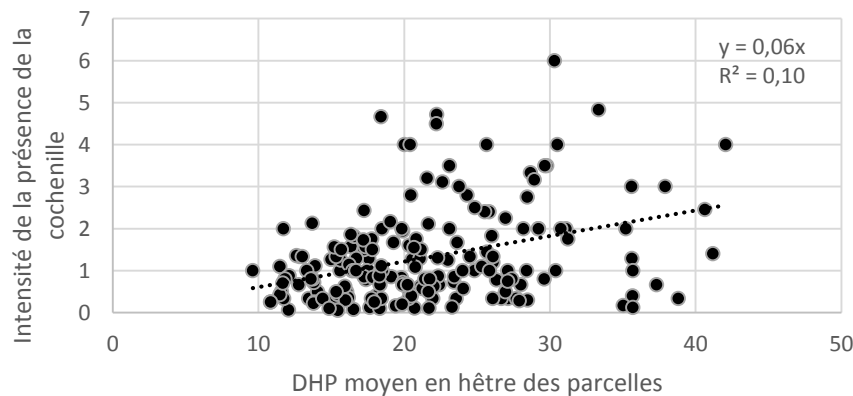


Figure 4. Indice d'intensité de la présence de la cochenille selon le DHP moyen en hêtre des parcelles dans la zone infestée.

3.1.3. Facteurs qui influence la mortalité des tiges de hêtres

Le diamètre moyen des hêtres dans un peuplement, la présence de la cochenille et/ou de la MCH et la surface terrière en hêtre sont les variables sélectionnées pour faire les modèles de prédiction de la mortalité des tiges de hêtre. Les meilleurs modèles testés pour expliquer la mortalité observée des tiges de hêtres en Outaouais sont présentés ci-dessous, soit les modèles 3 et 4

(Tableau 13). Ces modèles combinent l'effet du diamètre moyen des hêtres et le type de zone (saine vs. infestée). La variable explicative «*présence de la cochenille et/ou de la MCH*» a un poids de 100%, tout comme la variable «*diamètre moyen des hêtres de la parcelle*» (poids =100%). La variable «*surface terrière en hêtre*» semble un peu moins importante (poids=29%). Le poids représente un indice d'importance de la variable dans le modèle.

Dans la zone infestée, le pourcentage moyen de mortalité des tiges de hêtre est d'environ 10%. Cette valeur est 3 fois moins élevée dans la zone saine (environ 3%). On observe aussi que la mortalité est plus élevée pour les peuplements avec des diamètres moyens plus importants (Figure 5). Si l'on regarde les courbes de tendances générées à partir de ces modèles, on observe que même pour les peuplements avec des diamètres moyens forts, le pourcentage de mortalité des tiges de hêtre ne dépasse généralement pas le 7% dans la zone saine (Figure 5). Selon ces mêmes courbes de tendances, on observe que dans la zone infestée, le pourcentage moyen de mortalité des hêtres est > 7% pour tous les peuplements avec des diamètres moyens de plus de 20cm. Dans plusieurs études, on note aussi que la mortalité des tiges due à la MCH est plus forte pour les tiges de plus fort diamètre (Griffin *et al.* 2003). Dans les parcelles plus âgées (DHP moyen plus fort), moins de ressources seraient disponibles pour les hêtres; ce qui augmenterait leurs niveaux de stress (Gavin and Peart 1993) et entraînerait un taux de mortalité plus élevé en présence de la MCH (Houston 1994). Dans les régions où la MCH est observée depuis plus longtemps, comme des forêts de l'est des États-Unis, on note des pourcentages de mortalité des hêtres matures très importants, les grosses tiges de hêtre vivantes étant pratiquement absentes des érablières (Garnas *et al.* 2011).

Tableau 13. Comparaison de modèles pour expliquer le pourcentage de mortalité des hêtres.

	ID	K	AICc	Wt	HYPOTHÈSES
Infestation	1	3	527	0%	La mortalité des hêtres serait plus élevée lorsqu'il y a présence de la cochenille et/ou MCH
DHP	2	3	519	0%	La mortalité des hêtres serait plus élevée pour des hêtres plus vieux
Infestation +DHP	3	4	505	41%	Addition des 2 hypothèses (1 et 2) et des modèles
DHP* Infestation	4	5	506	30%	Les hêtres plus âgés sont plus vulnérables à la MCH et l'infestation par la cochenille, ce qui entraîne des taux de mortalité plus élevé
ST_H*DHP+ Infestation	5	6	510	5%	La mortalité des hêtres serait plus élevée pour des parcelles avec une plus forte présence de vieux hêtres et hypothèse 1
ST_H*DHP* Infestation	6	9	514	1%	La mortalité des hêtres serait plus élevée pour des parcelles avec une plus forte présence de vieux hêtres qui sont plus vulnérable à l'infestation
ST_H+DHP+ Infestation	7	5	507	14%	Modèle 3 avec l'addition de l'effet de la surface terrière
Valeur des paramètres du modèle 3		Estimate			Std. Error
Intercept		-2,2746			0,77598
sain		-1,37847			0,32431
DHP.moy		0,19844			0,03585

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire générale (GLM.nb) du regroupement de 5 parcelles (pool) avec comparaison de modèle. Les hypothèses correspondantes sont celles associées à la variable d'intérêt : Pourcentage de mortalité des hêtres dans les regroupements de parcelles. Code : ST_H = Surface terrière en hêtre, DHP = Diamètre moyen des hêtres, Infestation = État de la parcelle, soit saine ou infestée. Explication du tableau, idem tableau 12.

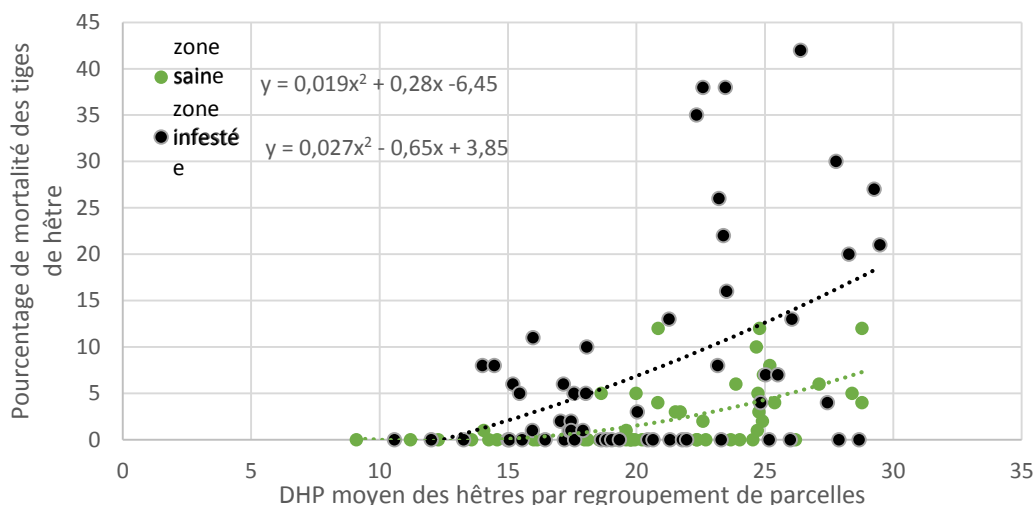


Figure 5. Pourcentage de mortalité des tiges de hêtre selon la classe de DHP pour les regroupements de parcelles dans la zone saine et les regroupements de parcelles dans la zone infestée.

3.1.4. Prévisions d'évolution de la MCH en Outaouais

Dans les érablières à hêtre de l'Outaouais, on peut s'attendre à ce que la mortalité des hêtres augmente graduellement dans les prochaines années suivant les zones d'infestation par la MCH. En somme, les modèles développés montrent que dans le futur, les zones avec de forts diamètres moyens en hêtre risquent d'être plus sévèrement touchées (Carte 5). En effet, les forêts de hêtres matures (i.e. avec plusieurs tiges de hêtre de fort diamètre), actuellement saines, risquent d'être plus susceptibles à de fortes densités de la cochenille donc plus fortement influencées par la MCH, que les forêts avec des hêtres en régénération. Ces forêts risquent aussi de montrer des pourcentages de mortalité des tiges de hêtre plus importants après infestation. On retrouve des régions actuellement saines avec une forte densité de hêtre matures, notamment dans l'ouest du Pontiac et au nord de Maniwaki (Carte 5).

Des prévisions pour 2020 et 2026 ont été faites sur l'avancée de la MCH dans l'Outaouais en se basant sur les données de la littérature décrivant le déplacement du front d'avancée de la cochenille et le temps entre l'apparition de l'insecte et la présence de la MCH (Carte 3). Ces prédictions, permettent de supposer qu'un fort pourcentage de hêtres seront encore vivants en Outaouais vers 2026, mais que la presque totalité de l'Outaouais sera infestée par la cochenille. De grandes zones de dépérissement et dévastation sont à prévoir pour l'est de l'Outaouais en 2026 (Carte 3). Plus les peuplements affectés sont éloignés les uns des autres, plus il faudra de temps aux champignons pour infecter l'ensemble des peuplements (Witter *et al.* 2005 dans Nolet *et al.* 2012).

Des indications sur la distribution et la sévérité de la MCH dans l'Outaouais, ont aussi été mesurés en 1997 et en 2008 (MRNF 2009). En comparant ces cartes, on observe que certaines zones, dont une à l'ouest de Maniwaki, étaient atteintes par la MCH en 1997. La mortalité plus importante et les marques (ou rugosité) sur les hêtres morts, notamment dans la région de Maniwaki (Carte 6), montrent qu'il est possible que certaines zones à l'intérieur de la zone saine aient subi les effets

ponctuels de la MCH dans le passé, bien que la présence de cochenille et du champignon n’ont pas été détectées en 2014⁶. Les hêtres résiduels peuvent survivre des décennies après avoir contracté la maladie (Mize & Lea 1979). Les arbres qui ont survécu après la première vague de mortalité peuvent être colonisés par un second insecte (*Xylococcus betulae*). Ce second insecte cause une rugosité sur la tige favorable à la cochenille du hêtre, ce qui favorise par la suite une nouvelle infection par le *Nectria* (McCullough *et al.* 2005). Il serait donc intéressant d’analyser les tiges, localisées dans la région de Maniwaki, afin de déterminer si la rugosité observée est due à ce second insecte.

La littérature sur la MCH mentionne que des facteurs abiotiques comme le climat plus froid peuvent jouer un rôle de régulateur de l’avancée de la cochenille et de la mortalité des hêtres. Ces peuplements, où des températures plus froides sont observées, ont des populations d’insectes plus faibles. Ainsi, ces informations soulèvent l’hypothèse que le climat plus froid pourrait ralentir et même grandement diminuer l’infestation par la cochenille et par la MCH en Outaouais. Si tel est le cas, les aménagistes devraient prendre en compte les facteurs climatiques afin de faire les prévisions sur la MCH. Dans la littérature, on mentionne que des températures inférieures à – 37°C pourraient tuer la cochenille pendant l’hiver et qu’une forte pluviosité en automne pourrait laver les hêtres de cochenille, puisque les adultes sont immobiles et plus vulnérables dans cette phase (Houston and O’Brien 1983, Houston et Valentine 1988). Le tableau 14 montre qu’il y a plus de jours de grand froid, avec une amplitude plus importante, dans le nord de l’Outaouais (Station de Maniwaki et Mont-Laurier⁷). Plusieurs jours avec des températures inférieurs à -37°C ont été enregistrés entre le dernier recensement de la MCH et la présente étude (entre 2009-2014) dans ces régions (Tableau 14). Ainsi, bien qu’une région comme le nord de Maniwaki soit plus propice à de fortes densités de présence de cochenille, les facteurs abiotiques pourraient influencer ce scénario (Représentation des limites abiotiques Carte 3).

Tableau 14. Résumé d’informations météorologiques sur les grands froids de janvier, disponibles pour l’Outaouais et les alentours entre 1997-2014. (Référence : Environnement Canada)

Station météo	Nombre de jours en Janvier avec des températures $\leq -37^{\circ}\text{C}$ (entre 1997-2014)	Années de plus d’un jour de températures $\leq -37^{\circ}\text{C}$ entre 1997-2014	Minimum enregistré entre 2009-2014
Montebello	5	2004, 2009	-38,5
Rapide-des-Joachims	6	2004, 2009	-37
Mont-Laurier	14	2004, 2009, 2013, 2014	-43,5
Maniwaki	9	2004, 2009, 2013	-41,5

3.2. Caractérisation de l’envahissement par le hêtre dans les érablières de l’Outaouais

Le portrait fait pour l’Outaouais en 2014 montre plusieurs zones avec un fort envahissement par le hêtre et peu d’érable en régénération (en rouge sur la Carte 7). La représentation spatiale de l’envahissement des parcelles étudiées montre aussi que la problématique de l’envahissement se retrouve dans toutes les régions étudiées (Région de Papineau, de la Haute-Gatineau et du

⁶ Il était donc difficile de conclure sur la cause de la mortalité des hêtres

⁷ Localisé dans les Laurentides

Pontiac) (Carte 7). Ainsi, l'envahissement par le hêtre au stade de la régénération semble apparaître comme une problématique bien présente et répandue en Outaouais, autant dans l'est que dans l'ouest. Quinze différentes combinaisons sont rencontrées pour décrire l'envahissement par le hêtre (Tableau 15), le type le plus fréquemment rencontrée est 3gp_1, soit un peuplement **fortement** envahi par les gaules et perches de hêtre (densité de plus de 5m²/ha), avec une régénération très faible en érable à sucre (densité de moins de 1m²/ha). Ce type représente environ 16% des parcelles. Le deuxième le plus fréquent (12%) est aussi un peuplement envahi par le hêtre avec peu d'érable à sucre en sous-étage et/ou en régénération (2gp_1).

On retrouve majoritairement des peuplements avec à la fois une abondance de gaules et de perches (gp) de hêtres (46%). Les peuplements de forte densité de gaules (g) seulement (13%) sont plus fréquents que les peuplements de forte densité de perches (p) seulement (6%). Les peuplements étudiés avec peu de gaules et perches de hêtre (1 gp ou 1 g-p) représentent 29% des parcelles. En somme, les forêts fortement envahies par le hêtre au stade gaulis et/ou perchis avec une présence faible d'érable à sucre en sous-étage ou régénération représentent plus de 57% des parcelles étudiées (313 sur 545). D'un autre côté, le tiers (180 parcelles sur 545) des parcelles rencontrées étaient moyennement ou fortement régénérées en érable à sucre au stade gaules ou perches avec plus de 2m²/ha.

Si l'on utilise la valeur de 5m²/ha en gaules et perches de hêtre pour désigner un peuplement envahis, le pourcentage d'envahissement en Outaouais serait estimé à 47%⁸. En utilisant une autre méthodologie⁹ et d'autres valeurs cibles, Doyon *et al.* (2003) établirent qu'approximativement 62% des érablières seraient en phase d'envahissement par le hêtre.

L'utilisation d'une typologie simplifiée a été utilisée pour la cartographie et les analyses spatiales de l'envahissement. Avec cette typologie, on voit que 47% des parcelles étudiées montraient des densités de gaules et perches de hêtre de plus de 5m²/ha, 32% entre 2 et 5m²/ha et environ 21% de moins de 2m²/ha.



Photo 2. Visualisation de grand semis et gaules de hêtre dans une parcelle d'érablière à hêtre en zone infestée.

⁸ En supposant que les parcelles inventoriées représentent proportionnellement l'ensemble du territoire

⁹ Comparer la proportion érable/hêtre dans les différentes strates cartographiques décrites par des placettes temporaires.

Tableau 15. Nombre de parcelles (**n en gras**) représenté par les différents codes pour l'évaluation de la typologie de l'envahissement par le hêtre et description de cette typologie en termes de densité en gaules et perches de hêtre et d'érable à sucre (**densité entre parenthèse en m²/ha**) pour A) typologie en 15 classes et B) typologie simplifiée en 6 classes.

A)

N	Typologie	Description
89	3gp_1	Très forte présence de gaules et perches de hêtre (> 5), nul à faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 1)
49	3gp_2g-p	Très forte présence de gaules et perches de hêtre (> 5), présence moyenne d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (entre 1 et 4)
63	2gp_1	Présence moyenne à forte de gaules (entre 1 et 4) et perches (entre 1 et 4) de hêtre (total : entre 4 et 5), faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 1)
35	2gp_2g-p	Présence moyenne à forte de gaules (entre 1 et 4) et perches (entre 1 et 4) de hêtre (total : entre 4 et 5), présence moyenne d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (entre 1 et 4)
28	3g_2g-p	Forte présence de gaules de hêtre (> 2; total entre 2 et 4), présence moyenne ou forte d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 2)
44	3g_1	Forte présence de gaules de hêtre (> 2; total entre 2 et 4), faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 2)
13	3gp_3g-p	Forte présence de gaules et perches de hêtre (> 5), forte présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 4)
58	1gp_1	Présence moyenne à faible de gaules (entre 0.5-1) et perches (entre 0.5-1) de hêtre (total entre 1 et 4), faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 2)
41	1gp_3g-p	Présence moyenne à faible de gaules (entre 0.5-1) et perches (entre 0.5-1) de hêtre (total entre 1 et 4), présence moyenne à forte d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 4)
34	1g-p_1g-p	Présence faible à nul de gaule et/ou perche de hêtre (< 1), faible à moyenne présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (entre 0.5 et 4)
24	1g-p_2g-p	Présence faible à nul de gaule et/ou perche de hêtre (< 1), moyenne à forte présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 4)
16	2g-p_1g-p	Présence moyenne de gaule ou de perche de hêtre (entre 1 et 4), faible à moyenne présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (entre 0.5 et 4)
20	2g-p_2g-p	Présence moyenne de gaule (moins de 2) ou de perche (< 2) de hêtre (total entre 1 et 4), moyenne à forte présence d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 4)
19	3p_1	Forte présence de perche de hêtre (> 2; total entre 2 et 4), faible présence d'érable à sucre toute classe de tailles (< 2)
12	3p_2g-p	Forte présence de perche de hêtre (> 2; total entre 2 et 4), présence moyenne ou forte d'érable à sucre (gaule et/ou perche) (> 2)

B)

N	Description	Densité gaule et perche hêtre (m ² /ha)	Densité gaule et perche érable (m ² /ha)
204	Forte présence de hêtre, pas ou peu d'érable	plus de 5	0 à 2
53	Forte présence de hêtre, présence d'érable moyenne ou forte	plus de 5	plus de 2
109	Présence moyenne de hêtre, pas ou peu d'érable	2 à 5	0 à 2
67	Présence moyenne de hêtre, présence moyenne ou forte d'érable	2 à 5	plus de 2
52	Faible présence de hêtre, pas ou peu d'érable	0 à 2	0 à 2
60	Faible présence de hêtre, présence moyenne ou forte d'érable	0 à 2	plus de 2

3.2.1. Les facteurs qui influencent la régénération en érable à sucre

Semis

Les facteurs sélectionnés pour expliquer la densité de petits semis d'érable à sucre sont la surface terrière en érable, le pH et la densité de gaule de hêtre (Tableau 16). La comparaison de modèles montre que deux modèles, soit la densité de gaule de hêtre seule ou cette variable en interaction avec la surface terrière en érable à sucre, sont à peu près égaux. Nous présentons plus en détail le second modèle au Tableau 16. Les principales variables explicatives ont des poids différents : la densité de gaule de hêtre (poids = 85%), la surface terrière en érable (poids = 48%) et le pH (poids=21%). En somme, dans les peuplements faiblement ($\leq 1 \text{ m}^2/\text{ha}$) envahis par les gaules de hêtre on observe de plus fortes densités de semis d'érable à sucre que dans les peuplements avec de plus fortes densité de gaule de hêtre (Figure 6). Pour expliquer l'effet du hêtre sur la régénération d'érable à sucre, les effets allélopathiques néfastes du hêtre sur les semis d'érable à sucre (Hane 2003) sont mentionnés, ainsi que l'avantage des gaules de hêtres sur les semis d'érable à sucre grâce à une interception de lumière plus efficace (Canham *et al.* 1994; Hane 2003), que ce soit en milieu fermé (Beaudet *et al.* 1999) ou suite à des perturbations partielles (Nolet *et al.* 2008).

