

Travail de session

Ariane Roberge

2023-09-29

Table des matières

Liste des tableaux

Table 1: Espèces présentes dans la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides.

Table 2: Polygones des arbres inventoriés dans la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides.

Table 3: Coordonnées projetées des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides.

Table 4: Composition en espèces des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides.

Table 5: Variables topographiques relatives à chacune des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides.

Table 6: Proportion de la variance des données d'espèces d'arbres inventoriées au sein des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides expliquée les variables environnementales.

Table 7: Variables topographiques responsables d'une partie de la variance présente dans les données d'espèces d'arbres.

Liste des figures

Figure 1: Carte des limites de la Station de biologie des Laurentides.

Figure 2: Localisation de l'aire d'étude. a : Carte des limites de la Station de biologie des Laurentides. La rectangle orange cible les zones 1, 2 et 3. b : Carte de l'ensemble des trois zones. Le rectangle marron cible la zone 1. c : Une partie des polygones de couronnes d'arbres annotés dans ArcGIS Pro.

Figure 3: Groupements des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides en 3, 4 et 5 communautés écoforestières (402 placettes).

Figure 4: Superficies relatives des espèces d'arbres selon leur communauté, pour trois communautés éco-forestières.

Figure 5: Superficies relatives des espèces d'arbres selon leur communauté, pour quatre communautés éco-forestières.

Figure 6: Superficies relatives des espèces d'arbres selon leur communauté, pour cinq communautés éco-forestières.

Figure 7: Carte des communautés écoforestières de la zone 1 située sur la rive ouest du Lac Croche de la Station de biologie des Laurentides.

Figure 8: Analyse en composantes principales des données des espèces d’arbres inventoriées au sein des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides (17 classes d’arbres, 402 placettes).

Figure 9: Analyse de redondance mettant en relation les données des espèces d’arbres inventoriées au sein des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides et les variables topographiques (5 variables).

Introduction

Contexte et problématique

Les perturbations naturelles et anthropiques telles que les feux, les coupes forestières et les épidémies d’insectes ont un impact significatif sur la dynamique des populations dans les écosystèmes forestiers. Ces perturbations peuvent entraîner des changements dans l’abondance et la composition des espèces, mais aussi dans la structure et les fonctions écosystémiques de la forêt^{1,2}. La succession secondaire est un processus écologique qui peut survenir après une perturbation importante dans une forêt. Les communautés végétales se rétablissent graduellement, en commençant d’abord par l’établissement d’espèces pionnières, la plupart du temps intolérantes à l’ombre³. Au fil du temps, celles-ci laissent place à des espèces plus tolérantes telles que l’érable à sucre et le hêtre à grandes feuilles^{4,5}. Ce processus conduit à la formation de communautés d’espèces plus matures et stables, qui atteignent finalement un état d’équilibre appelé climax⁶. Au Québec, le territoire est séparé en domaines bioclimatiques qui correspondent aux peuplements de fin de succession de milieux mésiques⁷.

La région à l’étude, se trouvant sur la rive ouest du Lac Croche de la Station de biologie des Laurentides (SBL) de l’Université de Montréal, est située dans le domaine bioclimatique de l’érablière à bouleau jaune⁷. Or, il a été constaté que l’érablière à bouleau jaune n’était pratiquement pas présente sur le territoire⁸. Des questions intéressantes se posent alors... Si les communautés écoforestières ne sont pas des érablières à bouleau jaune, alors quelles sont-elles? Quels sont les processus écologiques responsables de la composition des communautés écoforestières de l’aire d’étude? À quelles échelles spatiales œuvrent-ils?

Le premier objectif de cette étude est de cibler les communautés écoforestières présentes sur le territoire inventorié à la Station de biologie des Laurentides (SBL). Puis, le second consiste à déterminer les variables influençant la composition des communautés, notamment pour en apprendre davantage sur l’influence de la topographie et de la composante spatiale. Enfin, ces analyses seront réalisées à différentes échelles spatiales.

Matériel

Lieu d’étude

La présente étude a nécessité plusieurs campagnes d’échantillonnage, toutes se déroulant à la Station de biologie des Laurentides (SBL) de l’Université de Montréal (Figure A1, Annexe 1). La SBL est une station de recherche et d’enseignement qui, comme l’indique son nom, se situe dans la région des Laurentides, plus précisément dans la municipalité de Saint-Hippolyte. Elle se retrouve entre 45°57' et 46°03' de latitude nord et entre 73°57' et 74°03' de longitude ouest et est d’une superficie de 16,4 km². Alors que la SBL a été fondée en 1965, celle-ci est un territoire protégé depuis 1963. Ainsi, considérant l’absence de perturbations anthropiques importantes depuis plus de 50 ans sur ce territoire, cela en fait une ressource très pertinente pour la recherche en environnement.^{8,9}

Toutefois, avant son statut de protection, l’aire d’étude a subi différentes perturbations majeures. Dans un premier temps, vers la fin des années 1800, l’exploitation forestière était très répandue sur les lots de forêt appartenant à la couronne. Il est donc fort probable que le territoire de la SBL ait été exploité il y a un peu plus d’un siècle. Dans un deuxième temps, ce dernier a été la proie des flammes au début 1900 par des

feux d'amplitudes très variables. Le dernier feu de forêt que la SBL aurait subi, d'une très grande envergure, aurait probablement eu lieu en 1923.⁸

Tel que mentionné précédemment, la SBL est située dans le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune, mais cette communauté écoforestière n'est aucunement prédominante sur le territoire. En revanche, les espèces d'arbres ayant été recensées lors de la première campagne d'échantillonnage sont typique d'une forêt mixte tempérée (ex : sapin baumier, bouleau jaune, érable à sucre), ce qui ne dément pas sa nature (Table 1).

