



Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole inc.

Siège social et station expérimentale
142, rang Lainesse
Saint-Norbert d'Arthabaska, QC
G0P 1B0
Téléphone : 819-369-4000
Télécopieur : 819-369-9589

Rapport final

Étude de quelques caractéristiques dendrométriques qui influencent les variations quantitatives et qualitatives de la coulée interindividuelle

Par: Yvon Grenier, ing. f., M. Sc.

Collaborateurs : Catherine Gaucher
Stéphane Guay
Julien Lavoie
Guy Boudreault

RÉSUMÉ

Cette étude a été réalisée dans le but d'identifier des caractéristiques dendrométriques de l'érable à sucre qui pourraient être des indicateurs d'une bonne productivité, d'une forte teneur en sucre de l'eau d'érable ou d'une forte coulée. Le volume de coulée et la teneur en sucre de l'eau d'érable ont été mesurés quotidiennement sur 300 érables entaillés en 2001 et 2002 dans une érablière vierge située près de Mont-Laurier et sur 77 érables entaillés en 2003 et 2004 dans une érablière déjà exploitée pour la sève située près de Tingwick. Les caractéristiques dendrométriques usuelles (diamètre à hauteur de poitrine (DHP), hauteur totale de l'arbre, diamètre moyen et longueur du houppier et accroissement radial) des érables ont été mesurées, alors que la surface de projection au sol et le volume du houppier ont été calculés.

Les deux sites présentent des caractéristiques dendrométriques et des rendements très différents, mais il y a beaucoup de redondance entre les variables dendrométriques. Ainsi, ils ont pu être combinés pour être traités par la méthode de régression par les moindres carrés partiels.

Il appert que le DHP est la meilleure variable prédictive pour la coulée, le contenu en sucre et la production de sirop, surpassant toutes les autres variables dendrométriques. Parmi les diverses périodes de croissance étudiées, c'est celle de trente ans qui est la meilleure prédictive, mais sa capacité de prédiction est inférieure à celle du DHP.

ABSTRACT

The study was conducted to identify dendrometric characteristics of sugar maple which may be related to high sap flow, high sugar sap content or high syrup yield. Sap was collected and analysed for sugar content from each of 300 sugar maples during the sap season in 2001 and 2002 in a virgin sugar bush located near Mont-Laurier and from 77 sugar maples in 2003 and 2004 in a sugar bush harvested in the past in Tingwick. Dendrometric characteristics of each maple were measured (diameter at breast height (DBH), diameter and crown height, total height of the tree, crown length and mean diameter, radial growth), while projected area and crown volume were computed.

Both sites show different dendrometric characteristics and yields. However, as they present high degree of redundancy, both were combined for analysis with partial least square method.

DBH is the best variable for predicting for sap, sugar content and syrup production, better than all other dendrometric characteristics. For growth period examined, the 30-year one is the best, but its potential is even lower than DBH.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Résumé	i
Abstract	i
Table des matières.....	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des figures	iv
1 Introduction	1
2 Hypothèse.....	2
3 Objectif.....	2
4 Matériel et méthodes	2
4.1 Localisation et caractéristiques des sites	2
4.2 Choix des érables, mesures dendrométriques et installation des dispositifs de collecte de l'eau d'érable	2
4.3 Prélèvement de carottes.....	3
4.4 Entaillage et dispositif de récolte	3
4.5 Vide à l'entaille.....	4
4.6 Mesure du volume de la coulée, prise d'échantillon de l'eau d'érable et préparation de l'échantillon composite	4
4.7 Calcul de la surface et du volume du houppier, du volume de coulée et de la production de sirop par entaille.....	4
4.8 Analyses statistiques	5
5 Résultats	6
5.1 Facteurs prédictifs des paramètres de coulée.....	12
5.1.1 Régression avec les données des deux sites confondus	12
5.1.1.1 Volume de coulée	12
5.1.1.2 Concentration en sucre	12
5.1.1.3 Production de sirop	12
5.1.2 Régression avec les données du site Mont-Laurier	15
5.1.2.1 Volume de coulée	19
5.1.2.2 Concentration en sucre	19
5.1.2.3 Production de sirop	19
6 Discussion.....	22
7 Conclusion	24
Références.....	25