Les érables à sucre ont une production abondante de samares tous les 4 ou 5 ans, il est donc peu probable que la régénération soit faible simplement en raison du manque de graines disséminées, ou de la variation de la surface terrière en érable uniquement. Ce sont généralement d'autres facteurs qui sont mentionnés dans la littérature pour expliquer cette situation, comme la présence d'un sol trop acide dans l'érablière. On mentionne aussi que la litière du hêtre, qui ne neutralise que peu l'acidité (Dijkstra *et al.* 2001), pourrait défavoriser l'érable aux dépens du hêtre. Mentionnons ici, que dans la présente étude, en plus de la surface terrière en érable à sucre et la densité de gaule de hêtre, le pH semblait important pour les grand semis d'érable à sucre¹⁰. Cependant, pour les facteurs qui influencent la densité de petits semis d'érable à sucre, on observe que le pH ou l'interaction entre le pH et la densité de gaule de hêtre n'ont pas été sélectionnées comme modèles explicatifs.

Tableau 16. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de petit semis d'érable à sucre.

	ID	K	AICc	Wt	HYPOTHÈSES
Gaule de hêtre	1	3	129,7	28%	La densité de gaule de hêtre nuit à la régénération de semis d'érable à sucre
ST_ERS	2	3	134,3	3%	L'abondance de semencier augmente la densité de semis d'érable à sucre
pH	3	3	134,1	3%	Les sols moins acides sont plus propices à l'établissement de semis d'érable à sucre
ST_ERS* Gaule de hêtre	4	5	129,6	30%	L'interaction entre la densité de semenciers d'érable et un envahissement par les gaules de hêtres influence l'établissement de semis d'érable à sucre
Gaule de hêtre + pH	5	4	131,8	10%	Addition des hypothèses 1 et 3
ST_ERS+ Gaule de hêtre	6	4	131,8	10%	Addition des hypothèses 1 et 2

¹⁰ La distribution des données (beaucoup de 0) ne permettaient pas de faire l'analyse statistique désirée.

Valeur des paramètres du modèle 4	Estimate	Std. Error
Intercept	0,09433	0,9911
STE	0,19871	0,10365
log_gaule de hêtre	0,72887	0,93141
STE*log_gaule de hêtre	-0,1892	0,09499

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire générale (GLM) avec comparaison de modèle pour les 109 parcelles centrales. Code : ST_ERS = Surface terrière en érable à sucre. Explication du tableau, idem tableau 12.

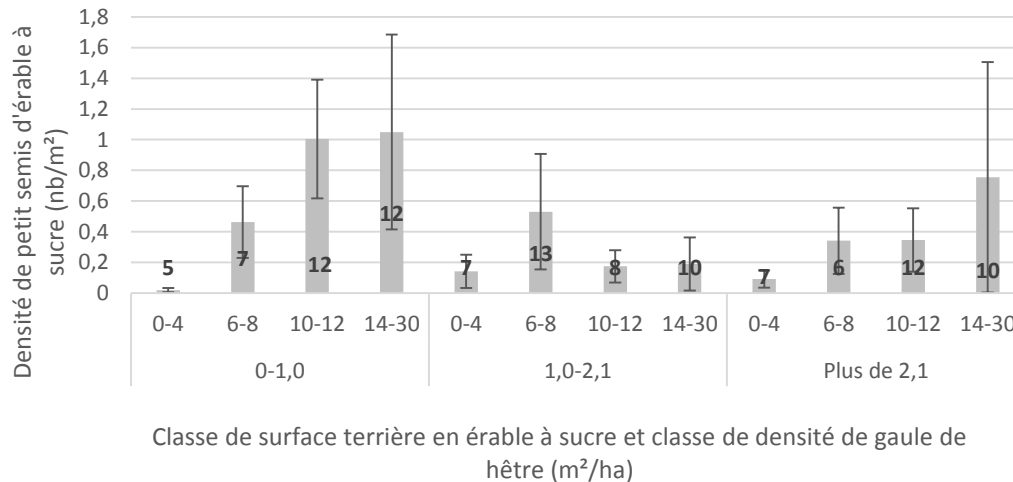


Figure 6. Représentation simplifiée de la densité moyenne de petit semis d'érable à sucre (nb/ m²) pour les 109 parcelles centrales selon la surface terrière en érable à sucre (valeur du haut en x) et la classe de densité de gaule de hêtre (valeur du bas en x) en m²/ha, le n pour chaque classe est représenté en gras dans les barres.

Gaules et perches

Pour les gaules d'érable à sucre, la densité en gaules et perches de hêtre, la surface terrière en érable à sucre et la présence de la MCH sont les variables sélectionnées (tous avec un poids = 99%). Le modèle sélectionné (modèle 4, Tableau 17) représente une addition de ses 3 variables. La densité de gaules d'érable à sucre est sensiblement plus faible (environ 34%) dans la zone saine soit 0.39 m²/ha que dans la zone infestée soit 0.59 m²/ha (Figure 7). La densité de gaule d'érable à sucre augmente suivant l'augmentation de la surface terrière en érable à sucre. De plus, on observe que la densité de gaule d'érable à sucre est significativement diminuée par des densités de gaules et perches de hêtre de plus de 4 m²/ha, passant de densités moyennes supérieures à 0.60 m²/ha à des densités moyennes inférieures à 0.40 m²/ha (Figure 7).

Tableau 17. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de gaule d'érable à sucre.

	ID	K	AICc	Wt	HYPOTHÈSE
ST_ERS	1	3	738,6	0%	L'abondance d'érable du couvert crée des conditions propices au développement et à la survie des gaules d'érable
ENV_H	2	7	729,8	0%	La densité de gaule d'érable diminue en réponse à l'invasion par le hêtre
Infestation	3	4	727,9	0%	Les gaules d'érable bénéficient de conditions créées par la présence de la MCH (ex. lumière, mortalité des hêtres matures)
ST_ERS+ENV_H+Infestation	4	10	697,0	99%	L'addition des hypothèses 1, 2 et 3

Valeur des paramètres du modèle 4	Estimate	Std. Error
Intercept	0,19867	0,39406
sqrt_ST_ERS	0,30476	0,0823
Classe d'envahissement_HEG: 1-2	0,13445	0,33883
Classe d'envahissement_HEG: 2-4	-0,03359	0,33219
Classe d'envahissement_HEG: 4-6	-0,83543	0,33883
Classe d'envahissement_HEG: 6-9	-0,86422	0,35437
Classe d'envahissement_HEG: 9+	-1,2406	0,37611
infesté	-0,31092	0,3839
sain	-1,02537	0,36482

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire générale (GLM) avec comparaison de modèle pour les regroupements de parcelles (545 parcelles regroupées en 109). Code : ST_ERS = Surface terrière en érable à sucre, ENV_H = densité de gaule et de perche de hêtre (envahissement), Infestation = État de la parcelle (saine ou infestée). Explication du tableau, idem tableau 12.

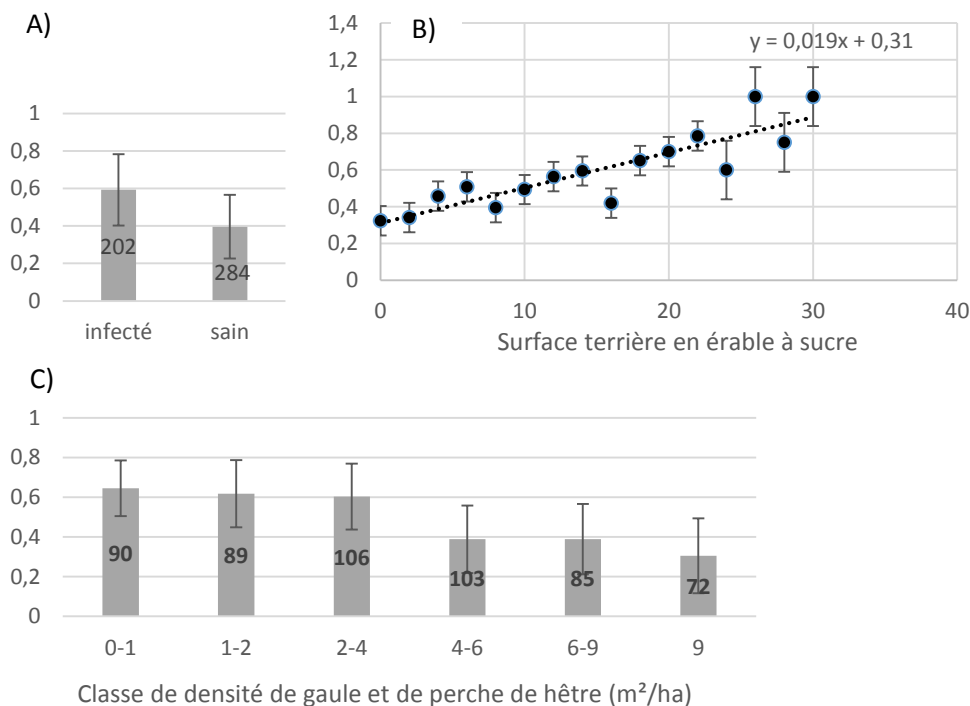


Figure 7. Représentation simplifiée de la densité moyenne de gaule d'érable à sucre (estimation m²/ha) en y, selon A) la zone (saine ou infestée), B) la surface terrière en érable à sucre et C) la classe de densité de gaule et perche de hêtre (estimation en m²/ha). Le n pour chaque classe est représenté en gras, les barres d'erreur représentent l'écart type.

Parmi la liste de variables testées, les facteurs sélectionnés ayant le plus de chance d'expliquer la densité de perches d'érable à sucre sont la surface terrière en hêtre, le type de traitement sylvicole et l'état de la zone. Parmi les modèles testés, celui incluant la surface terrière en hêtre (poids = 97%) est définitivement le modèle le plus performant modèle 1 (Tableau 18). La densité des perche d'érable à sucre est plus faible pour de plus forte surface terrière en hêtre (Figure 8).

Tableau 18. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de perche d'érable à sucre.

	ID	K	AICc	Wt	HYPOTHÈSES
ST_H	1	3	1233,1	97%	La densité de hêtre du couvert nuit à la croissance et la survie des perches d'érable à sucre (forte compétition avec les perches de hêtre)
PERT	2	5	1272,5	0%	Le type de traitement sylvicole influence la densité de perches d'érable à sucre
Infestation	3	4	1271,5	0%	Les perches d'érable bénéficient de conditions créées par la présence de la MCH (ex. lumière, mortalité des hêtres matures)
ST_H+PERT	4	6	1240,8	2%	Addition des modèles 1 et 2

Valeur des paramètres du modèle 1	Value	Std.Error
Intercept	1,17	0,06
ST_H	-0,044	0,006

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire avec effets-mixtes (LME) avec l'effet aléatoire de la parcelle et comparaison de modèle. Code : ST_H = Surface terrière en hêtre, PERT = perturbation (traitement sylvicole), Infestation = État de la parcelle (saine ou infestée). Explication du tableau, idem tableau 12.

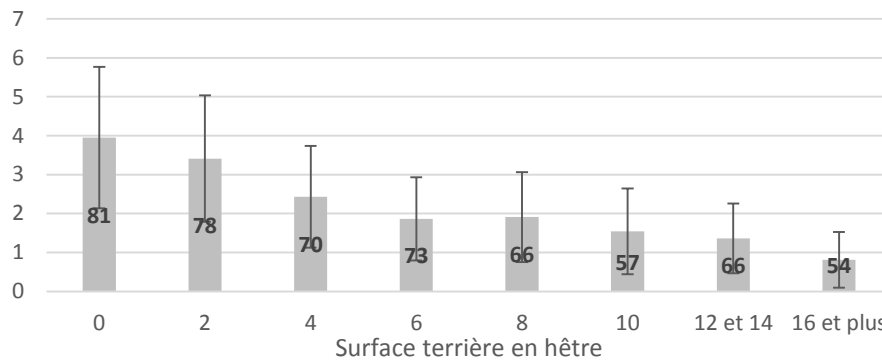


Figure 8. Représentation simplifiée de la densité moyenne de perches d'érable à sucre (m²/ha) pour l'ensemble des 545 parcelles selon la surface terrière en hêtre. Le n pour chaque classe est représenté en gras, les barres d'erreur représentent l'écart type.

En somme, ces analyses montrent que le stade de hêtre égal ou au-dessus du stade d'érable à sucre est l'un des principaux facteurs qui influencent la densité de l'érable à sucre pour les stades de semis, gaules et perches. Ainsi, la densité de gaules et de perche de hêtre pourrait nuire à l'établissement, la survie ou le développement de l'érable à sucre. On voit qu'à des densités de gaule de hêtre supérieur à 2 m²/ha, on a des problèmes de régénération d'érable à sucre (i.e. moins de 0.5 semis/m²¹¹). Aussi, on observe un manque de régénération en gaule d'érable à sucre (i.e. moins de 0.5 m² gaules/ha) pour des densités de gaule et perche de hêtre supérieur à 4 m²/ha. Finalement, il semble que les peuplements avec des surfaces terrières en hêtre de plus de 16 m²/ha aient plus fréquemment des problématiques de régénération en perches d'érable à sucre (i.e. moins de 0.88 m²perches/ha).

3.2.2. Les facteurs qui influencent la régénération en hêtre

¹¹ Les informations sur la régénération d'érable à sucre qui permettent de perpétuer des peuplements d'avenir (i.e. 0.5 semis /m², 0.5 m² gaules/ha (250 tiges/ha) et 0.88 m² perches/ha (50 tiges/ha)) proviennent de la revue de littérature concernant l'aménagement des érablières (Roy 2013).

Semis

Parmi la liste de variables testées, les facteurs sélectionnés pour expliquer la densité de petits semis de hêtre sont la surface terrière en hêtre, le pH et l'état de la parcelle (saine ou infestée). Le modèle le plus performant (modèle 6, Tableau 19) représente une interaction entre ses 3 variables. On note que les principales variables explicatives sont la présence de la MCH (poids = 100%), la surface terrière en hêtre (poids =100%) et le pH (poids=77%). Les peuplements sains, avec une forte surface terrière en hêtre et avec un pH élevés présentent de plus fortes densités en semis de hêtre (Figure 9). La densité moyenne de petit semis de hêtre est deux fois plus faible soit 0.306 semis/m² dans les peuplements infestés (n=50), comparativement à 0.629 semis/m² dans les peuplements sains (n=59). On note aussi que la densité de petit semis de hêtre est plus faible pour des pH plus faible et augmente avec l'augmentation du pH. A titre indicatif, on a une moyenne de 0.22 semis/m² pour des pH de moins de 4.66 (n= 35), une moyenne de 0.54 semis/m² pour des pH entre 4.66 et 5.00 (n= 36) et une moyenne de 0.612 semis/m² pour des pH de plus de 5.00 (n= 38).

Tableau 19. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de petit semis de hêtre.

	ID	K	AICc	Wt	HYPOTHÈSES
ST_H	1	3	1125	0%	L'abondance de semencier augmente la densité de semis de hêtre
Infestation	2	4	1134	0%	La densité de petits semis est plus faible en présence de la MCH
pH	3	3	1326	0%	L'établissement de petit semis est influencé par le pH du sol
pH*ST_H	4	5	1128	0%	L'interaction entre la surface terrière en hêtre et le pH influence la densité de petit semis
Infestation*ST_H	5	7	1025	23%	En présence de la MCH, les hêtres matures ont une plus faible production de petits semis
Infestation*ST_H*pH	6	13	1023	64%	En présence de la MCH, les hêtres matures ont une plus faible production de petits semis qui répondent différemment au changement de pH
ST_H*Infestation+pH	7	8	1026	12%	En présence de la MCH, les hêtres matures ont une plus faible production de petits semis plus hypothèse 3

Valeur des paramètres du modèle 6	Estimate	Std. Error
(Intercept)	3,38	5,24
infesté	-7,47	5,54
sain	1,46	5,45
ST_H	-0,16	0,12
pH	-0,71	1,11
infesté: ST_H	0,79	0,21
infesté: pH	1,66	1,17
sain: pH	0,08	1,15
ST_H: pH	0,04	0,02
Infesté : ST_H :pH	-0,15	0,04

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire générale (GLM) avec comparaison de modèle pour les 109 parcelles centrales. Code : Infestation =État de la parcelle (saine ou infestée), ST_H =Surface terrière en hêtre. Explication du tableau, idem tableau 12.

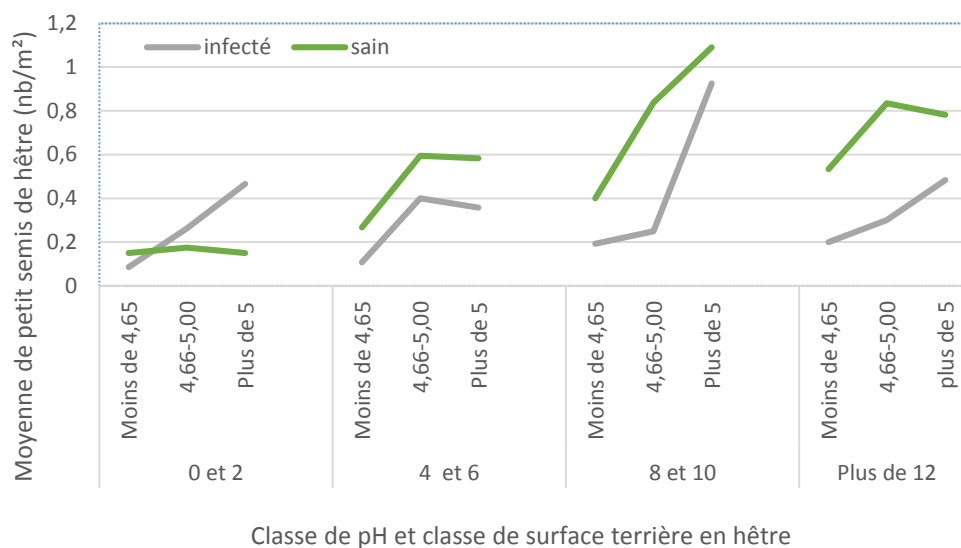


Figure 9. Représentation simplifiée de la densité moyenne de petit semis de hêtre (nb/m²), selon l'état de la zone (infestée et saine), la surface terrière en hêtre et le pH de la parcelle, pour les 109 parcelles centrales.

Parmi la liste de variables testées pour la densité de grands semis de hêtre on retrouve la surface terrière en hêtre, le pH, l'état de la parcelle et le type de perturbation. Le modèle sélectionné (modèle 5, Tableau 20) représente une interaction entre ses 4 variables. La densité moyenne de grand semis de hêtre est deux fois plus faible soit 0.317semis/m² dans les peuplements infestés (n=50), comparativement à 0.608 dans les peuplements sains (n=59). **A)**¹² La densité de grand semis de hêtre est significativement plus faible sans perturbation récente (0.35 semis/m², n=18) comparativement à après CDL (0.50 semis/m², n=37) et CJ (0.66 semis/m², n=37), tant dans les peuplements sains que infestés. **B)** Le pH a un effet significatif sur la densité de grand semis de hêtre : la densité de semis est plus faible pour des pH plus faible et augmente avec l'augmentation du pH. A titre indicatif pour différents pH, on a une moyenne de 0.23 semis/m² pour des pH de moins de 4.66 (n= 35), une moyenne de 0.58 semis/m² pour des pH entre 4.66 et 5.00 (n= 36) et moyenne de 0.60 semis/m² pour des pH de plus de 5.00 (n= 38). La réponse entre le pH, le type de perturbation et l'état de la parcelle est représentée à la figure 10. L'augmentation de la densité de grand semis en réponse à l'augmentation du pH est significativement différente après CJ, CDL ou sans perturbation récente. **C)** Finalement, on observe que dans les peuplements sans perturbation récente, la densité de grand semis est significativement plus forte avec de forte surface terrière en hêtre, ainsi qu'avec des pH plus élevés et des surfaces terrières en hêtre plus fort (Figure 10).