Table 1: Espèces présentes dans la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides

Nom scientifique (latin)	Code d'espèce
<i>Populus grandidentata</i> Michaux	POGR
<i>Pinus strobus</i> Linnaeus	PIST
<i>Acer saccharum</i> Marshall	ACSA
<i>Acer rubrum</i> Linnaeus	ACRU
<i>Abies balsamea</i> (Linnaeus) Miller	ABBA
<i>Acer pensylvanicum</i> Linnaeus	ACPE
<i>Betula alleghaniensis</i> Britton	BEAL
<i>Betula papyrifera</i> Marshall	BEPA
<i>Fagus grandifolia</i> Ehrhart	FAGR
<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	LALA
<i>Picea A.</i> Dietrich	Picea
<i>Picea mariana</i> (Miller) Britton, Sterns & Poggenburgh	PIMA
<i>Populus tremuloides</i> Michaux	POTR
<i>Thuja occidentalis</i> Linnaeus	THOC
<i>Tsuga canadensis</i> (Linnaeus) Carrière	TSCA
<i>Picea rubens</i> Sargent	PIRU
<i>Quercus rubra</i> Linnaeus	QURU
<i>Populus balsamifera</i> Linnaeus	POBA
<i>Fraxinus nigra</i> Marshall	FRNI

Plan d'échantillonnage

Au cours de l'été 2021, dans le cadre du projet de maîtrise de Myriam Cloutier, étudiante dans le laboratoire d'écologie fonctionnelle végétale (LEFO) d'Etienne Laliberté, de l'imagerie RGB à haute résolution fut acquise par drone à plusieurs reprises au-dessus de SBL. Les vols furent réalisés tous les mois de mai à octobre à l'aide du drone *DJI Phantom 4 RTK* afin d'obtenir des images témoignant des changements phénologiques des arbres à travers la saison. Puis, à l'aide du logiciel de photogrammétrie *Agisoft Metashape Professional*¹⁰, une orthomosaïque a été générée par mission de vol. Ce produit est « une image unique à haute résolution obtenue par la fusion de toutes les photos collectées lors d'un recensement d'une zone donnée » [traduction libre]¹¹. Dans ce logiciel, mais aussi pour l'ensemble des analyses spatiales effectuées après coup, le datum de référence ayant été choisi est le système canadien de référence spatiale, soit NAD83 (SCRS) époque 1997 (aussi appelé version 2), et la projection est la Mercator Transverse Modifiée (MTM) pour le fuseau 8 (EPSG : 2950).

Ces vols de drone ont permis de survoler environ 43 hectares de forêt, se divisant en zones 1, 2 et 3. Un inventaire exhaustif des arbres a été réalisé par une équipe de terrain constituée de Myriam ainsi que trois auxiliaires de recherche au cours du même été. Celle-ci a procédé au géoréférencement, à l'identification et à l'annotation de chacun des arbres atteignant la canopée et, donc, étant visible sur les orthomosaïques produites. Ces annotations consistent en des polygones d'arbres ayant été tracés à la main à l'aide d'une surface à dessin et du logiciel *ArcGIS Pro*¹² afin de délimiter les couronnes d'arbres. Ainsi, il en résulte un énorme tableau de variables réponses dont chacune des entités du tableau représente un arbre géoréférencé

ayant été identifié à l'espèce sur le terrain. La Figure 2 (Annexe 1) permet représenter les différentes composantes spatiales du plan d'échantillonnage.

Tableaux de données

Arbres inventoriés

Pour ce travail de session, l'aire d'étude considérée se limitera à la zone 1, représentant une superficie d'environ 20 hectares. Après le nettoyage des données, le jeu de données comportant les entités relatives aux polygones des arbres de cette zone compte 9818 lignes et quatre colonnes (Table 2). Chaque individu est accompagné d'un identifiant unique, d'un code d'espèce, des coordonnées projetées du polygone (mètres) et de la surface occupée par sa couronne (m^2). Au total, 17 essences d'arbres sont présentes, dont une catégorie regroupant toutes les espèces d'épinettes inventoriées; toutes les autres catégories sont des espèces d'arbres. Les différentes espèces d'épinettes ont été regroupées au genre, et non à l'espèce, étant donné qu'elles s'hybrident fréquemment entre elles et, donc, que les erreurs d'identification sont beaucoup plus fréquentes au sein de ce genre.

Table 2: Polygones des arbres inventoriés dans la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides

OBJECTID	Code d'espèce	Superficie	Géométrie
1	BEPA	18.03279	MULTIPOLYGON (((265716.3 50...
2	BEPA	20.69441	MULTIPOLYGON (((265722.1 50...
3	ACSA	24.00460	MULTIPOLYGON (((265727.1 50...
4	ACSA	11.23985	MULTIPOLYGON (((265730.2 50...
5	ACRU	31.32018	MULTIPOLYGON (((265722.6 50...
6	ACSA	26.81428	MULTIPOLYGON (((265727.9 50...

Placettes forestières

Afin de représenter les normes des placettes forestières réalisées lors des inventaires forestiers gouvernementaux, l'orthomosaïque sur laquelle les polygones d'arbres ont été tracés a été découpée en placettes de 20 m × 20 m à l'aide d'une grille. Cette opération a été effectuée à l'aide d'objets de type « sf » afin de conserver les coordonnées des centroïdes de chacune d'entre elles. Par la suite, un tableau regroupant les placettes ainsi que leurs coordonnées projetées a alors été créé. Dès lors, une sélection a été réalisée de sorte à ne conserver que les placettes ayant plus de 40% de leur superficie annotée pour n'avoir que celles étant représentatives d'une forêt naturelle. Cette opération a alors permis d'éliminer les limites des annotations ainsi que quelques placettes étant traversées par des sentiers de randonnée. Enfin, 402 placettes géoréférencées ont été prises en compte dans les analyses, comportant au total 8917 arbres. La Table 3 présente les coordonnées des placettes forestières.

Table 3: Coordonnées projetées des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides.

grid_id	X (m)	Y (m)
1	265734.7	5094249
2	265714.7	5094269
3	265734.7	5094269
6	265694.7	5094289
7	265714.7	5094289
8	265734.7	5094289

Abondances d'espèces d'arbres

Par conséquent, chacun des arbres géoréférencés a ensuite pu être associé à sa placette respective à l'aide d'une jointure spatiale, toujours en conservant les objets en type « sf ». Deux jointures spatiales ont été réalisées : une première pour ajouter une colonne indiquant la placette dans laquelle chaque individu se retrouve, puis une deuxième pour obtenir un tableau d'abondance des essences d'arbres par placette (Table 4).

Table 4: Composition en espèces des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides.