LISTE DES TABLEAUX

	page
Tableau 1. Caractéristiques dendrométriques des érables aux sites de Mont-Laurier et de Tingwick.....	6
Tableau 2. Matrice de corrélation entre les caractéristiques dendrométriques des érables pour les deux sites.....	10
Tableau 3. Variance expliquée par l'analyse en composantes principales	11

LISTE DES FIGURES

	page
Figure 1. Composantes d'un échantillonneur de 10 litres.....	3
Figure 2. Relations entre le volume de coulée et six caractéristiques dendrométriques pour les sites de Mont-Laurier et de Tingwick	7
Figure 3. Relations entre la concentration en sucre et six caractéristiques dendrométriques pour les sites de Mont-Laurier et de Tingwick	8
Figure 4. Relations entre le volume de sirop et six caractéristiques dendrométriques pour les sites de Mont-Laurier et de Tingwick	9
Figure 5. Cercle des corrélations illustrant le degré de corrélation entre les six variables.....	11
Figure 6. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques pour le volume de coulée.....	13
Figure 7. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques pour la concentration en sucre	13
Figure 8. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques pour la production de sirop	14
Figure 9. Relation entre le volume de coulée et six périodes de croissance pour le site de Mont-Laurier	16
Figure 10. Relation entre la concentration en sucre et six périodes de croissance pour le site de Mont-Laurier	17
Figure 11. Relation entre le volume de sirop et six périodes de croissance pour le site de Mont-Laurier	18
Figure 12. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques et des cinq variables de croissance pour le volume de coulée	20
Figure 13. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques et des cinq variables de croissance pour la concentration en sucre	20
Figure 14. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques et des cinq variables de croissance pour la production de sirop.....	21

1 INTRODUCTION

La hausse de la production de sirop d'érable est essentielle au développement de l'industrie acéricole. L'augmentation du nombre d'entailles est une possibilité, mais l'amélioration du rendement des exploitations actuelles est tout aussi envisageable, voire souhaitable à long terme.

La production de sirop d'érable (exprimée en litre par entaille) est fonction du volume de la coulée et de la concentration de sucre contenu dans l'eau d'érable. Un arbre donnant une eau avec une forte concentration en sucre est intéressant pour l'acériculteur, car cela permet une réduction des coûts de transformation de l'eau. Un érable ayant un fort volume de coulée est également intéressant, car on peut espérer obtenir plus d'eau sucrée pour la transformation. L'idéal serait d'avoir les deux propriétés à la fois. De façon générale, il semble que fort taux de sucre et forte coulée soient liés (Marvin *et al.*, 1967; Johnson *et al.*, 1987). De même, un érable dont la coulée est importante conserve cette propriété au fil des années (Taylor, 1956).

Cependant, il existe de grandes variations dans le volume de la coulée et dans la teneur en sucres de l'eau entre les érables à l'intérieur d'un même peuplement (Larochelle *et al.*, 1998). Une rapide revue de littérature permet d'identifier plusieurs facteurs impliqués dans ces variations. Les conditions météorologiques durant la coulée sont importantes, car elles déterminent, entre autres, la fluctuation des températures autour du point de congélation et la disponibilité en eau du sol. Une bonne disponibilité en eau du sol permet une absorption d'eau adéquate par les racines et assure une bonne coulée. Pothier (1995) a démontré que 50% de la variation de la teneur en sucre dans un même peuplement pouvait être attribuée au nombre de jours où la température fluctue autour de 0°C au printemps.

Le potentiel génétique varie d'un individu à l'autre et détermine en partie la qualité de la coulée. Des études par sélection ont permis d'obtenir des érables dont l'eau est de 45 à 65% plus sucrée que la moyenne (Kriebel, 1990).