¹² Les lettres se réfèrent au tableau 20.

Tableau 20. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de grand semis de hêtre.

	ID	K	AICc	Wt	HYPOTHÈSES
Infestation *ST_H*pH*PERT	5	49	903	100%	En présence de la MCH, les hêtres matures ont une plus faible production de semis qui répondent différemment au changement de pH et aux perturbations
Infestation	4	4	1162	0%	La densité de semis est plus faible en présence de la MCH ou de la cochenille
PERT	3	5	1191	0%	Le type de perturbation influence la densité de semis
ST_H	2	3	1216	0%	La surface terrière en hêtre influence la densité de semis
pH	1	3	1283	0%	L'établissement de semis dépend du pH du sol

Valeur des paramètres du modèle 5	Estimate	Std. Error
(Intercept)	-22,67	11,37
infesté	17,55	11,64
sain	14,12	11,07
ST_H	0,26	0,33
B) pH	4,86	2,43
CDL	1,42	773,79
A) sans perturbation récente	17,38	5,41
infesté: ST_H	0,77	0,49
infesté: pH	-3,48	2,48
sain: pH	-2,5	2,37
ST_H: pH	-0,06	0,07
Infesté: CDL	31,01	774,18
sain: CDL	13,82	773,78
A) infesté: sans perturbation récente	-15,32	6,88
A) sain: sans perturbation récente	-2,55	1,34
ST_H:CDL	-0,59	0,36
C) ST_H: sans perturbation récente	-2,1	0,52
B) pH: CDL	-3,3	0,71
B) pH: sans perturbation récente	-3,65	1,13
infesté: ST_H: pH	-0,13	0,1
infesté: ST_H:CDL	-4,71	3,09
infesté: ST_H: sans perturbation récente	1,21	0,7
infesté: pH: CDL	-3,65	5,36
B) infesté: pH: sans perturbation récente	3,23	1,42
ST_H: pH : CDL	0,14	0,07
C) ST_H: pH: sans perturbation récente	0,48	0,11
Infesté : ST_H: pH: CDL	0,97	0,67
C) infesté : ST_H : pH : sans perturbation récente	-0,31	0,14

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire générale (GLM. poisson) avec comparaison de modèle pour les 109 parcelles centrales. Les lettres A), B) et C) se réfèrent au texte (en rouge). Code : PERT = perturbation (traitement sylvicole), Infestation = État de la parcelle (saine ou infestée), ST_H= Surface terrière en hêtre. Explication du tableau, idem tableau 12.

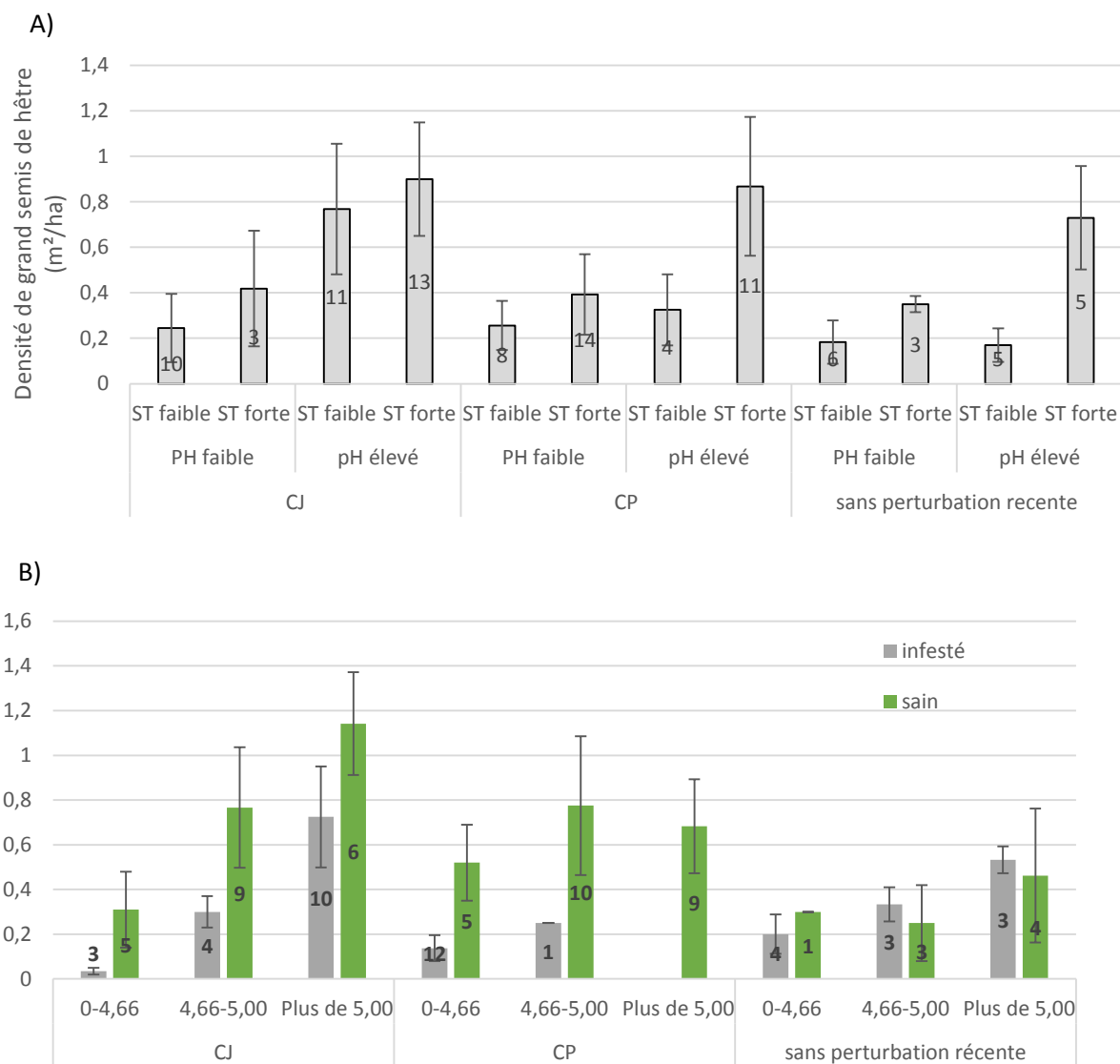


Figure 10. Représentation simplifiée de la densité moyenne de grand semis de hêtre (nb/m²) pour les 109 parcelles centrales selon A) la surface terrière en hêtre, le pH de la parcelle et le type de perturbation B) la zone (infestée et saine), le pH et le type de perturbation. Le n pour chaque classe est représenté en gras, les barres d'erreur représentent l'écart type.

Gaules et perches

Les facteurs qui influencent la densité de gaule de hêtre ont été étudiés avec des mesures directes de la densité de gaule de hêtre dans les parcelles centrales. Aussi, les classes de densité de gaules et perches de hêtres ont été analysés à l'aide de la typologie développée au niveau des 545 parcelles. Dans les 2 cas, parmi la liste de variables testées, les facteurs sélectionnés ayant le plus de chance d'expliquer la densité de gaule de hêtre (et gaule et perche de hêtre) ont été les mêmes, soit le type de perturbation, l'état de la parcelle (saine ou infestée) et la pente.

Au niveau de la mesure directe de la densité de gaule de hêtre dans les parcelles centrales, la densité moyenne de gaule est de 1.68 m²/ha dans la zone saine, comparativement à 1.93 m²/ha

dans la zone infestée¹³(Tableau 21). La densité moyenne de gaule de hêtre mesurée est de 0.98 m²/ha pour les parcelles sans perturbation récente, 1.5 m²/ha pour les parcelles issus de CJ, 1.9 pour les parcelles avec d'autres types de perturbations (ENR, CPI, CRF) et de 2.4 m²/ha pour les parcelles issus de CDL. À titre informatif seulement, due à un trop faible effectif, la moyenne de densité de gaule de hêtre pour les peuplements issus de CT de plus de 15 ans est de 0.81 m²/ha. Ces informations concordent avec l'étude de Angers (2004), qui montre aussi une plus forte abondance relative de gaules de hêtre après traitements sylvicoles dans des érablières du Québec (naturelle vs. aménagée CJ, CDL). Nolet *et al.* (2008) montre aussi que la régénération du hêtre augmente par rapport à celle de l'érable à sucre après coupe partielle dans des érablières du Québec. Parmi les types de perturbations partielles testés dans une étude, tous semblent augmenter la proportion de gaules de hêtre, mais l'amplitude de cette augmentation était moindre dans les jardinages par trouées (Messier, Beaudet et Greene 2010).

Tableau 21. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de gaule de hêtre.

	ID	K	AICc	Wt	HYPOTHÈSES
Infestation	1	4	838,2	0%	L'infestation influence la densité de gaules
Pente	2	3	855,8	0%	La pente influence la densité de gaules de hêtre
PERT	3	5	801,6	0%	Différente densité de gaules de hêtre en réponse à l'historique de coupe
Pente*PERT	4	9	786,7	0%	L'interaction entre la pente et l'historique de coupe influence la densité de gaule de hêtre
Infestation*PERT	5	13	791,4	0%	L'interaction entre l'historique de coupe et l'infestation influence la densité de gaule de hêtre
Pente*PERT*Infestation	6	25	766,3	100%	L'interaction entre la pente, l'historique de coupe et l'infestation influence la densité de gaule

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire générale (GLM) avec comparaison de modèle pour les 109 parcelles centrales. Code : PERT = perturbation (traitement sylvicole), Infestation = État de la parcelle (saine ou infestée). Explication du tableau, idem tableau 12.

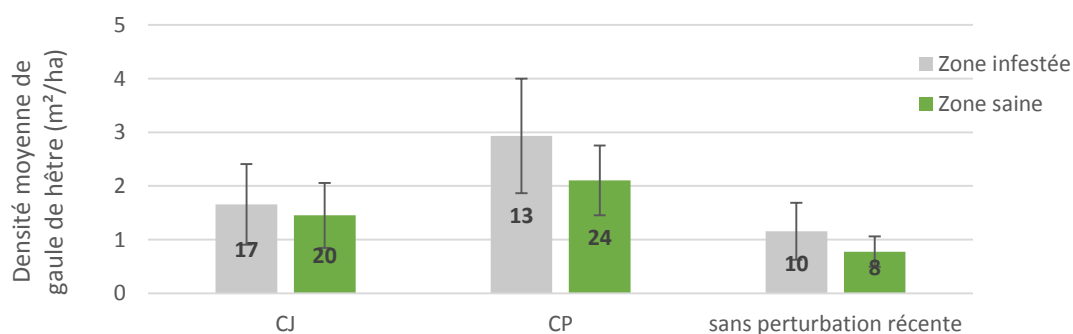


Figure 11. Représentation simplifiée de la moyenne de densité de gaule de hêtre (m²/ha), pour les 109 parcelles centrales en fonction de la zone et du type de perturbation. Le n pour chaque classe est représenté en gras, les barres d'erreur représentent l'écart type.

¹³ Pour l'ensemble des 545 parcelles, l'estimation de la densité de gaule de hêtre à partir de la typologie est de 2.1 m²/ha pour la zone saine et de 2.3 m²/ha pour la zone infestée.

Au niveau de la mesure par classe en utilisant la typologie (545 parcelles), le modèle le plus probable pour expliquer la densité de gaule et perche de hêtre est le modèle 6, qui représente l'addition de la zone et de la perturbation (Tableau 22). La densité moyenne de gaule et perche de hêtre est estimée à 5.00 m²/ha pour la zone saine et à 5.24 m²/ha pour la zone infestée. Les peuplements sans perturbation récente ont des densités moyenne de gaule et perche de hêtre significativement plus faible que les peuplements après coupe partielle (CDL), soit respectivement 3.5 m²/ha et 5.4 m²/ha (Figure 12). Après coupe de jardinage, généralement plus récente que les CDL, la densité moyenne de gaule et perche de hêtre est intermédiaire entre ces deux valeurs, soit à 4.7 m²/ha. En somme, selon la littérature, on peut s'attendre à davantage de hêtre après CJ ou CDL, puisque le hêtre est très tolérant à l'ombre avec une très bonne capacité de régénération sous couvert (Lessard *et al.* 2005, Lessard et Côté 2007).

Tableau 22. Comparaison de modèles pour expliquer la densité de gaule et perche de hêtre.

	ID	K	AIC	Wt	HYPOTHÈSES
Infestation	1	2	1799	15%	Augmentation du drageonnement et de la densité dans les parcelles infestés
Pente	2	2	1880	0%	La pente influence la densité
PERT	3	2	1877	0%	Différente densité en réponse à l'historique de coupe
Infestation+PERT+Pente	4	2	1800	9%	Addition des hypothèses et des modèles 1,2 et 3
Infestation*Pente	5	2	1798	26%	Interaction entre la pente et l'infestation influence l'envahissement par le hêtre
Infestation+PERT	6	2	1797	40%	Addition des hypothèses et des modèles 1 et 3

Légende. Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse Model linéaire avec effets-mixtes (Clmm2) avec l'effet aléatoire de la parcelle et comparaison de modèle. Les hypothèses correspondantes sont celles associées à la variable d'intérêt : Densité de gaule et perche de hêtre. Code : PERT = perturbation (traitement sylvicole), Infestation = État de la parcelle (saine ou infestée). Explication du tableau, idem tableau 12.

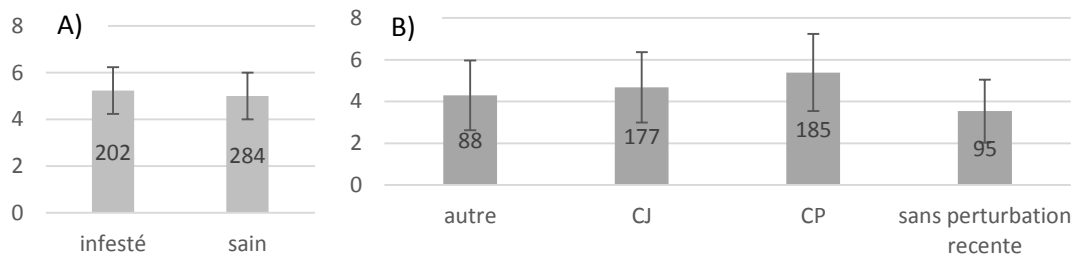


Figure 12. Représentation simplifié de la densité moyenne de gaule et perche de hêtre (m²/ha) pour les 545 parcelles selon A) la zone (Infestée ou Saine) et B) le type de perturbation. Le n pour chaque classe est représenté, les barres d'erreur représentent l'écart type.

Parmi les variables testées, peu de variables semblent pouvoir expliquer la variation de la densité de perches de hêtre (Sélection : Modèle Nul, Annexe Tableau 2). La Figure 2 en Annexe, montre la tendance d'avoir une plus faible densité de perche de hêtre dans les parcelles sans perturbation récente.

3.3. Liens entre la maladie corticale et l’envahissement par le hêtre

3.3.1. L’envahissement par le hêtre dans la zone saine et la zone infestée

Au niveau de l’envahissement par le hêtre, les informations basées sur la typologie montre qu’il y a actuellement peu de différences entre la zone saine et la zone infestée. En effet, le pourcentage de parcelles considérées très envahies par le hêtre (gaules et perches) est sensiblement le même dans la zone saine et la zone infestée, soit respectivement 51% et 52%. Cependant, on note qu’il y a moins de parcelles «très envahies par le hêtre avec peu d’érable à sucre» (35% versus 46%) dans la zone infestée, mais plus de parcelles «très envahies par le hêtre avec présence moyenne ou forte d’érable à sucre» (17% versus 5%) (Tableau 23). L’effet possible de la présence de la MCH sur la régénération de l’érable à sucre sera discuté à la section 3.3.3.

Tableau 23. Pourcentage de parcelle selon les différents niveaux d’envahissement (basé sur la typologie) que l’on retrouve dans les différentes sous-zones (Saine, invasion, destruction et dévastation).

Sous-Zones	Très envahis		Moyen Envahis		Peu envahis		n
	Peu érable	érable	Peu érable	érable	Peu érable	érable	
Saine	46%	5%	22%	11%	8%	7%	284
Invasion	32%	16%	21%	20%	3%	9%	116
Destruction et dévastation	39%	19%	23%	10%	8%	1%	80
Total(Infestée)	35%	17%	21%	16%	5%	6%	196

Le portrait actuel montre que la surface terrière moyenne, la surface terrière en perche moyenne et le pH sont très similaires entre les zones saines et infestées (tableau 24). Pour le hêtre, la densité de perche est aussi semblable entre les 2 zones. On observe cependant que le pourcentage de couvert en gaule est environ 5% plus élevé et le pourcentage moyen de lumière est plus faible dans les parcelles infestées. En somme, dans les zones infestées, on observe actuellement moins de lumière, une densité de gaule totale plus élevée, ainsi une densité moyenne de gaule de hêtre un peu plus élevée. Ainsi, il est fort probable que le pourcentage de lumière plus faible dans la zone infestée soit causé en partie par l’augmentation de la densité de gaule. En effet, lorsqu’on regarde les données pour l’ensemble des parcelles analysées, on voit que le pourcentage de lumière diminue lorsque la densité de gaule de hêtre augmente (et vice versa) (Annexe. Figure 3 B). Aussi, lorsque l’envahissement par le hêtre (gaule et perche) est plus fort, la quantité de lumière moyenne est plus faible (Annexe. Figure 3 A).

Tableau 24. Moyenne du pourcentage de lumière, de la surface terrière, de la surface terrière en perche, du % de couvert en gaule et du pH entre les parcelles saines et infestées.

	% lumière	Surface terrière	Surface terrière perche	% couvert en gaule	pH
infestée	8,7	23,3	6,7	40,4	4,8
saine	12,6	24,6	7,0	35,7	4,9

On observe est que la densité de petits et grands semis de hêtre est deux fois plus faible dans la zone infestée. On obtient des densités semblables de petits semis d'érable à sucre (Tableau 25). Par contre, la densité de grand semis et de gaules d'érable à sucre est plus élevée dans la zone infestée.

Tableau 25. Résumé des tendances de variation de densité de gaules et semis d'érable et de hêtre entre les parcelles saines et les parcelles infestées.

	Saine	Infestée
densité de semis de hêtre	↑↑	↓↓
densité de gaules de hêtre	↓	↑
densité de petit semis d'érable	=	=
densité de gaules et grand semis d'érable	↓↓	↑↑

3.3.2. L'origine des semis (sexués vs végétatifs) en liens avec la MCH

Dans la présente étude, sur les 109 différents peuplements analysés, le pH, la surface terrière, la surface terrière en hêtre, la pente et plusieurs autres facteurs n'avaient aucun effet significatif sur le mode de reproduction des semis de hêtres. D'un autre côté, la densité de semis de hêtre, le pourcentage de lumière et la présence de la MCH (ou la cochenille) avaient un effet significatif sur le ratio entre les semis d'origines sexuées ou végétatifs (Figure 13 A). Dans la zone infestée, le pourcentage de semis d'origine végétatif est significativement plus élevé que dans la zone saine. Dans cette zone, le pourcentage de semis d'origine végétatif est de 47%, comparativement à 30% dans la zone saine. Cette différence est encore plus marquée pour les grands semis, soit 55% d'origine végétatif dans la zone infestée, comparativement à 30% dans la zone saine. Dans la revue de Wagner *et al.* (2010), on mentionne que la MCH influence probablement le ratio entre les semis d'origine sexué et végétatif. Différentes études montrent qu'en présence de la MCH, les semis d'origine végétatif peuvent devenir dense (Nyland *et al.* 2006, McNulty & Masters, 2005, Houston 2001). Dépendamment des sites, la dominance (plus de 50%) des semis d'origines sexué ou végétatif varie (Nyland *et al.* 2006), entraînant certains peuplements à contenir que peu de clones différents (Wagner *et al.* 2010).