	ABBAACRUBEPAA	C	SATHO	FAGRACPE	Picea	TSCAPOGR	EALPOTRQURIFRN	PIST	POBALALA
1	6	4	2	0	0	0	0	0	0
2	0	7	3	2	0	0	0	0	0
3	3	9	5	4	2	0	0	0	0
6	0	7	4	1	0	1	0	0	0
7	0	7	3	1	0	1	0	0	0
8	1	6	7	2	0	0	0	0	0

Variables topographiques

La matrice explicative est constituée de cinq variables topographiques : l'élévation topographique (mètres), la pente (%), son orientation (représenté par le degré d'exposition vers l'Est et vers le Nord; radians) ainsi que l'indice d'humidité topographique (quantitatif; sans unité). Toutes ces variables sont extraites ou calculées à partir des produits dérivés du LiDAR provenant des données écoforestières du^{13,14}. Initialement, elles étaient toutes représentées à l'aide de données matricielles, il a donc été nécessaire d'extraire la moyenne des valeurs de ces variables pour chacune des placettes 20 × 20 m.

L'élévation et l'indice d'humidité topographique ont été directement extraits des produits dérivés LiDAR, respectivement du modèle numérique de terrain (MNT) et de l'indice d'humidité topographique (TWI). La pente a été obtenue à l'aide d'une fonction *slope*¹⁵ appliquée sur le MNT, donnant alors une pente en degrés (0-360°). Puis, étant donné que les valeurs étaient toutes situées dans le premier quadrant (0-90°), il a été possible de rapporter ces valeurs sur 100 afin d'obtenir un pourcentage d'inclinaison. Concernant les variables d'orientation de pente, les degrés d'exposition (*eastness/northness exposure*) découlent directement des variables intermédiaires d'orientation vers l'Est et le Nord (*eastness/northness*).

Pour ce faire, une fonction *aspect*¹⁶ indiquant la direction (en degrés, 0-360°) vers laquelle la pente fait face a été appliquée sur le MNT, puis le tout a été transformé en radians. Étant une variable circulaire, les transformations trigonométriques $\sin(\theta)$ et $\cos(\theta)$ ont ensuite été appliquées sur la variable *aspect*¹⁷.

Les variables *eastness* et *northness* ont donc été calculées selon les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \textit{eastness} &= \sin(\textit{aspect}(mnt) * \pi / 180) \\ \textit{northness} &= \cos(\textit{aspect}(mnt) * \pi / 180) \end{aligned}$$

Puis, celles-ci ont été mises en relation avec la pente en radians afin de mieux représenter la topographie sur le territoire^{18,19}.

$$\textit{pente} = (\textit{slope}(mnt) * \pi) / 180$$

et

$$\begin{aligned} \textit{eastnessexposure} &= \sin(\textit{pente}) * \textit{eastness} \\ \textit{northnessexposure} &= \sin(\textit{pente}) * \textit{northness} \end{aligned}$$

Table 5: Variables topographiques relatives à chacune des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides.

grid_id	Élévation	Pente	Indice d'humidité topographique	Eastness exposure	Northness exposure
1	339.1754	12.86617	6.6525	0.1430594	-0.1126268
2	343.6710	10.09162	4.2125	0.0766302	-0.1173315
3	342.5033	13.22579	4.9125	0.0701367	-0.1803578
6	352.1311	29.27411	2.0425	0.2467555	-0.3479732
7	347.7095	18.49423	2.6250	0.1254856	-0.2422555
8	345.7609	11.26318	5.6500	0.0419667	-0.1559259

Méthodes

Transformation des données d'arbres

Avant toute analyse, il faut d'abord procéder aux transformations des différents jeux de données. D'abord, la matrice des variables topographiques a été centrée-réduite pour rendre leurs dimensions homogènes et, ainsi, permettre la comparaison des variables explicatives entre elles.

Puis, plusieurs analyses statistiques, par exemple l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse de redondance (RDA), requièrent que les données respectent la distance Euclidienne^{20,21}. Or, celle-ci n'est pas adaptée aux données d'abondances brutes, notamment en raison de la présence du « problème du double zéro ». Lorsque l'on compare la composition en espèces de différentes placettes d'inventaire, la présence d'une même espèce sur deux placettes suggère qu'elles ont probablement des conditions similaires. Cependant, lorsque deux placettes n'ont aucune espèce en commun, cela ne témoigne pas d'une similitude entre elles, car cela pourrait être dû à de nombreux facteurs autres que l'absence d'une niche écologique appropriée pour cette espèce. La distance Euclidienne ne permet pas de prendre en considération ces doubles absences. Ainsi, pour les données d'abondances d'espèces, il est souvent préférable d'utiliser des mesures de distance alternatives.^{21,22}

Étant donné que de nombreuses mesures peuvent être utilisées pour régler ce problème, les données issues de différentes transformations ont été mises en relation avec les variables environnementales au moyen d'une ordination canonique afin de déterminer celle permettant d'expliquer la plus grande proportion de la variance. Après la comparaison des R² ajustés (Table 6), la transformation log-Chorde a été choisie pour être appliquée sur les données d'abondances brutes.

Table 6: Proportion de la variance des données d'espèces d'arbres inventoriées au sein des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides expliquée les variables environnementales.

Transformation	R ² ajusté
Aucune	0.1309
Chorde	0.1121
Hellinger	0.1391
Khi-carré	0.1097
Profils d'abondances relatives	0.1099
log-Chorde	0.1393
Double racine carrée	0.1364

Groupement en communautés écoforestières

Afin de séparer les placettes forestières en communautés, une analyse de groupement avec contrainte de contiguïté spatiale a été réalisée pour 3, 4 et 5 groupes. L'avantage de cette analyse de groupement est qu'elle permet d'identifier les groupes de placettes forestières d'une même communauté tout en considérant leur composante spatiale.

La liste des liens de connectivité entre les placettes forestières a été obtenue par une triangulation de Delauney à partir de laquelle les liens d'une longueur de plus de 30 mètres ont été retirés afin de ne conserver que les liens des placettes forestières côte-à-côtes²³. Par la suite, les placettes forestières ont été regroupées avec la méthode de Ward en utilisant la matrice de distance euclidienne ayant subi une transformation de log-Chorde. Cette méthode de groupement agglomératif hiérarchique a pour objectif de minimiser la somme des carrés des écarts des groupes créés²¹. En d'autres termes, elle permet de créer des groupes de placettes forestières similaires en minimisant la variabilité entre les placettes dans chaque groupe.