Les résultats montrent que le pourcentage de semis d'origine sexué est plus fort lorsque la densité de semis totale est élevée (Figure 13 B). Donc, bien que les peuplements dans la zone infestée présentent des densités moyennes de semis de hêtre plus faibles, la proportion de semis d'origine végétatif est plus importante que dans la zone saine.

De plus, le pourcentage de semis d'origine sexué augmente avec l'augmentation du pourcentage de lumière de la parcelle (Figure 13 C). Les semis d'origines végétatifs seraient probablement moins dépendants de la lumière disponible. Le pourcentage de lumière au sol est aussi mentionné comme des facteurs liés à la quantité de semis d'origine végétatif dans les forêts avec présence de la MCH (Nyland *et al.* 2006).

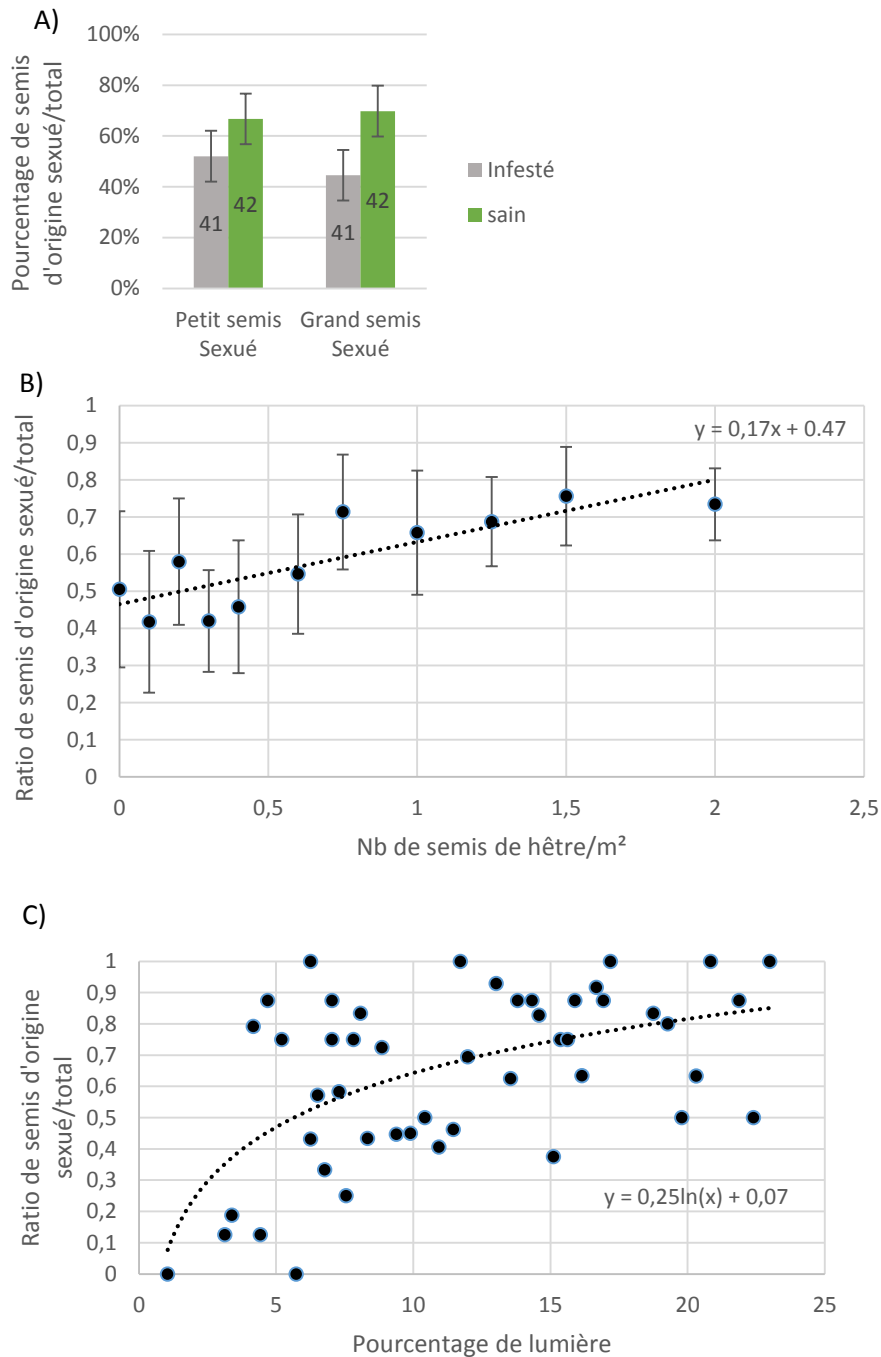


Figure 13. Ratio de semis d'origine sexué/total (sexué et végétatif) en fonction de A) l'état de la parcelle (Saine et Infesté), le n pour chaque classe est représenté B) de la densité de semis totale (nb/m²) et C) du pourcentage de lumière de la parcelle. Pour A) et B) les barres d'erreur représentent l'écart type.

3.3.3. Est-ce que la MCH entraîne une augmentation de la régénération en érable ou en hêtre?

Parmi les modèles, l'hypothèse que les gaules d'érable à sucre bénéficient de conditions créées par la présence de la MCH a été sélectionnée. Cependant, l'hypothèse de l'augmentation de la densité de gaule de hêtre dans les parcelles infestées a aussi été sélectionnée. La synchronisation

de la réponse du hêtre et de l'érable à sucre dans le temps, ainsi que l'augmentation de la proportion de semis d'origine végétatif en présence de la MCH sont utilisées dans la présente étude pour expliquer ce phénomène. L'hypothèse dérivant la réponse du hêtre à la présence de la MCH et la synchronisation de la réponse de l'érable à sucre décrite ci-dessous permet de synthétiser plusieurs résultats observés dans la présente étude.

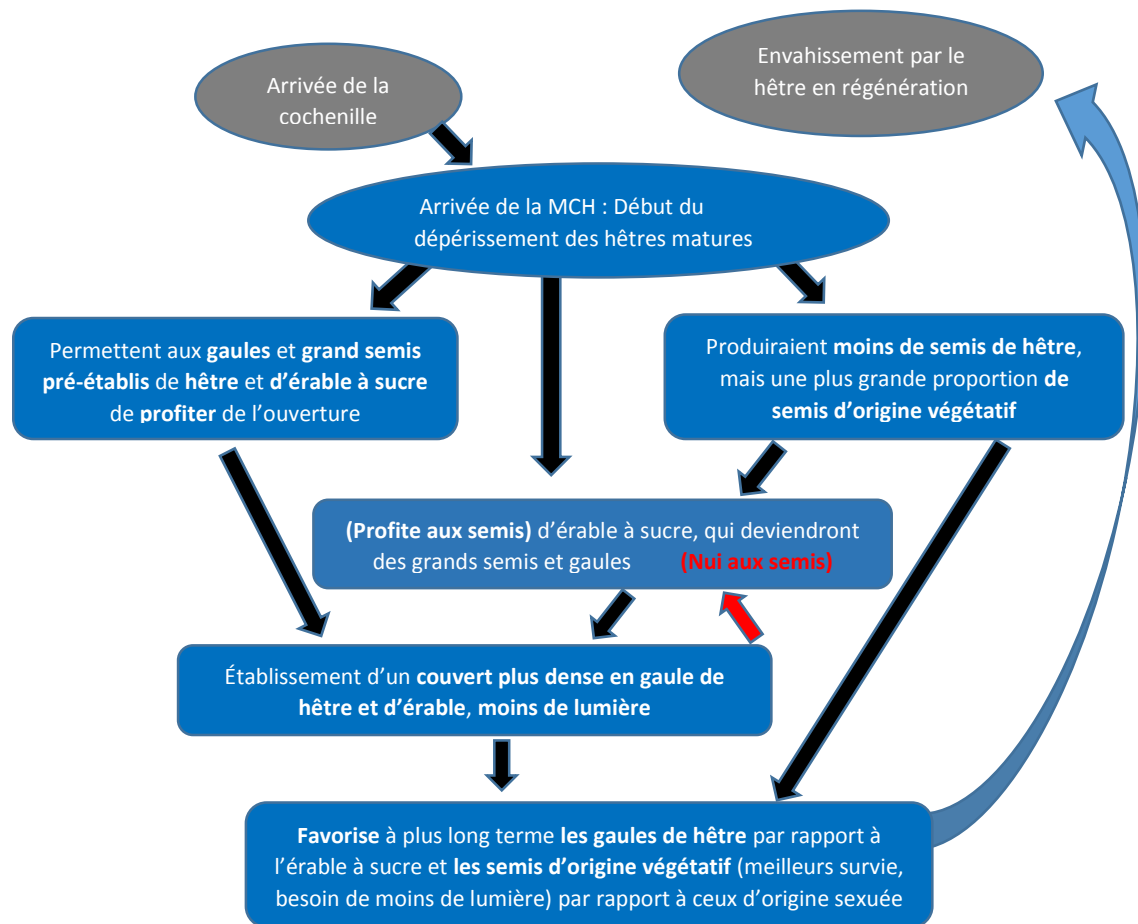


Schéma 1. Schéma hypothétique de l'effet de la MCH sur la régénération du hêtre et de l'érable à sucre. La flèche en rouge indique : Nui aux semis.

En présence de la MCH, les hêtres matures, en dépérissement, produiraient moins de semis au total, mais plus de semis d'origine végétatif. On mentionne dans la littérature que la production des semis d'origine végétatif peut continuer peu importe la vigueur du hêtre, tant qu'il reste en vie (Jones 1987). Les semis d'origine végétatifs auraient de meilleures survies, notamment avec moins de lumière. (Beaudet et Messier 2008). Ces semis deviendraient des gaules à plus long terme, ce qui explique, en partie, que l'on observerait des densités de semis totaux plus faibles dans la zone infestée, mais que la densité de gaule serait un peu plus élevée.

Au début de l'arrivée de la MCH, l'érable à sucre pourrait profiter de la diminution de la densité de semis de hêtre. Après quelques années, la perte de cime et le début de la mortalité du hêtre pourrait aussi profiter aux semis d'érable déjà en place, qui deviendront des gaules et des grands

semis. Cependant, après plusieurs années d'infestation, les petits semis d'érable à sucre ne pourraient plus profiter de cet avantage, vu l'augmentation de la densité de gaule (notamment de hêtre) et la diminution de la lumière (situation actuelle¹⁴).



Photo 3. Semis de hêtre d'origine végétatif dans une parcelle infestée par la MCH. Source : Marie-Eve Roy.

3.3.4. Indications sur l'avenir des érablières à hêtre de l'Outaouais après la MCH

Au niveau de la régénération en hêtre, basé sur la littérature, on peut supposer que l'envahissement devrait augmenter avec l'arrivée de la MCH en Outaouais. En effet, différentes études mentionnent que la régénération en hêtre augmente avec la présence de la MCH (Garnas *et al.* 2011, Twery&Patterson 1984; Leak 2006). Par exemple, Garnas *et al.* (2011) ont observé que la densité des petites tiges était beaucoup plus forte (plus de 350%) après le passage de la MCH (donc peu de différence au niveau de la surface terrière en hêtre). Une approche de modélisation montre aussi l'effet d'augmentation de régénération de hêtre (petite tiges) due à la MCH (Le Guerrier *et al.* 2003), les espèces tolérantes à l'ombre ayant un avantage à long terme.

En somme, dans les forêts où la MCH est présente depuis longtemps, le hêtre demeurerait une espèce dominante (Twery&Patterson 1984; Leak 2006). L'étude de Hane (2003) au New Hampshire, où la MCH est présente, montre que la densité de gaules a été multipliée par 5 en 30 ans (1967-1997). Au Québec, une étude faite à partir de 12 placettes du Réseau d'Étude et de Surveillance des Écosystèmes Forestiers (RESEF) dans les érablières montre une augmentation de la densité de petites tiges de hêtre de plus de 100% en 10 ans (Duchesne *et al.* 2006). Bien que cette étude soit faite indépendamment de la MCH, il serait intéressant de corrélérer l'arrivée de la MCH dans ces parcelles avec l'augmentation de l'envahissement par le hêtre. Au niveau du paysage, il n'a pas été observé, selon les informations disponibles dans la littérature, que

¹⁴ On observe des densités semblables de petits semis d'érable à sucre dans les zones saines et infestées.

l'abondance d'espèce compagnes comme l'érable à sucre (semis, gaules ou autres) aient profité de la MCH.

3.3.5. Tendances entre le type de perturbation, l'envahissement et la MCH

On remarque que les peuplements avec un historique de traitements sylvicoles (CDL > CJ), ont des densités de gaule et perche de hêtre plus fortes que les peuplements sans perturbation récente, peu importe l'état de la parcelle (saine/infesté). On voit aussi plus de peuplements de type envahis par le hêtre peu régénéré en érable à sucre (Typologie 1) en présence de traitements sylvicoles (CJ, CDL) (Annexe. Tableau 3). Actuellement dans les parcelles sans perturbation récente, la densité moyenne de gaule de hêtre ainsi que la densité moyenne de gaule et perche de hêtre sont inférieures à la limite que nous avons établie pour permettre une bonne régénération en érable à sucre (Section 3.2.1.), soit de 2 m²/ha de gaules et 4 m²/ha de gaules et perches respectivement. Des peuplements sans perturbation récente auraient donc moins de problématique d'envahissement par le hêtre.

Pour les peuplements envahis par le hêtre avec un historique de perturbation sylvicole (CDL, CJ), ceux en zone infesté (2 *perturbations*) semblent mieux régénérés en d'érable à sucre (typologie 2 et 4) que ceux en zone saine (1 *perturbation*) (Annexe. Tableau 3). D'un autre côté, sans perturbation récente, on observe plus de peuplements bien régénérés en érable à sucre non-envahis (typologie 6) en zone saine (0 *perturbation*) qu'en zone infestée (1 *perturbation*).

Notre hypothèse est que la réponse du hêtre et de l'érable à sucre aux différentes ouvertures ou perturbations (traitements sylvicoles et MCH), pourraient entraîner une plus grande hétérogénéité des peuplements.

3.4. Analyse spatiale de la répartition de la MCH et l'envahissement par le hêtre

La MCH

La présence de la cochenille, ainsi que la MCH était distribuée de façon assez uniforme entre les parcelles centrales et les parcelles satellites. C'est-à-dire que lorsqu'on se trouve dans une parcelle centrale avec présence moyenne de la cochenille, il y a de fortes chances que les parcelles satellites à celle-ci aient aussi un niveau moyen de présence de cochenille.

Pour avoir des résultats différents sur l'intensité de la présence de la cochenille ou la MCH, leurs répartitions auraient pu être analysées à l'échelle du paysage. À cette échelle, la littérature mentionne que la dispersion de la MCH serait dépendante de la surface terrière en hêtre et de la bande de 100 m d'altitude (Griffin *et al.* 2003, Witter *et al.* 2005).

L'envahissement par le hêtre

Le constat est bien différent pour l'envahissement par le hêtre. En effet, même si la parcelle centrale est fortement envahie par le hêtre, on ne peut pas savoir si les parcelles satellites (localisées à 50m de distance) sont envahies ou non, à moins de les visiter. L'analyse spatiale de la répartition de l'envahissement permet de comprendre un peu mieux l'hétérogénéité de l'envahissement que l'on observe. Il est important de comprendre ici que l'on travaille en termes de pourcentage de **densité de hêtre/hêtre et érable** en régénération. Un pourcentage de 85% (*hêtre/hêtre + érable*) représente donc un peuplement avec une proportion beaucoup plus élevée

de hêtre en régénération par rapport à l'érable à sucre. D'un autre côté, un pourcentage de 30% représente un peuplement avec une densité d'érable à sucre en régénération plus forte que le hêtre.

L'ensemble des résultats sur l'envahissement par le hêtre¹⁵ montrent que les peuplements tendent vers une valeur de 65% (donc dominé par le hêtre, mais avec une présence importante d'érable à sucre) (Figure 14 A). Cette proportion de *hêtre/hêtre et érable* de 65%, ressemble aux résultats de l'étude de Gravel *et al.* (2011) en Estrie et dans Portneuf¹⁶.

Pour les 18 premiers kilomètres, l'estimation de la distance pour changer de pourcentage d'envahissement par le hêtre lorsqu'on se trouve dans une érablière peu-envahie ou envahie sont représentées à la Figure 14 A. Lorsque la parcelle de départ est très envahie avec peu de régénération en érable à sucre, la dominance du hêtre a tendance à diminuer passant de 85% à 65% (Figure 14 A). Aussi, pour les parcelles de départ peu envahies bien régénérées en érable à sucre, la dominance du hêtre a tendance à augmenter passant de 30% à 65%.

Pour les peuplements bien régénérés en érable à sucre, peu envahis par le hêtre, les résultats montrent qu'on commence à rencontrer des peuplements avec des niveaux moyens d'envahissement par le hêtre en moyenne après 465 m et pour observer de l'envahissement avec peu de régénération en érable, la distance moyenne (rayon) est d'environ 2000 m.

À petite échelle (moins de 1000 hectares)

Les résultats de la présente étude montrent que si l'on se trouve dans une parcelle centrale fortement envahie par le hêtre (valeur de plus de 85%), il est possible qu'après seulement 50m (donc dans les parcelles satellites), on se retrouve dans des situations d'envahissement très différentes. En effet, la densité moyenne *hêtre/hêtre et érable* est de 71% dans les parcelles satellites associées aux parcelles centrales fortement envahies.

L'envahissement par le hêtre est présent dans les différentes régions de l'Outaouais. Cependant, l'hétérogénéité, ou la répartition spatiale de cet envahissement est différente entre l'ouest (Haute-Gatineau et Pontiac) et l'est (Papineau) de l'Outaouais. En effet, on peut voir qu'il y a une plus forte variation des ratios (%) dans l'est (Figure 14 B). À l'est, après 100m, la moyenne d'envahissement passe de 85 à 58%, ce qui laisse supposer une plus grande hétérogénéité qu'à l'ouest, où cette valeur demeure au-dessus de 70%.