Après l'analyse de groupement avec contrainte de contiguïté spatiale, les superficies relatives des espèces au sein de chacun des groupes ont été calculées, puis transposées dans des histogrammes de sorte à déterminer les espèces dominantes et, ainsi, nommer les communautés écoforestières.

Ordination simple (analyse en composantes principales)

Étant donné que le jeu de données en est un d'abondances d'espèces, l'analyse en composantes principales (ACP) est appropriée pour cette étude. L'analyse des correspondances (AFC) serait, elle aussi, appropriée, mais elle donne davantage de poids aux espèces rares qu'aux espèces communes, ce qui n'est pas réellement l'objectif pour le groupement des communautés écoforestières, car celles-ci sont définies en fonction des espèces les plus abondantes, et non en fonction de la spécificité de certaines espèces à se retrouver dans certaines placettes écoforestières. L'ACP est donc l'ordination simple de choix. L'interprétation de l'analyse en composantes principales en cadrage 1 est particulièrement pertinente pour observer les espèces ayant contribué le plus à la formation des communautés écoforestières. De plus, en cadrage 1, les stations près les unes des autres sont similaires entre elles au niveau de leur composition en espèces d'arbres. Par ailleurs, tout comme les analyses précédentes, l'ordination a été réalisée sur les données transformées à l'aide de la transformation de log-Chorde de sorte à conserver les distances entre les éléments.^{21,24}

Ordination canonique (analyse de redondance)

Résultats

Groupement en communautés écoforestières

Ordination simple

Ordination canonique

Références

1. Kuuluvainen, T. *et al.* Natural disturbance-based forest management: Moving beyond retention and continuous-cover forestry. *Frontiers in Forests and Global Change* **4**, (2021).
2. Viljuri, M.-L. *et al.* The effect of natural disturbances on forest biodiversity: an ecological synthesis. *Biological Reviews* **97**, 1930–1947 (2022).
3. Finegan, B. Forest succession. *Nature* **312**, 109–114 (1984).
4. Burns, R. M. & Honkala, B. H. *Silvics of North America: Conifers*. **1**, (Forest Service, United States Department of Agriculture, Washington, DC, 1990).
5. Nolet, P., Delagrange, S., Bouffard, D., Doyon, F. & Forget, E. The successional status of sugar maple (*Acer saccharum*), revisited. *Annals of Forest Science* **65**, 208–208 (2008).
6. Horn, H. S. The ecology of secondary succession. *Annual Review of Ecology and Systematics* **5**, 25–37 (1974).
7. Ministère des Ressources naturelles et des Forêts *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. (2022).at <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/FE_zones_vegetation_bioclimatiques_MRNF.pdf>
8. Savage, C. Recolonisation forestière dans les basses laurentides au sud du domaine climacique de l’érablière à bouleau jaune. (2001).
9. Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques Réserve de biodiversité projetée de la Station-de-Biologie-des-Laurentides : Plan de conservation. (2009).at <https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/reserves-bio/station/psc_station.pdf>
10. Agisoft LLC *Agisoft metashape professional*. (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia, 2021).at <<https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>>
11. Ferrari, R. *et al.* Photogrammetry as a tool to improve ecosystem restoration. *Trends in Ecology & Evolution* **36**, 1093–1101 (2021).
12. Esri Inc *ArcGIS pro*. (Esri Inc, 2022).at <<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>>
13. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs LiDAR - modèles numériques (terrain, canopée, pente).
14. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs Indice d’humidité topographique issu du LiDAR.
15. Dorman, M. *starsExtra: Miscellaneous functions for working with 'stars' rasters*. (2021).at <<https://cran.r-project.org/web/packages/starsExtra/index.html>>
16. Dorman, M. *starsExtra: Miscellaneous functions for working with 'stars' rasters*. (2021).at <<https://cran.r-project.org/web/packages/starsExtra/index.html>>
17. Legendre, P. *et al.* Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China. *Ecology* **90**, 663–674 (2009).
18. Piedallu, C. & Gégout, J. Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 1696–1706 (2008).
19. Pierce, K., Lookingbill, T. & Urban, D. Simple method for estimating potential relative radiation (PRR) for landscape-scale vegetation analysis. *Landscape Ecology* **20**, 137–147 (2005).
20. Legendre, P. & Anderson, M. J. Distance-based redundancy analysis: Testing multispecies responses in multifactorial ecological experiments. *Ecological Monographs* **69**, 1–24 (1999).
21. Legendre, P. & Legendre, L. *Numerical ecology*. (Elsevier, Amsterdam, 2012).
22. Legendre, P. & Gallagher, E. D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia* **129**, 271–280 (2001).

23. Guénard, G. & Legendre, P. Hierarchical clustering with contiguity constraint in *R*. *Journal of Statistical Software* **103**, 1–26 (2022).
24. Borcard, D., Gillet, F. & Legendre, P. *Numerical ecology with R*. (Springer International Publishing, Cham, 2018).doi:10.1007/978-3-319-71404-2

Annexe 1 : Figures supplémentaires

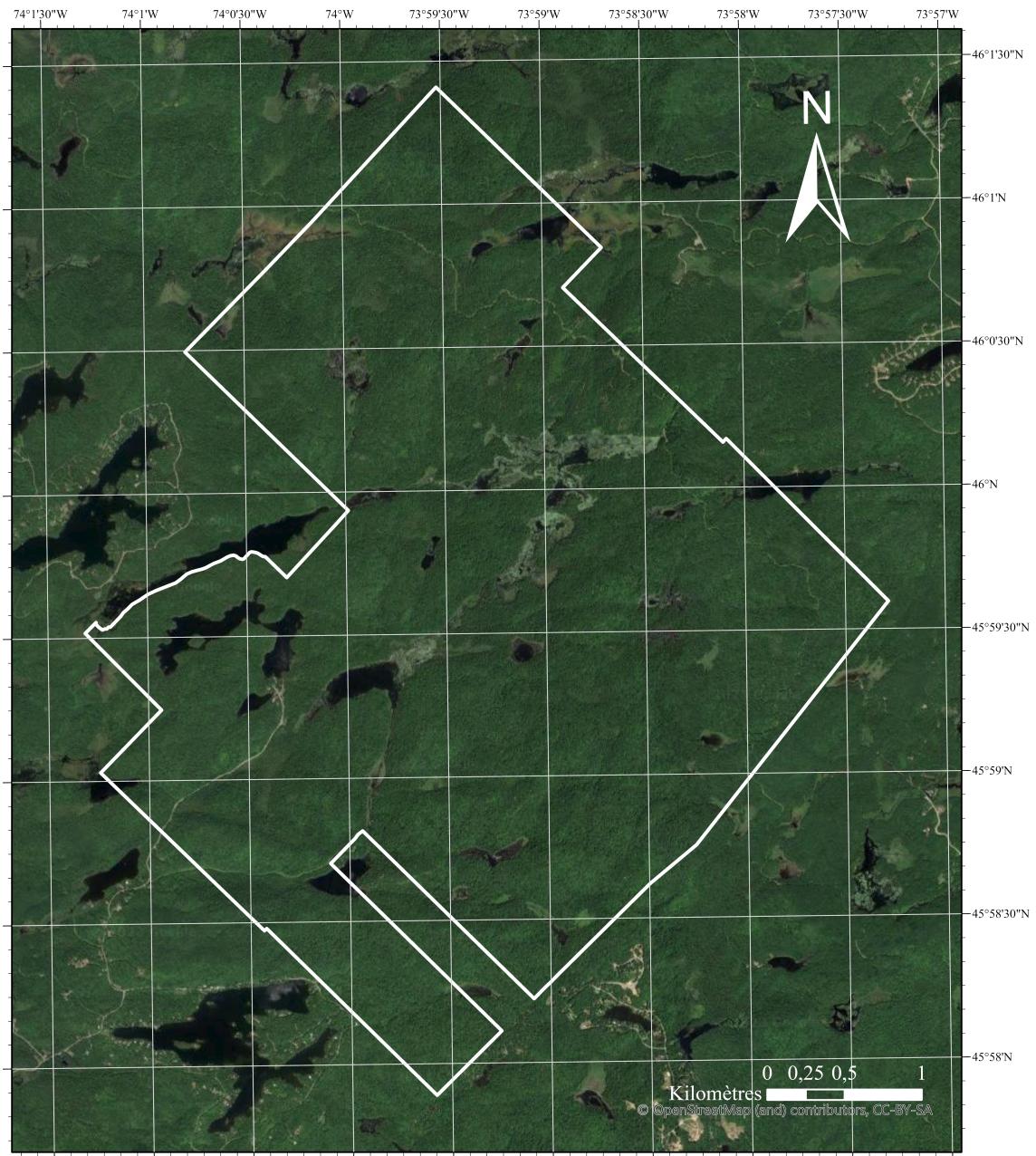


Figure 1: Carte des limites de la Station de biologie des Laurentides.

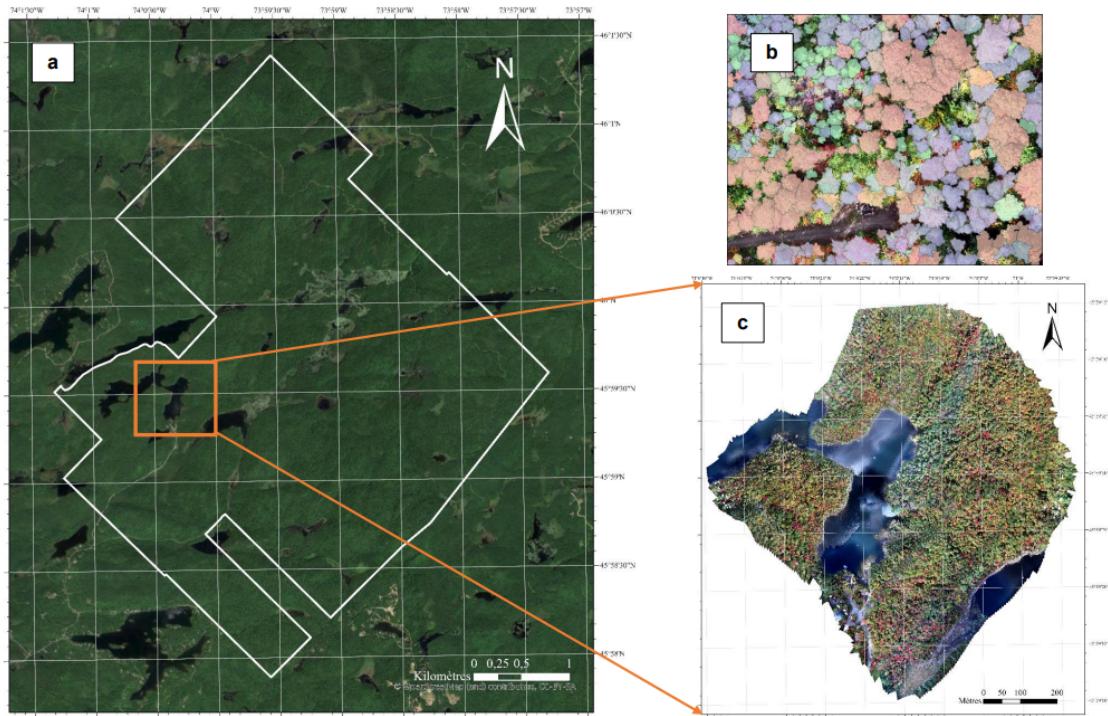


Figure 2: Localisation de l'aire d'étude. a : Carte des limites de la Station de biologie des Laurentides. La rectangule orange cible les zones 1, 2 et 3. b : Carte de l'ensemble des trois zones. Le rectangle marron cible la zone 1. c : Une partie des polygones de couronnes d'arbres annotés dans ArcGIS Pro.