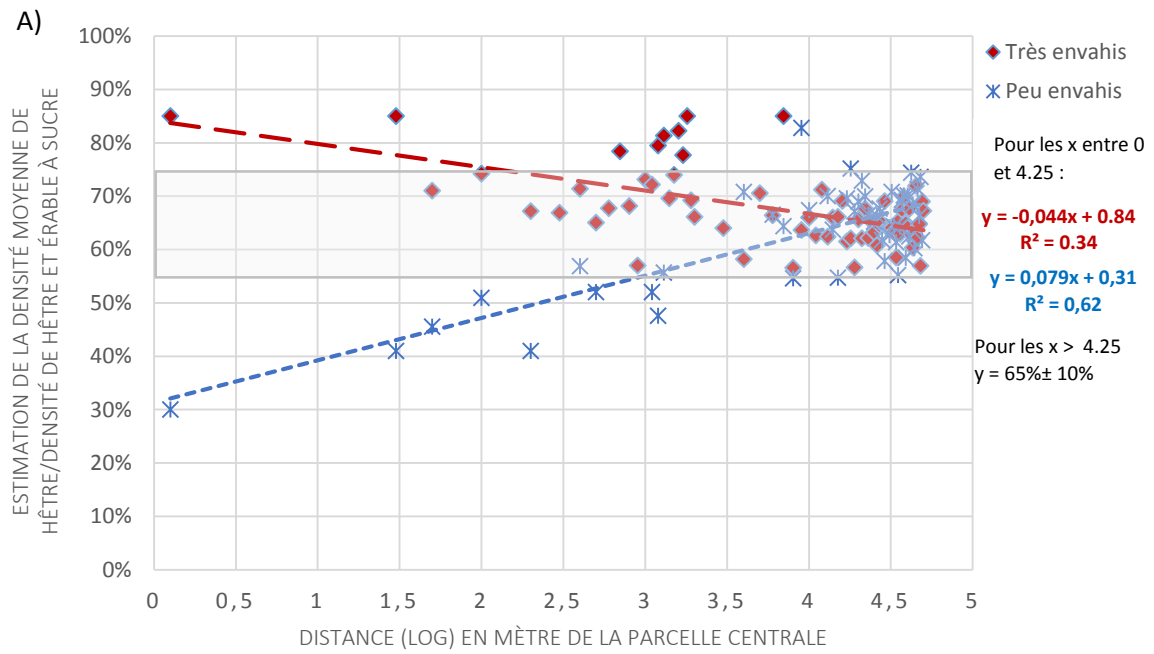
Pour les érablières bien régénérées et peu envahies, on observe aussi une grande différence entre l'ouest et l'est. À l'est, il semble y avoir plus d'hétérogénéité après seulement 50m; la moyenne passant de 30% à 58%. Les érablières peu envahies dans l'est semblent rapidement entourées d'érablières moyennement ou fortement envahies par le hêtre (moins de 100m de rayon). Ainsi, dans la région de Papineau, les érablières à hêtre non envahies sont comme des petits îlots entourés de parcelles moyennement ou fortement envahies par le hêtre.

À l'ouest, pour une échelle de moins de 1000m de rayon du centre, la répartition des érablières bien régénérées et peu envahies semble plus homogène, avec des moyennes d'envahissement inférieures à 40% (peu ou pas envahis). Ces informations peuvent être visualisées à la Carte 5.

¹⁵ Estimé par le pourcentage moyen de la densité de gaules et perches de hêtre/densité de hêtre et érable à sucre.

¹⁶ Cette étude est faite sur les gaules de hêtre et d'érable à sucre seulement.

Ainsi, dans la Haute-Gatineau et dans le Pontiac, on retrouve de plus grandes régions avec des érablières à hêtre peu envahies en régénération (gaule et perche) de hêtre.



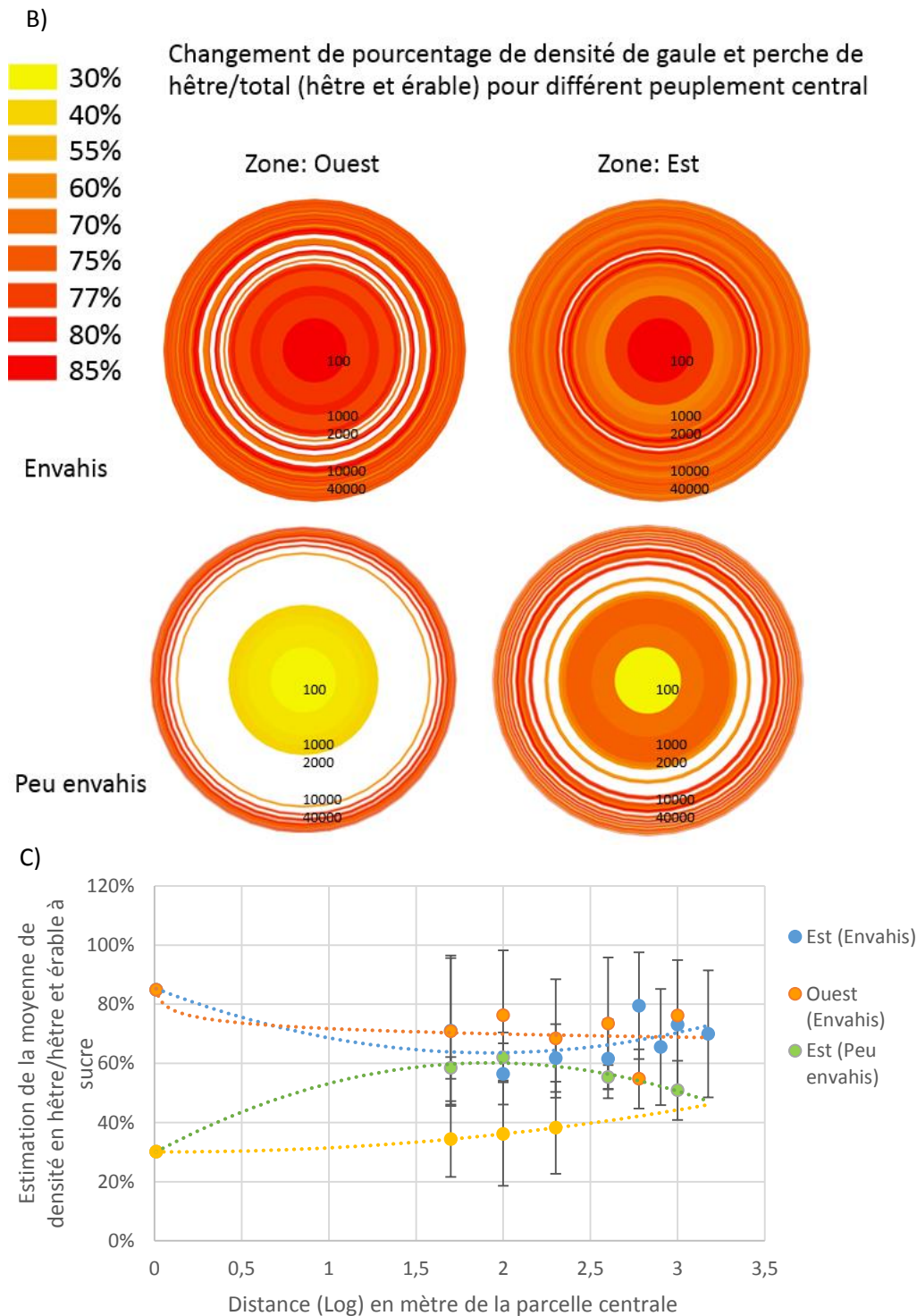


Figure 14. Changement de pourcentage de densité de gaule et perche de hêtre (m^2/ha) sur la densité totale de gaule et perche de hêtre et d'érable à sucre (m^2/ha) estimé selon les valeurs de la typologie (y), en fonction de la distance (en mètre, échelle log) des parcelles centrales (x) envahies avec peu de régénération en érable à sucre (Envahies) et des parcelles centrales peu envahies avec régénération en érable à sucre (Peu envahies) A) pour l'ensemble des parcelles B) dans la zone Ouest (Haute-Gatineau et Pontiac) et Est (Papineau) et C) zoom sur une plus petite échelle (0 à 2000 m). Les barres d'erreur représentent l'écart type.

4. Recommandations et conclusion

4.1. En liens avec la maladie corticale du hêtre

La présente étude démontre l'hétérogénéité de l'avancée de la MCH dans la région de l'Outaouais. Dans les zones d'infestation, il apparaît que la mortalité n'est pas encore très élevée et qu'il est encore temps de récolter les tiges malades avant qu'elles ne meurent. Toutefois, si l'on ne fait pas assez rapidement, les opérations de récolte deviendront de plus en plus difficiles au point de vue de la sécurité des travailleurs. Afin d'éviter de se retrouver dans l'ouest de la région avec la même problématique que l'on vit présentement dans l'est, il sera important de diminuer la surface terrière et le diamètre moyen du hêtre pour diminuer les pertes associées à la MCH, mais aussi éviter de se retrouver avec des forêts dégradées où on aurait une surface terrière très faible, une augmentation du hêtre dans le stade gaulis-perchis et une faible régénération en érable à sucre.

Par ailleurs, il serait extrêmement important de procéder à des inventaires de reconnaissance, là où en envisage des interventions forestières, pour pouvoir cibler les peuplements pour lesquels des interventions sont les plus pressantes. À cet égard, la typologie de la MCH développée dans le cadre de ce projet peut être fort utile, car elle permet d'identifier les dégâts actuels et d'estimer les dégâts futurs si rien n'est fait. De plus, la typologie développée permet de développer des traitements sylvicoles associés aux différentes problématiques.

Toujours concernant la MCH, il sera extrêmement intéressant de vérifier sa propagation au cours des prochaines années et, plus particulièrement, si des froids extrêmes peuvent freiner son développement.

Plusieurs études suggèrent de conserver des tiges de hêtre de grand diamètre qui sont résistantes à la MCH lors d'opération de récolte (Farrar et Ostrofsky 2006, Houston 2001, Ramirez *et al.* 2007, Houston and Houston 2000). Les suggestions de maintien de biodiversité sont traitées en Annexe à la p.66.

4.2. En liens avec l'envahissement par le hêtre

La problématique spatiale d'envahissement du hêtre en régénération est bien différente de celle de la MCH. Alors que la MCH est concentrée dans l'est de la région, on retrouve des peuplements envahis par le hêtre d'est en ouest. Aussi, alors que le niveau d'infestation par la MCH est très homogène à l'échelle du peuplement, c'est beaucoup plus complexe pour le niveau d'envahissement. À cet égard, on retrouve encore une fois une dichotomie est-ouest. Dans l'ouest, la localisation d'une placette-échantillon dans un peuplement aura peu d'effets sur la caractérisation (ex. : envahi ou non-envahi) que l'on fera de celui-ci. Dans l'est toutefois, l'hétérogénéité à l'échelle spatiale est telle que l'on peut changer la caractérisation du tout au tout sur une distance d'à peine 50 m. Cela occasionne des problématiques d'inventaire, mais surtout des problématiques liées à la sylviculture. En effet, une telle hétérogénéité remet en question la notion même du concept de peuplement forestier. Comment, en effet, proposer la même intervention sylvicole sur des superficies qui ne présentent pas les mêmes défis d'aménagement. Nous croyons, encore une fois, que la typologie développée pour décrire l'envahissement peut à la fois être utile pour décrire très rapidement les peuplements

spatialement. Aussi, l'utilisation combinée, telle qu'utilisée dans ce projet, de parcelles centrales et satellites semble une avenue intéressante pour décrire les peuplements.

Dans certaines juridictions où la MCH est apparue depuis longtemps, on semble souvent faire un lien direct de cause à effets entre ces deux problématiques, la MCH causant le drageonnement du hêtre et favorisant son expansion. La présente étude montre d'abord que la problématique d'envahissement précède souvent la MCH, ce qui discrédite l'hypothèse de la MCH comme cause possible à l'envahissement dans certains peuplements. Notre étude semble plutôt démontrer que la MCH favoriserait l'envahissement, d'une part, par l'augmentation de la lumière qu'elle crée et, d'autre part, par l'augmentation de la proportion de semis issus de drageons, qui aurait une meilleure survie que ceux issus de graines.

La présente étude a permis de dresser un portrait général pour la région de l'Outaouais de deux problématiques importantes reliées à l'aménagement des érablières à hêtre, la MCH et l'envahissement au stade gaulis-perchis. Elle a aussi permis d'identifier les facteurs qui semblent favoriser leur déploiement ainsi que d'identifier des liens causaux probables entre les deux problématiques. Bien des recherches sont encore nécessaires, pour les deux problématiques, afin de bien comprendre les processus qui les favorisent ou défavorisent et surtout pour comprendre comment on peut intervenir efficacement pour limiter leur déploiement. Nous croyons que la présente étude dresse une base commune de l'état des faits à partir de laquelle les intervenants forestiers de la région de l'Outaouais peuvent discuter et envisager des solutions.

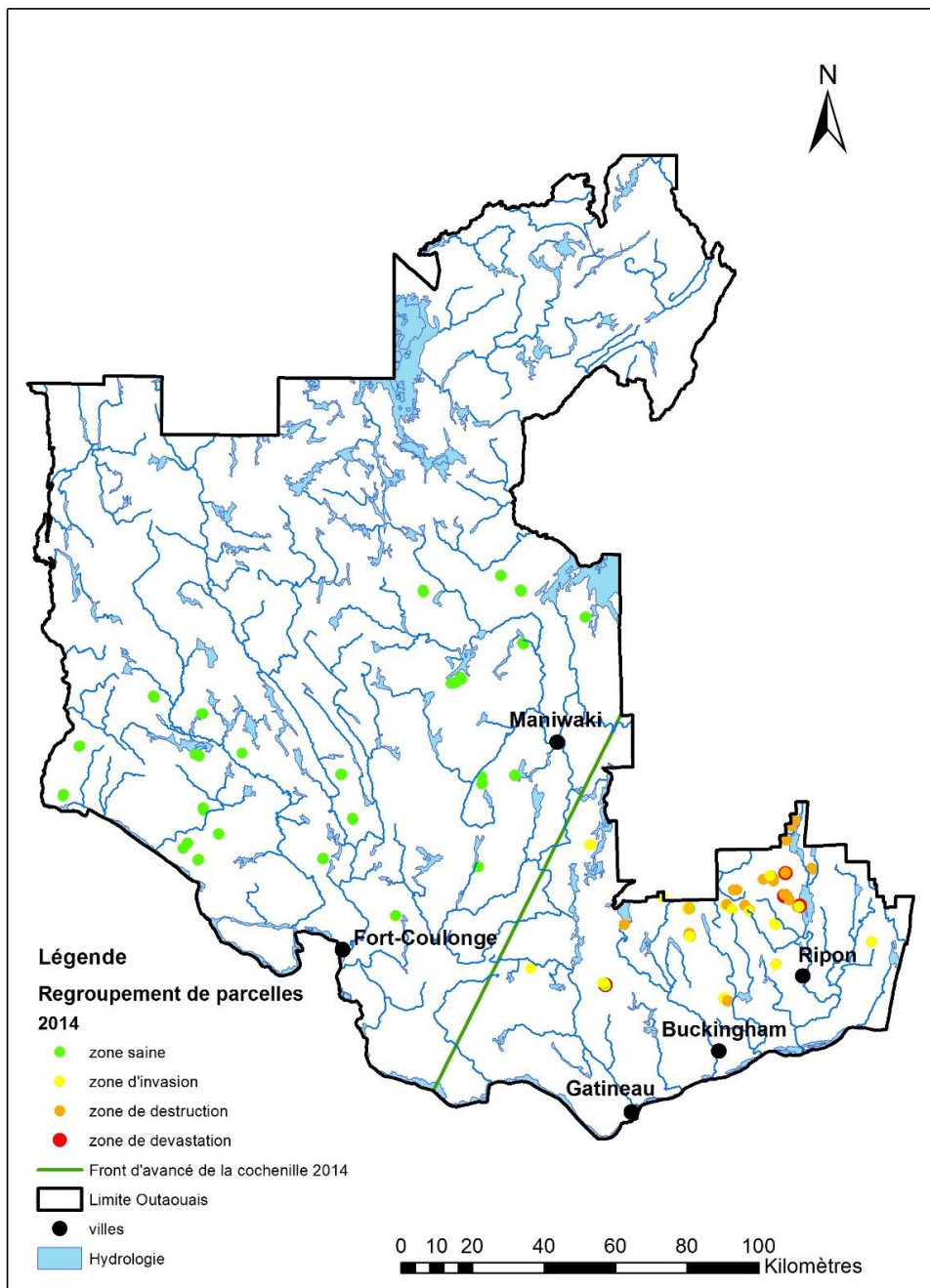
Littérature

- Angers, V.-A. 2004. Comparaison de la structure et de la composition d'érablières anciennes et aménagées (coupe de jardinage et coupe à diamètre limite). Mémoire de M.Sc., Université du Québec à Montréal.
- Beaudet, M., Messier, C., 2008. Beech regeneration of seed and root sucker origin: A comparison of morphology, growth, survival, and response to defoliation. *Forest Ecology and Management* 255, 3659–3666.
- Beaudet, M., Messier, C., Paré, D., Brisson, J., Bergeron, Y., 1999. Possible mechanisms of sugar maple regeneration failure and replacement by beech in the Boisé-des-Muir old-growth forest, Quebec. *Ecoscience* 6, 264–271.
- Canham, C.D., Finzi, A.C., Pacala, S.W., Burbank, D.H., 1994. Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 337–349.
- Côté, B. 1997. La monoculture d'érable et l'acidification des sols. McGill, campus Macdonald. 6p.
- Delagrangé, S., Nolet, P., Bannon, K., 2010. Effet de l'ouverture du couvert, du dégagement et du chaulage sur la composition et la croissance de la régénération d'érablières envahies par le hêtre : Remesure 3 ans après sa mise en place. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec, Ripon, Qc, Canada.
- Delagrangé, S., Nolet P. et D. Bouffard. 2009. Impact du dégagement et du chaulage sur la régénération en érable à sucre et en hêtre dans des érablières en voie d'hêtrisation soumis à différentes intensités de prélèvement du couvert. 33 p.
- Dijkstra, F.A., Geibe, C., Holmström, S., Lundström, U.S., Van Breemen, N., 2001. The effect of organic acids on base cation leaching from the forest floor under six North American tree species. *European Journal of Soil Science* 52, 205–214.
- Doyon, F., Gravel, D., Nolet, P., Bouillon, D., Majeau, L., Messier, C., Beaudet, M., 2003. L'envahissement par le hêtre dans les érablières de l'Outaouais: phénomène fantôme ou glissement de balancier.
- Duchesne, L., Ouimet, R., Moore, J.-D., Paquin, R., 2005. Changes in structure and composition of maple-beech stands following sugar maple decline in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* 208, 223–236.
- Duchesne, L., Moore J.-D. et R. Ouimet. 2006. Envahissement du hêtre dans les érablières. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de la recherche forestière et Direction de l'environnement forestier. Avis de recherche forestière no4.
- Farrar, A., Ostrofsky, W.D., 2006. Dynamics of American Beech Regeneration 10 Years following Harvesting in a Beech Bark Disease-Affected Stand in Maine. *Northern Journal of Applied Forestry* 23, 192–196.
- Forrester, J.A., McGee, G.G., Mitchell, M.J., 2003. Effects of Beech Bark Disease on Aboveground Biomass and Species Composition in a Mature Northern Hardwood Forest, 1985 to 2000. *Journal of the Torrey Botanical Society* 130, 70–78.
- Garnas, J.R., Ayres, M.P., Liebhold, A.M., C. Evans. 2011. Subcontinental impacts of an invasive tree disease on forest structure and dynamics. *Journal of Ecology*, 99, 532–541.
- Gravel, D., Beaudet, M., Messier, C., 2011. Sapling age structure and growth series reveal a shift in recruitment dynamics of sugar maple and American beech over the last 40 years. *Canadian Journal of Forest Research* 41, 873–880.
- Griffin, J.M., Lovett, G.M., Arthur, M.A., Weathers, K.C., 2003. The distribution and severity of beech bark disease in the Catskill Mountains, N.Y. *Canadian Journal of Forest Research* 33, 1754–1760.
- Hane, E.N., 2003. Indirect effects of beech bark disease on sugar maple seedling survival. *Canadian Journal of Forest Research* 33, 807–813.

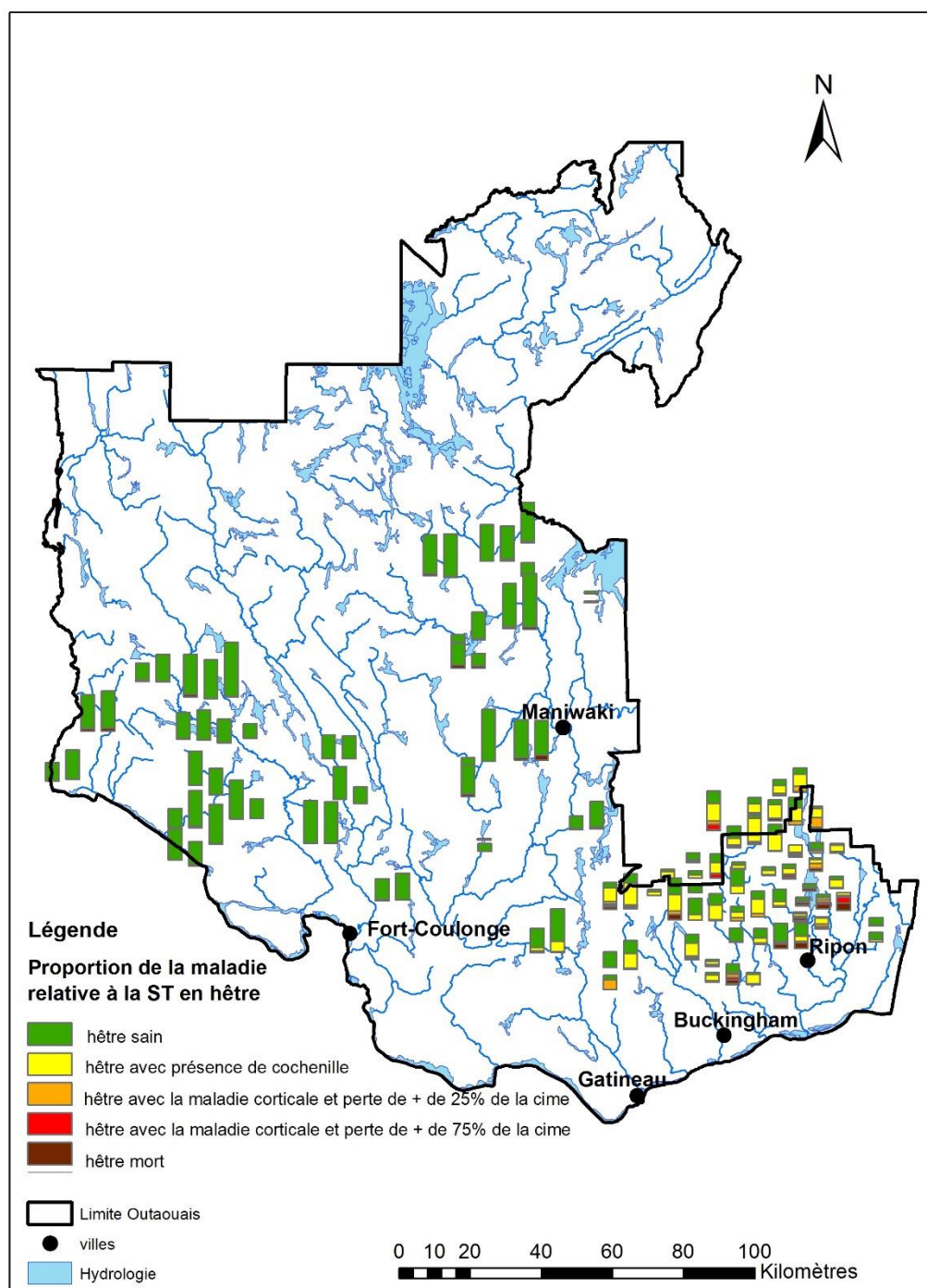
- Houston, D.R., 2001. Effect of Harvesting Regime on Beech Root Sprouts and Seedlings in a North-central Maine Forest Long Affected by Beech Bark Disease. Res. Pap. NE-717. US Dept. of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, PA, USA.
- Houston, D. R. and J. T. O'Brien. 1983. Beech bark disease. USDA For. Serv. For. Insect Dis. Leaflet. 75.
- Houston, D. B. and D. R. Houston. 2000. Allozyme genetic diversity among *Fagus grandifolia* trees resistant or susceptible to beech bark disease in natural populations. Can. J. For. Res. 30: 778-789.
- Houston, D.R. 1994. Temporal and spatial shift within the *Nectria* pathogen complex associated with beech bark disease of *Fagus grandifolia*. Can. J. For. Res. 24: 960-968.
- Houston, D.R. and H.T. Valentine. 1988. Beech bark disease: the temporal pattern of cankering in aftermath forests of Maine. Can. J. For. Res. 18: 38-42.
- Jones, R.H., Raynal, D.J., 1987. Root sprouting in American beech: production, survival, and the effect of parent tree vigor. Canadian Journal of Forest Research 17, 539–544.
- Krabel, D., and R. Petercord. 2000. Genetic diversity and bark physiology of the European beech (*Fagus sylvatica*): a coevolutionary relationship with the beech scale (*Cryptococcus fagisuga*). Tree Physiol. 20: 485-491.
- Latty, E. F., C. D. Canham and P. L. Marks. 2003. Beech bark disease in northern hardwood forests: the importance of nitrogen dynamics and forest history for disease severity. Can. J. For. Res. 33: 257-268.
- Lavallée, R., Laflamme, G., 2010. Le hêtre menacé par une maladie redoutable en Amérique. Progrès Forestier Printemps, 31–33.
- Le Guerrier, C., Marceau, D.J., Bouchard, A., Brisson, J., 2003. A modelling approach to assess the long-term impact of beech bark disease in northern hardwood forest. Canadian Journal of Forest Research 33, 2416–2425.
- Lessard, G. et S. Côté. 2007. Options sylvicoles quand le jardinage par pied d'arbre ne s'applique pas. CERFO, Centre collégial de transfert de technologie en foresterie. Rapport. 288p.
- Lessard, G., Van Der Kelen G., Gauthier P. et F. Guillemette. 2005. Détermination des paramètres des forêts aptes au régime du jardinage (phase I). Rapport. 156 p.
- Mccullough, D.G., Heyd, R.L., O'Brien, J.G., 2005. Biology and Management of Beech Bark Disease. Michigan's Newest Exotic Forest Pest. Extension Bulletin E-2746.
- McNulty, S.A., Masters, R.D., 2005. Changes to the Adirondack Forest: Implications of Beech Bark Disease on Forest Structure and Seed Production, in: Masters, R.D., Evans, C.A., Lucas, J.A., Twery, M.J. (Eds.), Beech Bark Disease: Proceedings of the Beech Bark Disease Symposium. USDA Forest Service, Saranac Lake, New York, pp. 52–57.
- Messier, C., Beaudet M. et D. Greene. 2010. Évaluation de l'effet du jardinage et des coupes par trouées sur la dynamique de la régénération des érablières (strates ErFt et ErBj) : vers le développement d'outils de planification.
- Mize, C.W., Lea, R. V, 1979. The effect of the beech bark disease on the growth and survival of beech in northern hardwoods. European Journal of Forest Pathology 9, 242–248.
- Motchula, T. and C.M. Buddle. 2009. Factors affecting the distribution of beech bark disease in two beech-maple forests in south-western Quebec. Mémoire de Maîtrise. McGill.
- MRNF, 2009. Insectes, maladies et feux dans les forêts québécoises. Rapport annuel 2008. Québec, Qc.
- Nolet, P., Bouffard, D., Doyon, F., Delagrangé, S., 2008. Relationship between canopy disturbance history and current sapling density of *Fagus grandifolia* and *Acer saccharum* in a northern hardwood landscape. Canadian Journal of Forest Research 38, 216–225.
- Nolet, P. 2012. Programme de recherche sur le hêtre à grandes feuilles. Institut des Sciences de la Forêt tempérée, Ripon, Qc. 41 p.

- Ramirez, M., M.J. Krasowski and J.A. Loo. 2007. Vegetative propagation of American beech resistant to beech bark disease. *Hort. Sci.* 42(2): 320-324.
- Roy. 2013. Impact des activités d'exploitation et d'aménagement acéricole sur la faune et la biodiversité : Revue de littérature. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec.
- Shigo, A.L., 1972. The Beech Bark Disease Today in the Northeastern U.S. *Journal of Forestry* 70, 286–289.
- Twery, M.J., Patterson III, W.A., 1984. Variations in beech bark disease and its effects on species composition and structure of northern hardwood stands in central New England. *Canadian Journal of Forest Research* 14, 565–574.
- Van Leaven, K., Evans, C.A., 2005. A Preliminary Examination of Beech Bark Disease and the Influence of Soil Moisture on Bark Thickness and Disease Status in the Northern Adirondack Uplands, in: Evans, C.A., Lucas, J.A., Twery, M.J. (Eds.), *Beech Bark Disease: Proceedings of the Beech Bark Disease Symposium*. USDA Forest Service, Saranac Lake, New York, pp. 60–64.
- Wagner, S., Collet, C., Madsen, P., Nakashizuka, T., Nyland, R.D., Sagheb-Talebi, K., 2010. Beech regeneration research: From ecological to silvicultural aspects. *Forest Ecology and Management* 259, 2172–2182.
- Wainhouse, D. and R. Deeble. 1980. Variation in susceptibility of beech (*Fagus* spp) to beech scale (*Cryptococcus fagisuga*). *Ann. Sci. forest.* 37(4): 279-289.
- Wainhouse, D. and I.G. Gate. 1988. The beech scale. In *Dynamics of forest insect populations*. Edited by A.A. Berryman. Plenum Press, New York. pp. 67-85.
- Wargo, Ph.M. 1988. Amino nitrogen and phenolic constituents of bark of American beech, *Fagus grandifolia*, and infestation by beech scale, *Cryptococcus fagisuga*. *Eur. J. For. Path.* 18: 279-290.
- Wieferich, D.J., McCullough, D.G., Hayes, D.B., Schwalm, N.J., 2011. Distribution of American Beech (*Fagus grandifolia*) and Beech Scale (*Cryptococcus fagisuga* Lind.) in Michigan from 2005 to 2009. *Northern Journal of Applied Forestry* 28, 173–179.
- Wiggins, G.J., J.F. Grant, M.T. Windham, R.A. Vance, B. Rutherford, R. Klein, K. Johnson and G. Taylor. 2004. Associations between causal agents of the beech bark disease complex in the Great Smokey Mountains National Park. *Environ. Entomol.* 33(5): 1274-1281.
- Witter, J.A., Stoyenoff, J.L., Petrillo, H.A., Yocum, J.L., Cohen, J.I., 2005. Effects of beech bark disease on trees and ecosystems, in: Stoyenoff, J.L., Evans, C.A., Lucas, J.A., Twery, M.J. (Eds.), *Beech Bark Disease: Proceedings of the Beech Bark Disease Symposium*. USDA Forest Service, Saranac Lake, New York, pp. 28–35.

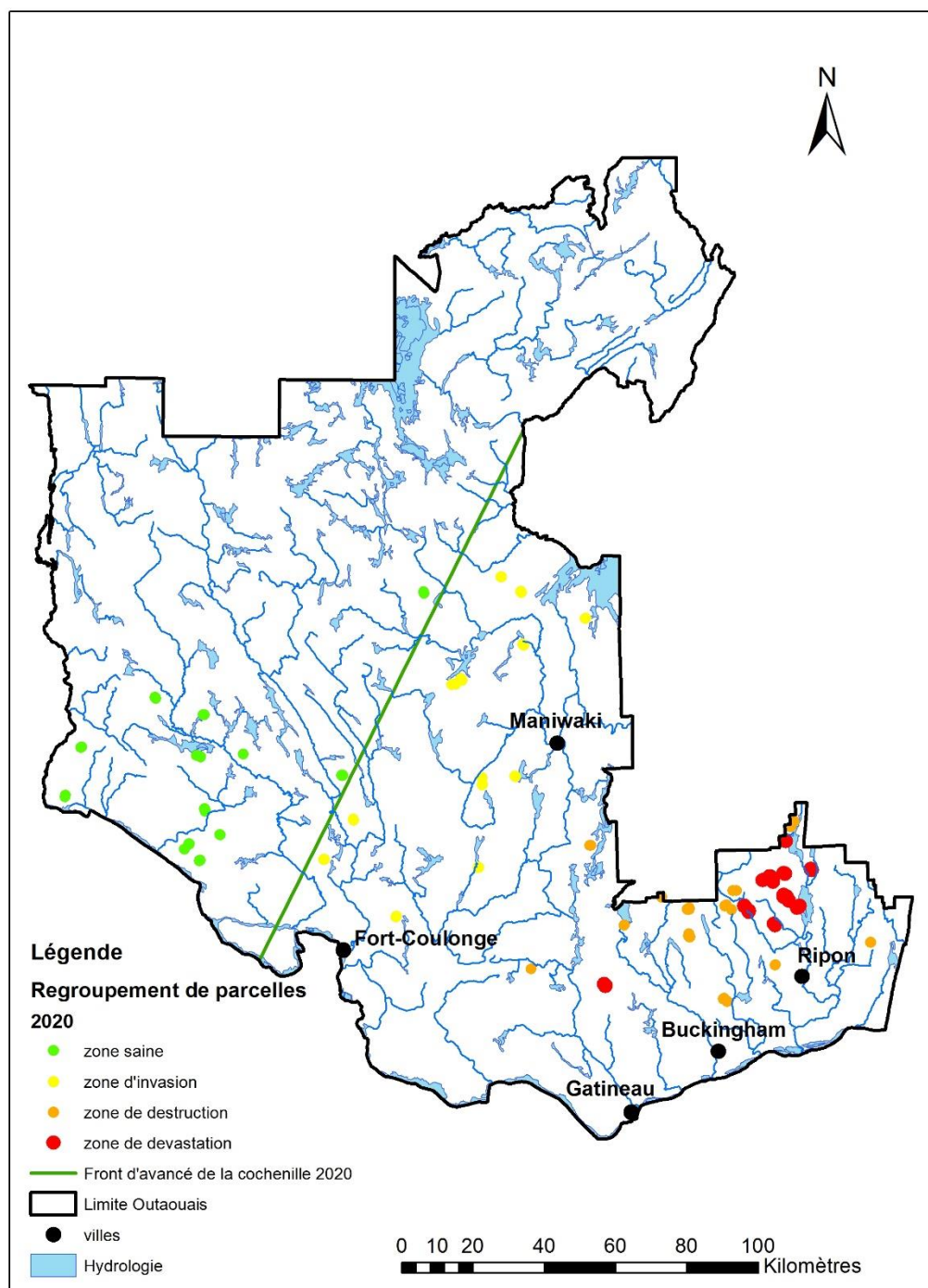
Les Cartes

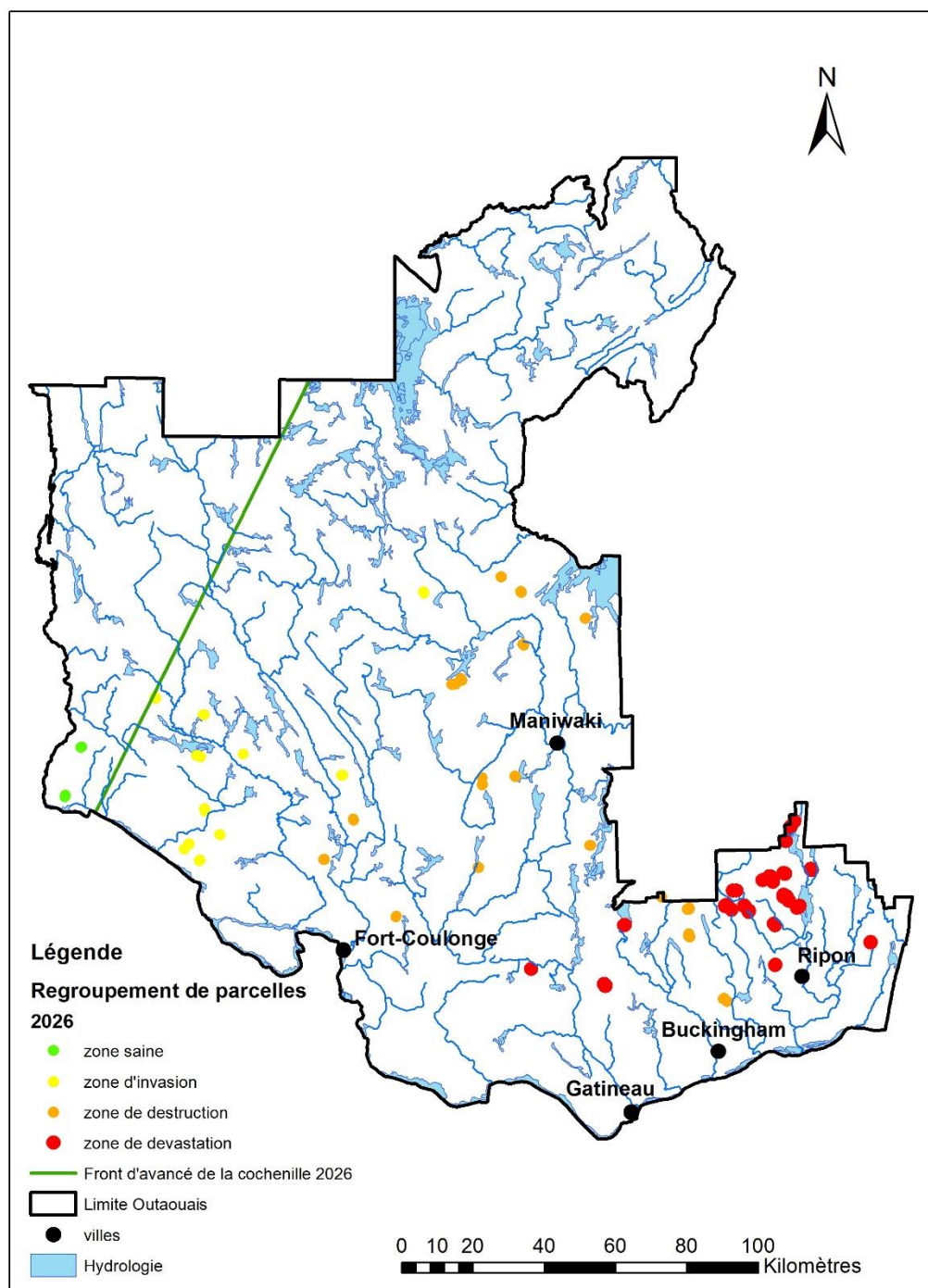


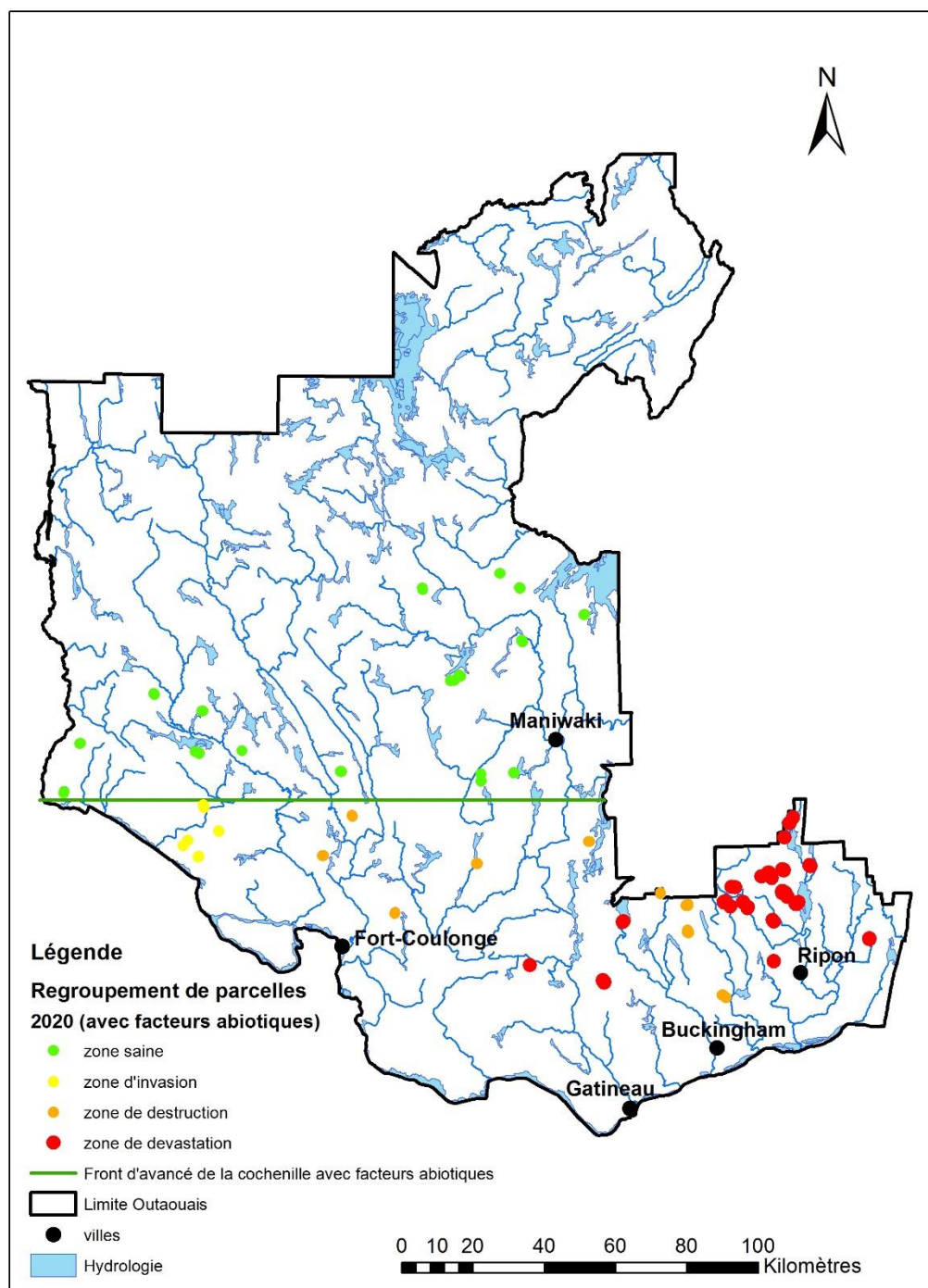
Carte 1. Front d'avancée de la cochenille du hêtre et état d'infestation des hêtres par la maladie corticale en Outaouais, portrait de 2014. Chaque point représente un regroupement de 5 parcelles.