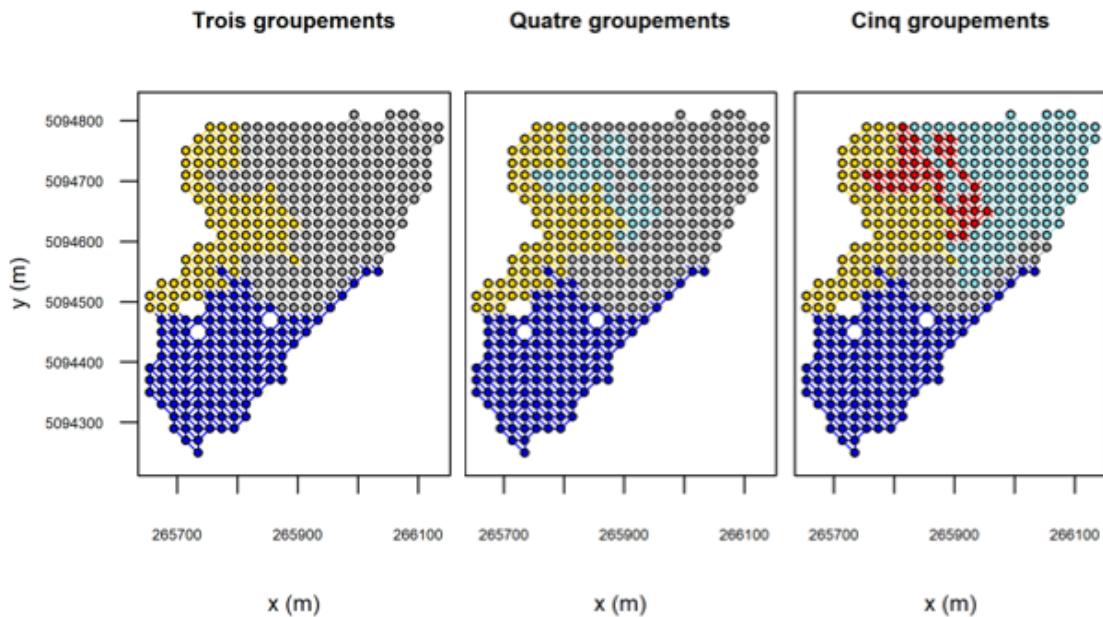


Figure 3: Groupements des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides en 3, 4 et 5 communautés écoforestières (402 placettes).

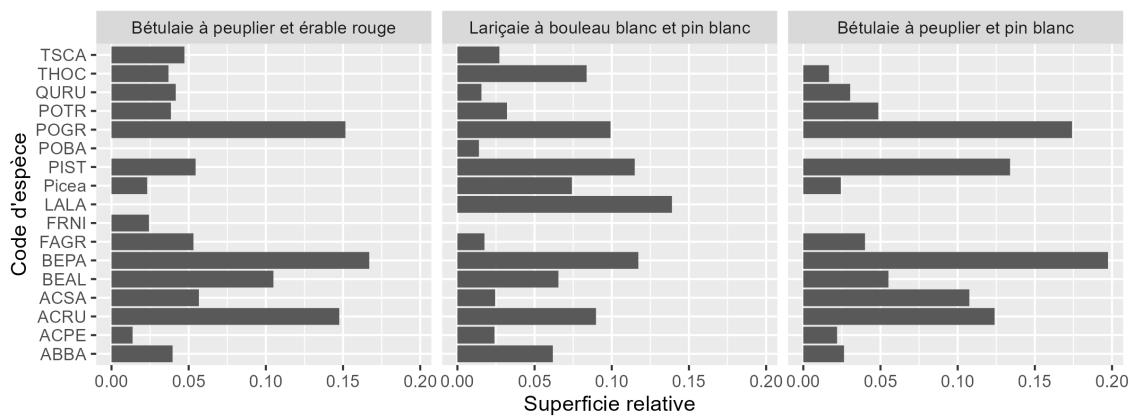


Figure 4: Superficies relatives des espèces d'arbres selon leur communauté, pour trois communautés éco-forestières.

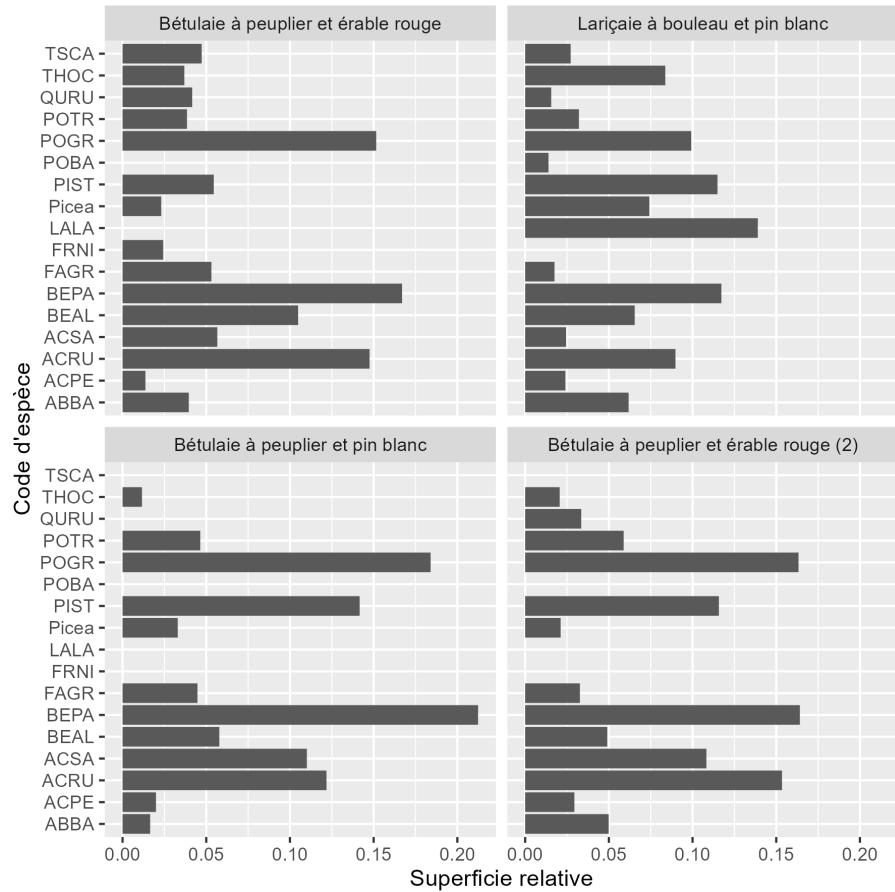


Figure 5: Superficies relatives des espèces d'arbres selon leur communauté, pour quatre communautés éco-forestières.

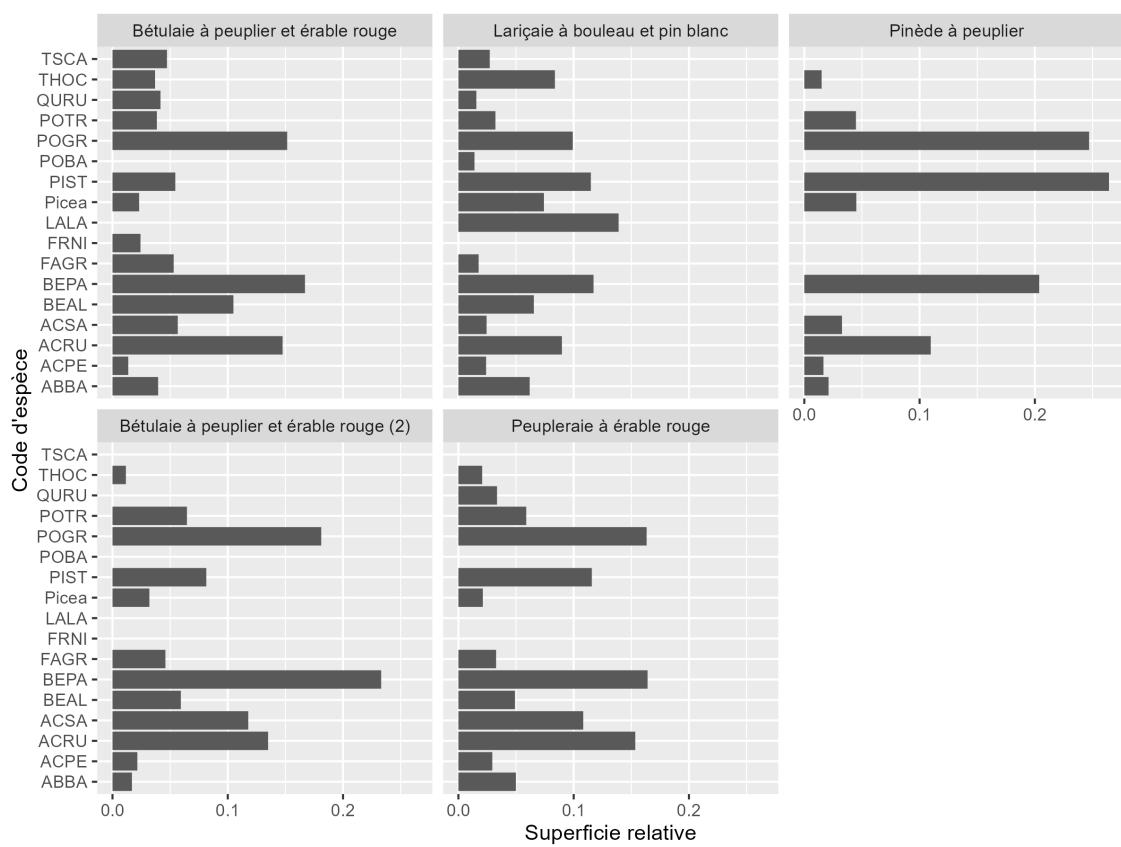


Figure 6: Superficies relatives des espèces d'arbres selon leur communauté, pour cinq communautés éco-forestières.

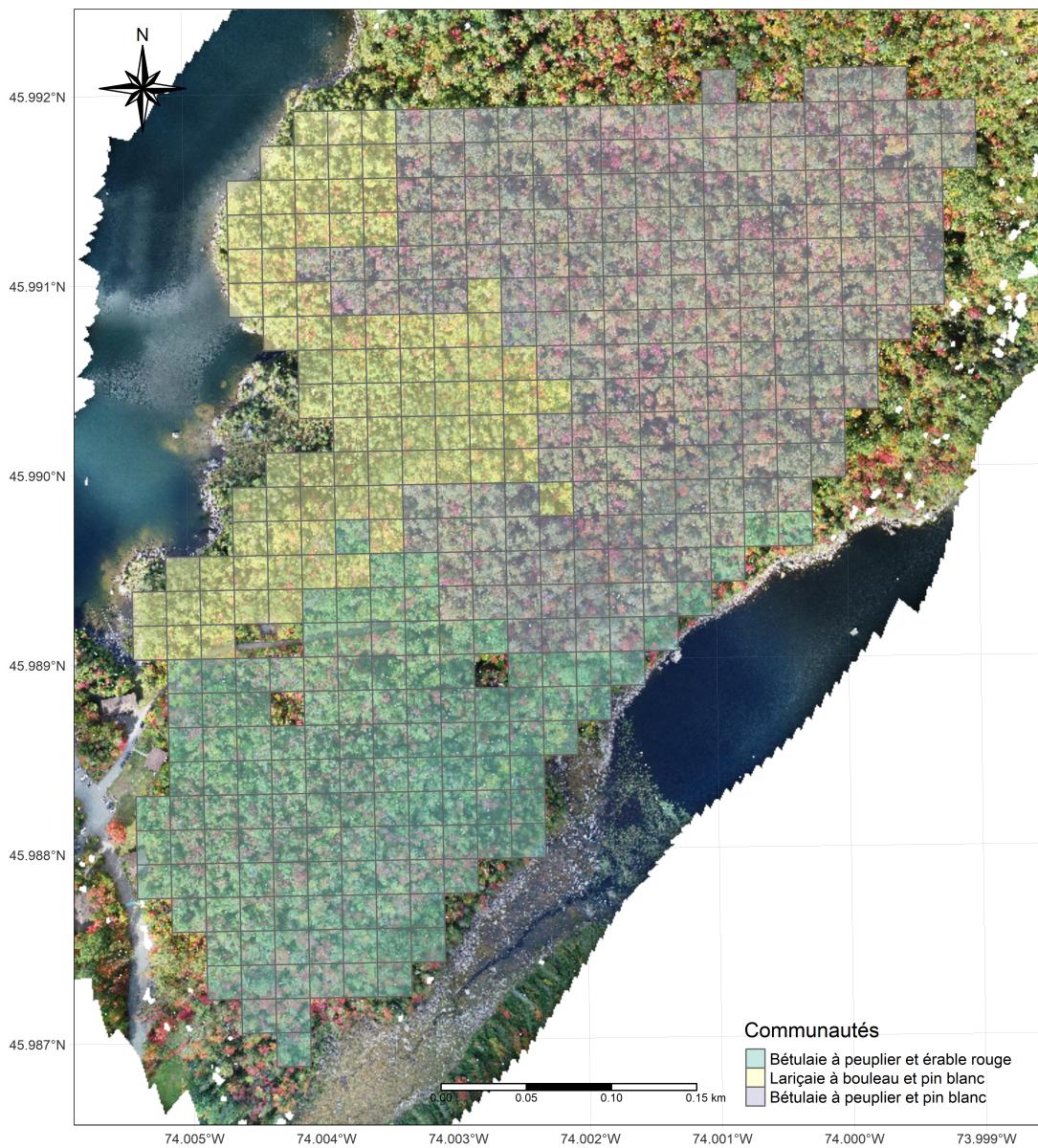


Figure 7: Carte des communautés écoforestières de la zone 1 située sur la rive ouest du Lac Croche de la Station de biologie des Laurentides.