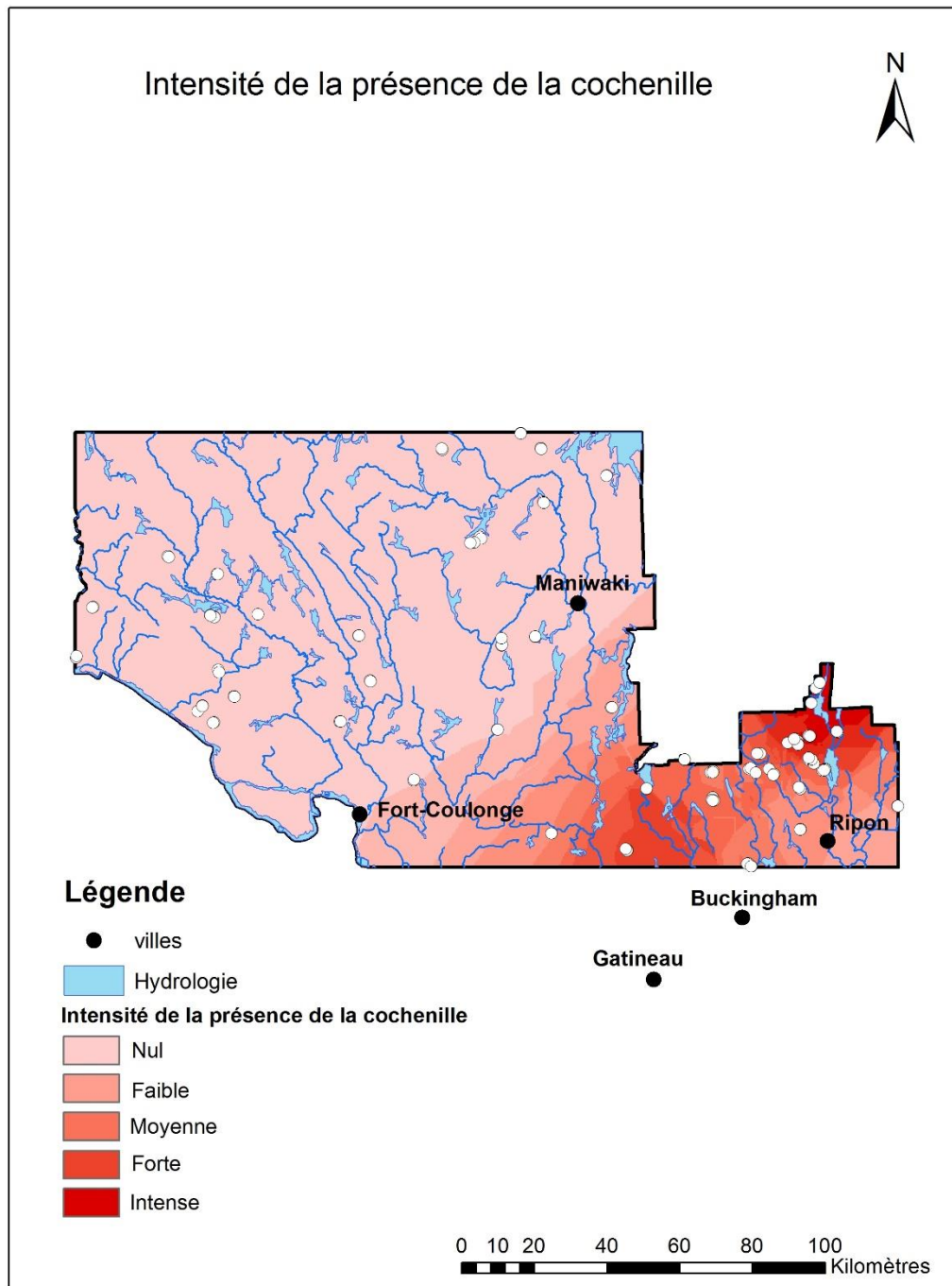
Carte 2. Surface terrière en tiges de hêtres (1) saines, (2) infestées par la cochenille, (3) avec la maladie corticale du hêtre et perte de cime (entre 25 et 75%), (4) avec la maladie corticale du hêtre et perte de plus de 75% de la cime et (5) mortes pour les différents regroupements de parcelles en Outaouais, portrait de 2014.



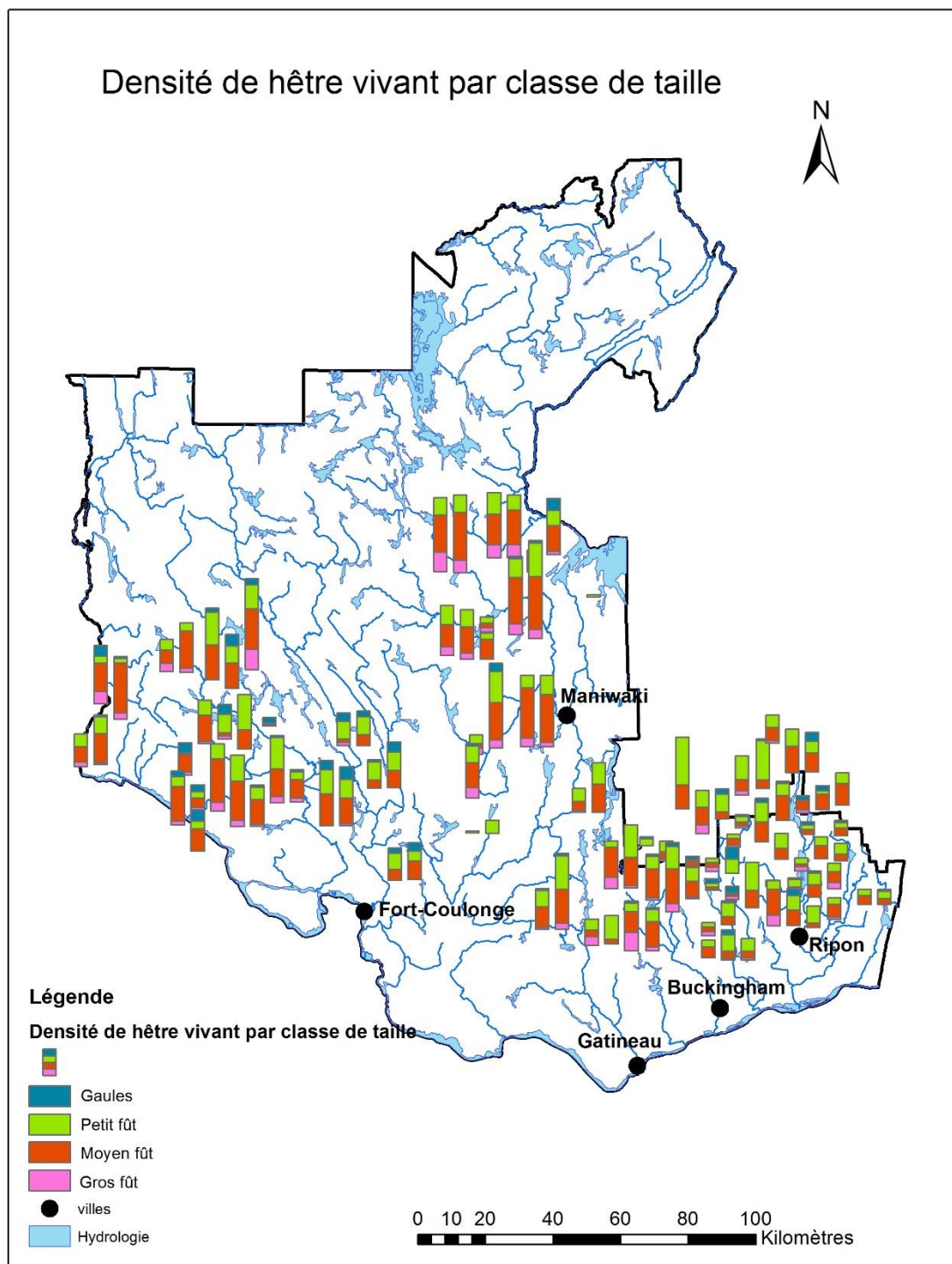




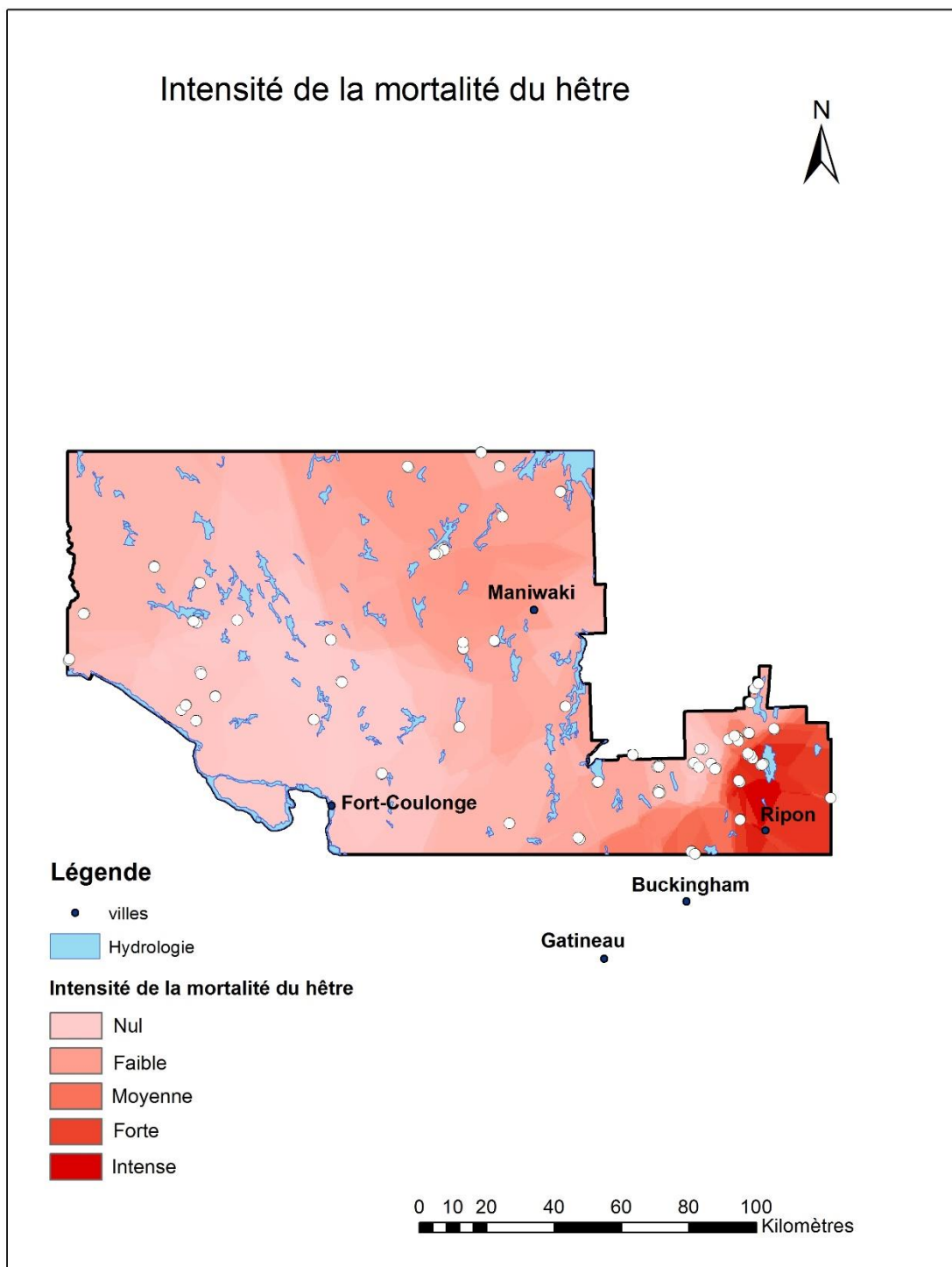
Carte 3. Front d'avancée de la cochenille et état d'infestation des hêtres par la maladie corticale en Outaouais, prévision pour 2020 et 2026 et 2026 avec facteurs abiotiques.



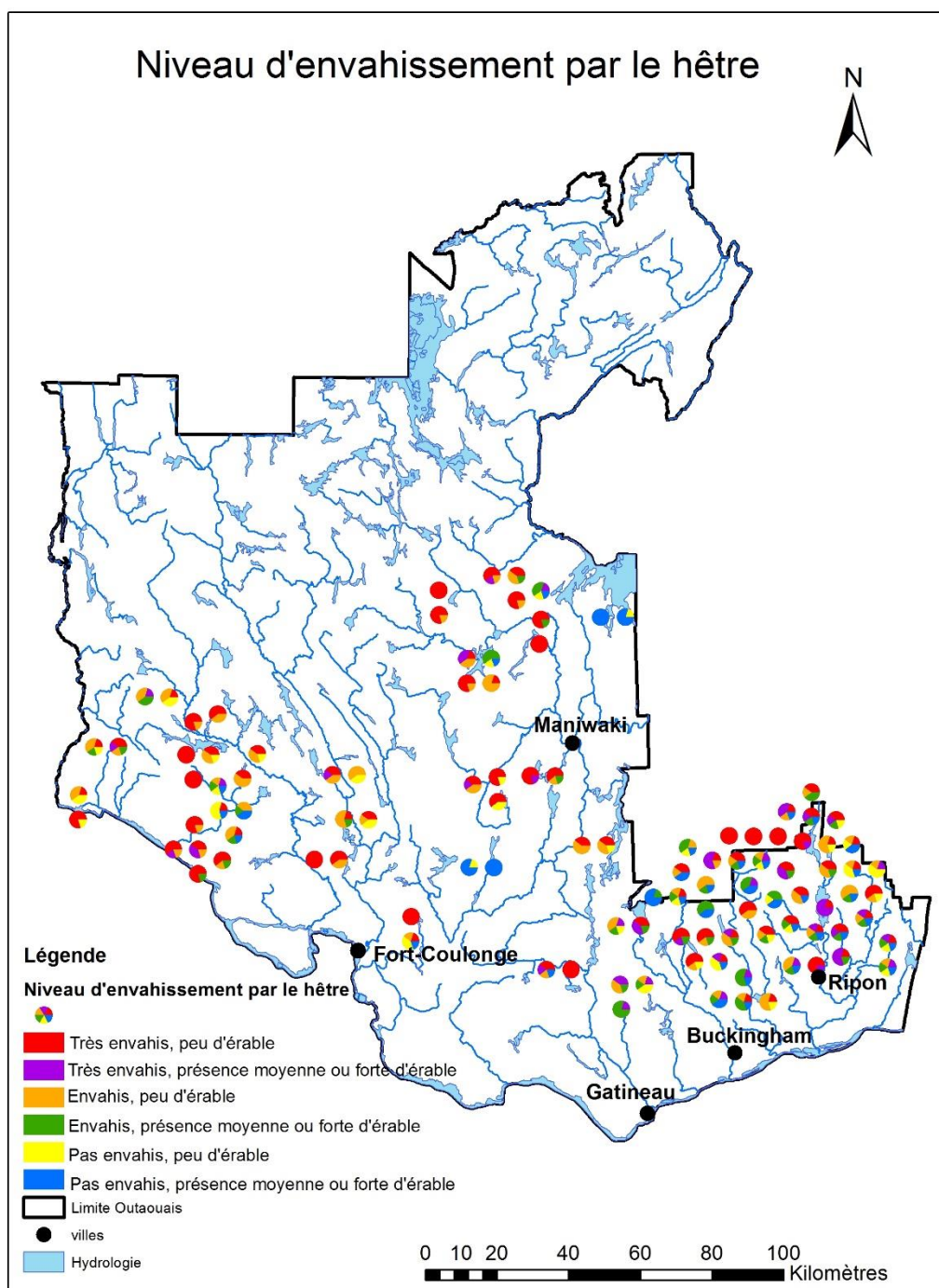
Carte 4. Intensité d'infestation des hêtres par la cochenille en Outaouais, portrait de 2014.



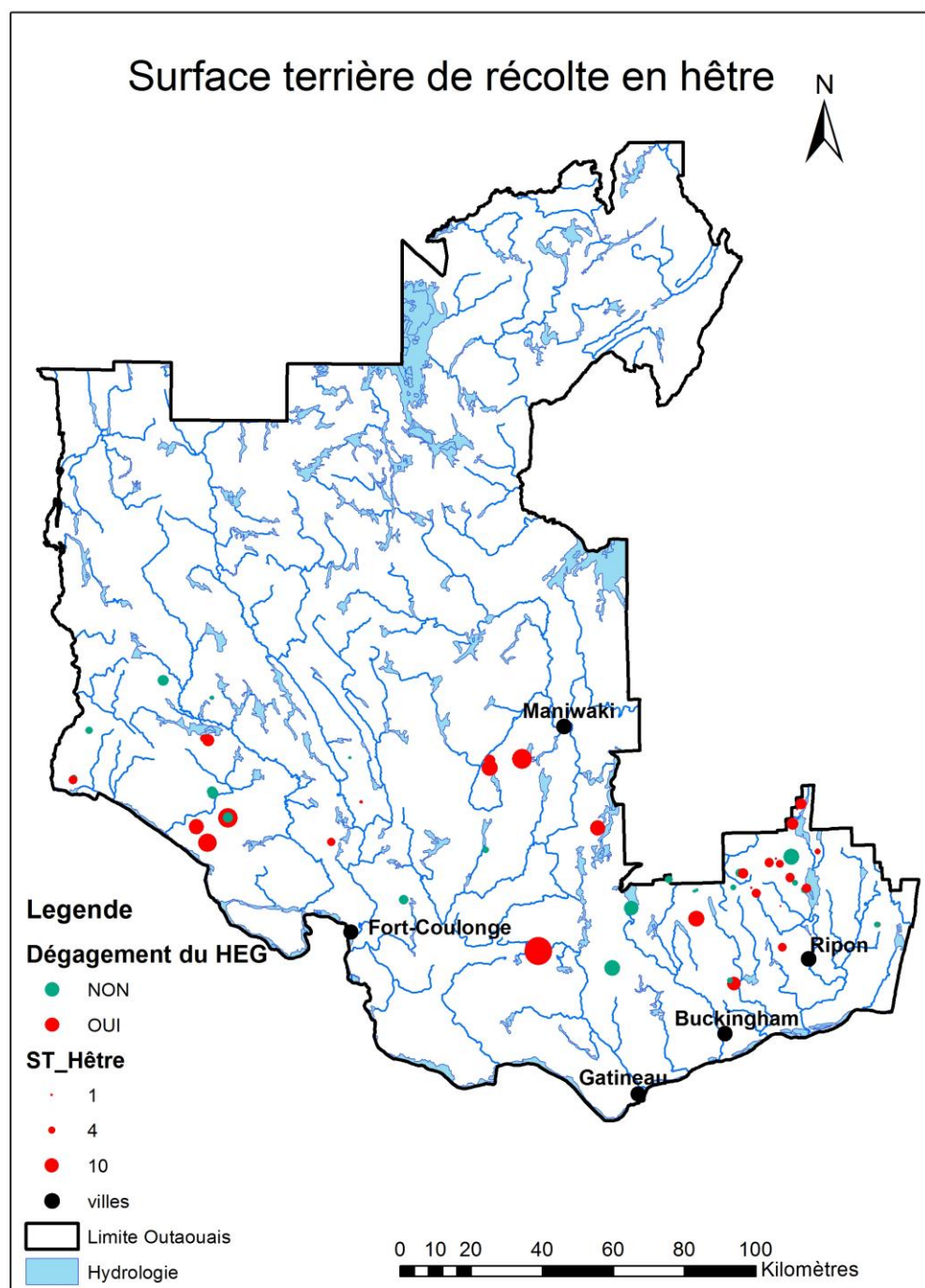
Carte 5. Surface terrière en tiges de hêtre par classe de taille pour les regroupements de parcelles en Outaouais, portrait de 2014.



Carte 6. Pourcentage de mortalité des tiges de hêtre en Outaouais, portrait de 2014.



Carte 7. Niveau d'envahissement par le hêtre et de présence de l'érable à sucre des strates de gaules et perches et fréquence des différents cas pour les regroupements de parcelles en Outaouais, portrait de 2014.



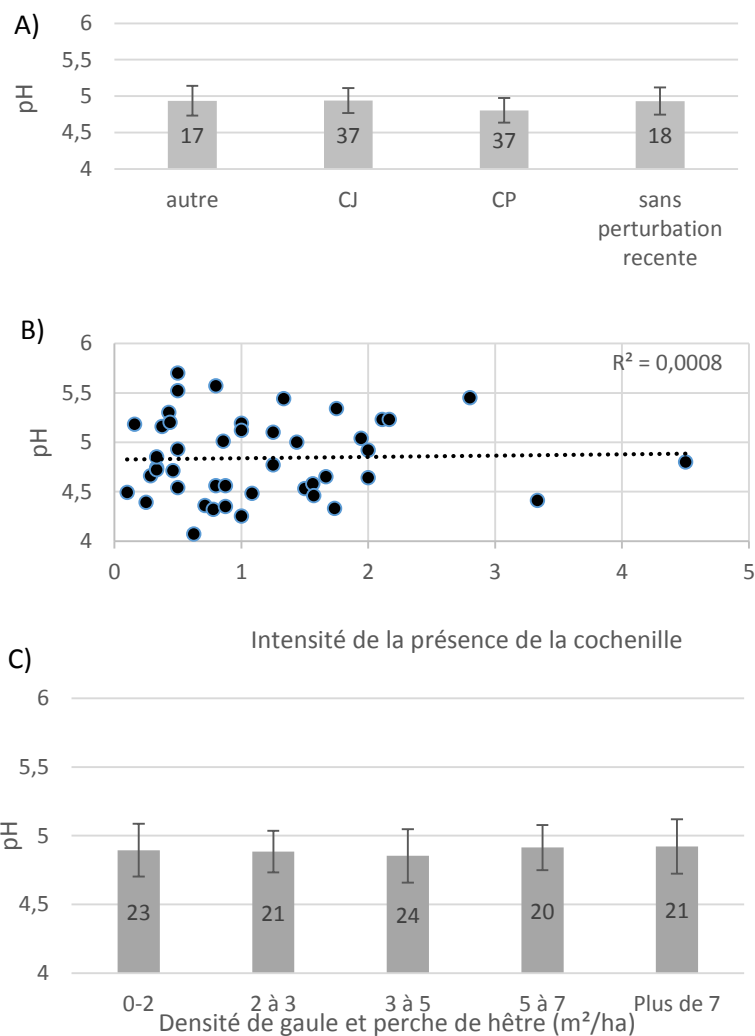
Carte 8. Suggestion de récolte de hêtre (ST récoltable) et de dégagement des gaules de hêtre (oui ou non) pour les regroupements de parcelles en Outaouais selon portrait de 2014, tenant compte de plusieurs facteurs. Les cercles représentent la ST de récolte en hêtre tenant compte de ces facteurs: Enlève les zones de dévastation (trop fort % de mortalité), enlève les zones avec de plus forte latitute (possiblement résistante), enlève les zones ou la récolte de hêtre et la conservation de tiges résistantes ($1 \text{ m}^2/\text{ha}$) entraînerait des $ST \leq 20 \text{ m}^2/\text{ha}$ ou de trop importante perte d'essence compagne. Les zones envahies par le hêtre (gaule et perche $\geq 4.4 \text{ m}^2/\text{ha}$) avec une faible régénération en érable à sucre ($\leq 1 \text{ m}^2/\text{ha}$), avec perturbation recensée, sont des zones où le dégagement de gaule de hêtre est aussi suggéré (en rouge : Oui).

Annexes

Interprétation de la comparaison de modèles : Explications pour l'interprétation des résultats de comparaison de LME avec effet aléatoire de la parcelle, clmm2 avec effet aléatoire de la parcelle, GLM, GLM.nb, GLM.poisson. La première colonne comprend la liste simplifiée des modèles testés et comparés dans l'analyse, le ID représente son identifiant, la colonne K représente le nombre de paramètre à estimer, la valeur d'AIC corrigée (AICc) est un indice qui permet de comparer les modèles entre eux : la valeur la plus faible étant celle qui correspond au meilleur modèle. Dans notre cas, où l'effectif est parfois faible, la valeur d'AIC est corrigée et devient l'indice AICc. Le Delta AICc, permet d'évaluer la 'distance' qui sépare l'AICc du meilleur modèle aux valeurs de l'AICc des autres modèles. On comprend ici qu'il n'est pas question d'accepter comme meilleur modèle un modèle qui ne serait pas largement le meilleur. La colonne Wt représente un indice qui donne une probabilité (%) de statuer que le modèle est le meilleur. Les meilleurs modèles (avec un Wt $\geq 15\%$) sont représentés en gras. Pour faciliter la lecture du document, quelques modèles avec des Wt faibles et leurs hypothèses ne sont pas présentés dans les tableaux, ce qui fait que la somme des Wt présentés ne sera pas toujours de 100%. Lorsqu'on parle de poids d'une variable dans le corps du texte, on se réfère à l'addition des Wt des modèles qui comportent cette variable; ce calcul est fait à partir de la totalité des modèles.

Annexe_Tableau 1. Liste des variables, des modèles choisis et des transformations. Code : DHP=diamètre moyen des hêtres, ST_H = Surface terrière en hêtre, ST_E = Surface terrière en érable à sucre, PERT = traitements sylvicoles, ERS = Érable à sucre, HEG = Hêtre, All = toutes les parcelles 545, Pool = regroupement des 545 parcelles en 109 groupes de 5 parcelles (4 satellites et 1 centrale), Centrale = les 109 parcelles centrales.

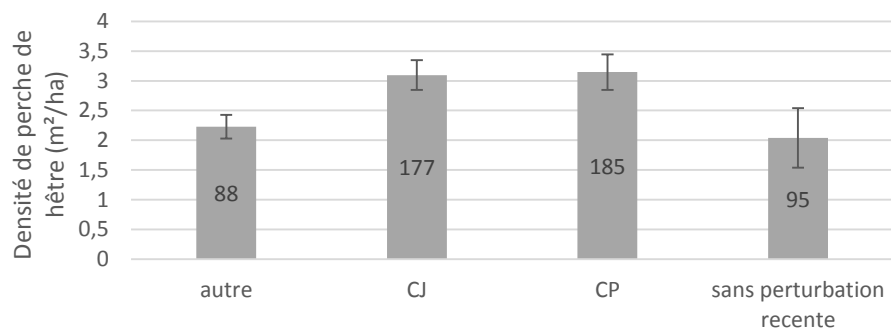
Type de test	Variable y	Transformation	Provenance de la table	Modèle complet choisis	Transformation de variable x	
lme (1/parcelle)	Intensité de la cochenille		All	DHP*ST_H*pente	pente	Square roots
GLM.nb	Mortalité des hêtres (pool)	integer	Pool	ST_H*Infestation*DHP		
Régression logistique	Densité de petit semis ERS	(2 classes): 0, plus de 0	Centrale	ST_E*PH*Gaulle HEG	Gaulle HEG	log(x+1)
GLM.nb	Densité de gaulle ERS	integer	Centrale	ST_E*SI*PH*Gaulle et perche HEG		
Régression logistique	Densité de gaulle ERS	(2 classes): 0, plus de 0	pool	ST_E*Gaulle et perche HEG*Infestation	ST_E	Square roots
lme (1/parcelle)	Densité de perche ERS	log(x+1)	all	ST_H*Infestation*PERT		
GLM.nb	Densité de petit semi HEG	integer	Centrale	Infestation*ST_H*PH		
GLM. Poisson	Densité de grand semi HEG	integer	Centrale	Infestation*ST_H*PH*PERT		
GLM. Poisson	Densité de gaulle HEG	integer	Centrale	Infestation*pente *PERT	pente	Square roots
Clmm2 (1/parcelle)	Densité de gaulle HEG		all	Infestation*pente *PERT	pente	Square roots
Clmm2 (1/parcelle)	Densité de gaulle et perche HEG		all	Infestation*pente *PERT	pente	Square roots
lme (1/parcelle)	Densité de perche HEG	log(x+1)	all	Infestation*Pente*PERT*Élévation	pente	Square roots



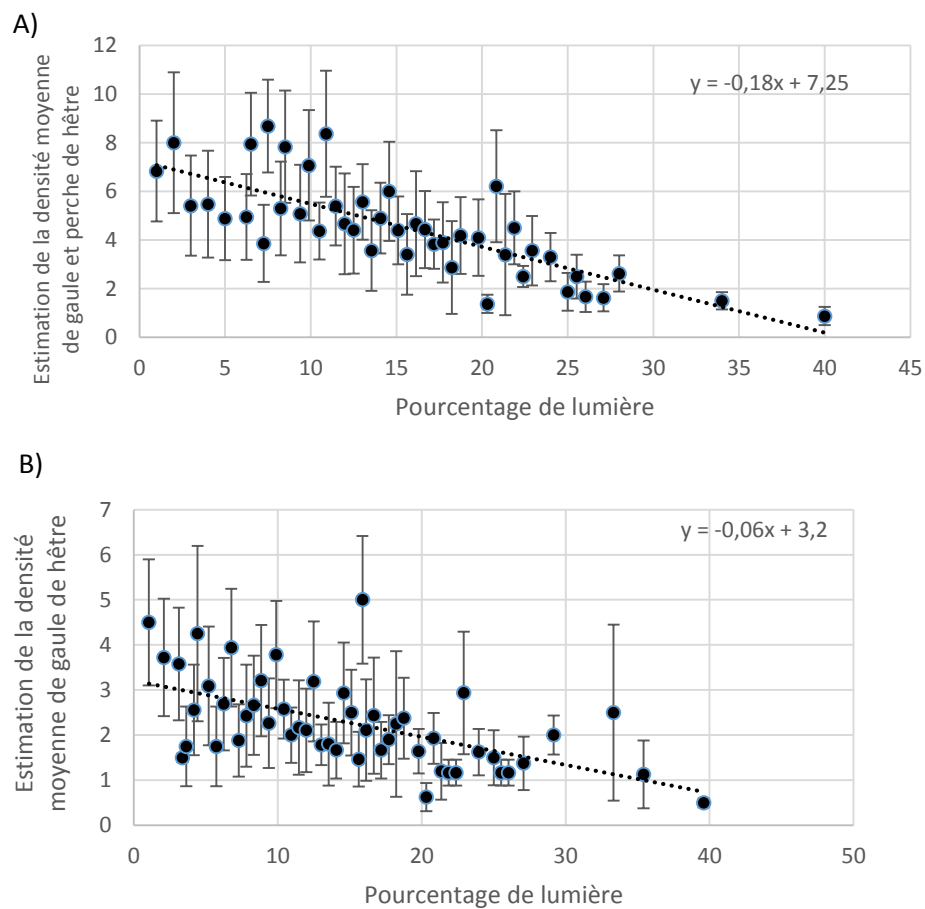
Annexe_Figure 1. Pas d'effet significatif entre le pH de la parcelle et A) le type de perturbation, B) l'intensité de la présence de la cochenille et C) la densité de gaule et perche de hêtre.

Annexe_Tableau 2. Modèle linéaire avec effets mixtes (LME) avec l'effet aléatoire de la parcelle et comparaison de modèle. Les hypothèses correspondantes sont celles associées à la variable d'intérêt : Densité de perche de hêtre. Code : PERT = perturbation (traitement sylvicole). Explication du tableau, idem tableau 12.

	ID	K	AICc	Wt	HYPOTHÈSE
NUL	0	2	1291	87%	
PERT	1	5	1296	7%	Le traitement sylvicole influence la densité de perche de hêtre
PENTE	2	3	1297	5%	La pente influence la densité de perche de hêtre
Élévation	3	3	1303	0%	L'élévation influence la densité de perche de hêtre



Annexe_Figure 2. Densité moyenne de perche de hêtre (m²/ha) en fonction du type de perturbation.



Annexe_Figure 3. Représentation simplifiée de la moyenne de densité de A) gaules et perches, ainsi que B) gaules de hêtre (estimation), pour les 545 parcelles en fonction du pourcentage moyen de lumière disponible. Les barres d'erreur représentent l'écart type.

Annexe_Tableau 3. Pourcentage de parcelle selon les différents niveaux d'envahissement (basé sur la typologie) que l'on retrouve dans les différentes zones (Saine, Infestée), par type de perturbation.

Niveau d'envahissement par le hêtre							
Sains	1	2	3	4	5	6	n
<i>cj>1995</i>	45%	3%	23%	6%	14%	10%	119
<i>CDL1955-1982</i>	40%	7%	29%	10%	5%	10%	42
<i>CDL1983-1989</i>	47%	6%	20%	11%	13%	2%	89
<i>CPI-CPF (Coupe progressive) 1988</i>	43%	17%	17%	4%	4%	13%	23
<i>CT (Coupe totale)>15ans</i>	13%	7%	7%	7%	13%	53%	15
<i>ENR(Enrichissement)>1995</i>	33%	0%	0%	0%	33%	33%	6
<i>sans perturbation récente</i>	16%	7%	9%	24%	13%	31%	55

Niveau d'envahissement par le hêtre							
Infestés	1	2	3	4	5	6	n
<i>cj>1995</i>	40%	16%	22%	14%	2%	7%	58
<i>CDL1955-1989</i>	42%	21%	13%	13%	4%	8%	54
<i>CPI-CPF-1988</i>	23%	19%	23%	26%	0%	10%	31
<i>CT>15ans</i>	50%	25%	0%	25%	0%	0%	4
<i>ENR>1995</i>	44%	0%	11%	33%	11%	0%	9
<i>sans perturbation récente</i>	25%	15%	35%	10%	13%	3%	40

Suggestions concernant le maintien de la biodiversité et la régénération de l'érable à sucre

Si une récolte des hêtres est envisagée :

Toutes essences confondues, conserver des *densités minimales de chicots* ($DHP \geq 10\text{cm}$) : environ 30 tiges/ha, de gros chicots ($DHP \geq 30\text{cm}$) : environ 15 tiges/ha et un volume minimale de débris ligneux ($DHP \geq 10\text{cm}$) : environ $36 \text{ m}^3/\text{ha}$, ainsi que de conserver des surface terrière total (plus de $20 \text{ m}^2/\text{ha}$). Conserver des pourcentages de surface terrière en essences compagnes à l'érable à sucre de plus de 25 %.

Comme les hêtres matures sont importants pour la biodiversité (i.e. *nourriture pour la faune, abri*), il serait conseillé de conserver des hêtres matures. Toutes essences confondues, il est aussi conseillé de conserver des densités minimales de chicots selon la classe de taille et de débris ligneux. Dans le cas des érablières qui sont très sensibles aux hivers froids et peu neigeux, les essences compagnes (frêne noir, érable rouge, bouleau jaune, orme et tilleul) permettent de protéger leurs systèmes racinaires en absorbant des quantités importantes d'eau. À l'opposé, dans des milieux très secs où le drainage est très rapide, le hêtre peut puiser l'eau à des profondeurs plus importantes que l'érable à sucre, et à l'aide de mycorhizes pénétrant dans les racines de l'érable et permettant des échanges d'eau et d'autres éléments (Nadeau 1998 dans Côté 1997).

Envisager des traitements de récoltes alternatifs à la CJ et CDL, notamment dans les zones plus homogènes d'érablières moins envahies par le hêtre.

Il est aussi intéressant de garder en tête que des méthodes de récolte ($CDL > CJ$) comparativement aux peuplements sans perturbation récente, entraînent des densités de gaules et perches de hêtre plus forte, peu importe la zone (saine/infestée). Actuellement dans les peuplements sans perturbation récente, la densité moyenne de gaules de hêtre ainsi que la densité moyenne de gaule et perche de hêtre sont inférieures à la limite fixée de $2 \text{ m}^2/\text{ha}$ et $4.4 \text{ m}^2/\text{ha}$ respectivement. Des peuplements sans perturbation récente auraient donc moins de problématique d'envahissement, donc possiblement moins d'interventions nécessaires.

Dégagement des gaules de hêtre?

L'élimination sélective de gaules peu favoriser l'érable à sucre dans certaines conditions. Dans les études de Delagrangé *et al.* (2009 et 2010), le dégagement et l'élimination des gaules de hêtre a eu un effet positif sur la dominance d'érable à sucre (passant d'une densité relative de gaule d'érable à sucre/hêtre d'environ 17% à plus de 85%) en diminuant la densité totale de gaule (passant de près de 3700 tiges/ha à moins de 1400 tiges/ha). Si des opérations de récolte des hêtres matures sont prévues dans des parcelles envahies, faire aussi un dégagement partiel des gaules de hêtre pour laisser une chance à la régénération d'érable à sucre ou autres essences d'intérêts.

Des zones de récolte en hêtre selon la surface terrière, et le besoin ou non de dégagement de gaules de hêtre, tenant compte des facteurs décrits dans l'encadré, sont suggérés à la Carte 8.