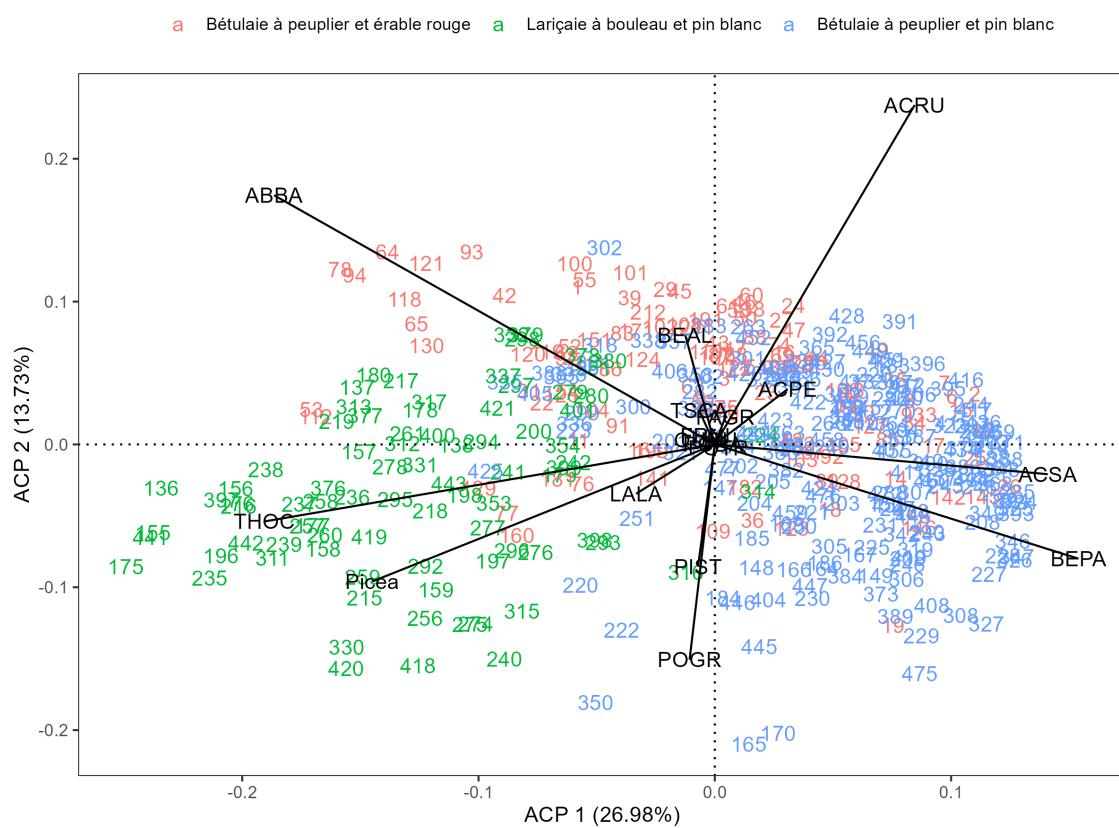


Figure 8: Analyse en composantes principales des données des espèces d'arbres inventoriées au sein des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides (17 classes d'arbres, 402 placettes).

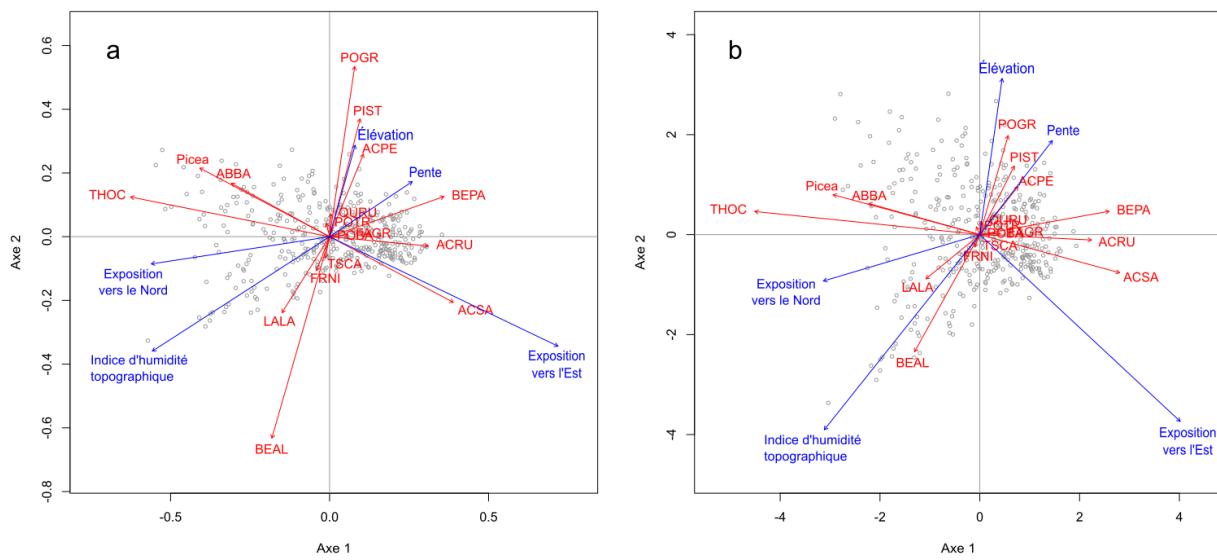


Figure 9: Analyse de redondance mettant en relation les données des espèces d'arbres inventoriées au sein des placettes forestières de la zone 1 de la Station de biologie des Laurentides et les variables topographiques (5 variables).