Des caractéristiques dendrométriques telles que le DHP (diamètre de l'arbre mesuré à 1,30 m de hauteur), le volume du houppier, la hauteur de l'arbre et le taux de croissance du tronc influencent vraisemblablement la coulée et la concentration en sucre de la sève récoltée. Toutefois, il ne s'agit là que d'assomptions (Laing et Howard, 1990). Ainsi, Blum (1973), cité par Pothier (1995) rapporte que certains auteurs ont mis en évidence l'inconsistance des relations entre la production de sève ou sa teneur en sucre avec les caractéristiques dendrométriques des érables entaillés.

La structure du bois, et notamment la quantité de rayons médullaires, seraient liés à la capacité de stockage de réserves et à la quantité de sucre de la sève (Gregory, 1978; Morselli *et al.*, 1978).

2 HYPOTHÈSE

L'hypothèse de ce travail sous-tend que les caractéristiques dendrométriques des érables peuvent expliquer les divers paramètres de la production de sirop d'érable, à savoir le volume de coulée et la concentration en sucre. Les caractéristiques dendrométriques retenues sont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), la hauteur totale, les dimensions de cime (longueur, diamètre moyen, surface projetée au sol et volume de houppier) et l'accroissement radial des arbres.

3 OBJECTIF

L'objectif de cette étude est d'identifier des caractéristiques dendrométriques qui pourraient servir d'indicateurs du potentiel de rendement en volume d'eau ou en concentration en sucre d'un érable. Lors de l'entailage, la connaissance de ces indicateurs aiderait les acériculteurs à identifier les érables ayant un rendement supérieur. Ces connaissances pourraient aussi être utiles lors d'un processus d'aménagement forestier acéricole dans le choix des tiges à conserver ou à récolter. Nous voulons construire des modèles de régression permettant de relier les mesures dendrométriques (variables explicatives) aux variables réponses (coulée moyenne, teneur en sucre et quantité de sirop en sélectionnant les modèles sur la base de leur potentiel de prédiction.

4 MATÉRIEL ET MÉTHODES

4.1 Localisation et caractéristiques des sites

Le premier site est situé dans une érablière n'ayant jamais été entaillée et est localisé à 10 km de Mont-Laurier, dans la région administrative des Laurentides. Le site a une exposition nord-est et est à une altitude moyenne de 320 m. Il se trouve à 75° 35' de longitude ouest et 46° 36' de latitude nord.

Le deuxième site est situé dans une érablière qui avait déjà été entaillée précédemment à cette expérience et est localisé à Tingwick, dans la région administrative du Centre-du-Québec. Le site a une exposition est et se situe à une altitude moyenne de 165 m. Il se trouve à 71° 56' de longitude ouest et 45° 57' de latitude nord.

4.2 Choix des érables, mesures dendrométriques et installation des dispositifs de collecte de l'eau d'érable

À Mont-Laurier, 300 érables à sucre ont été choisis à l'automne 2000 et à Tingwick, 77 à l'automne 2002. Tous les arbres étaient dépourvus de défauts majeurs. Leur DHP a été mesuré avec un ruban circonférentiel et leur hauteur totale et leur hauteur à la base du houppier ont été mesurées à l'aide d'un clinomètre et d'un ruban à mesurer.

Pour chaque arbre, quatre mesures de projection verticale des branches au sol ont été prises. À Mont-Laurier, la première mesure était celle de la branche juste au dessus de l'entaille et la deuxième, troisième et quatrième mesures étaient faites à 180, 90 et 270 degrés de la première. À Tingwick, les quatre mesures étaient faites systématiquement selon des orientations géographiques de 90, 180, 270 et 360 degrés.

Un système de tubulure pour faire le vide à l'entaille a été installé dans chaque site. Pour la récolte de l'eau d'érable, un échantillonneur de 10 L en PVC a été installé à chaque érable (Figure 1).

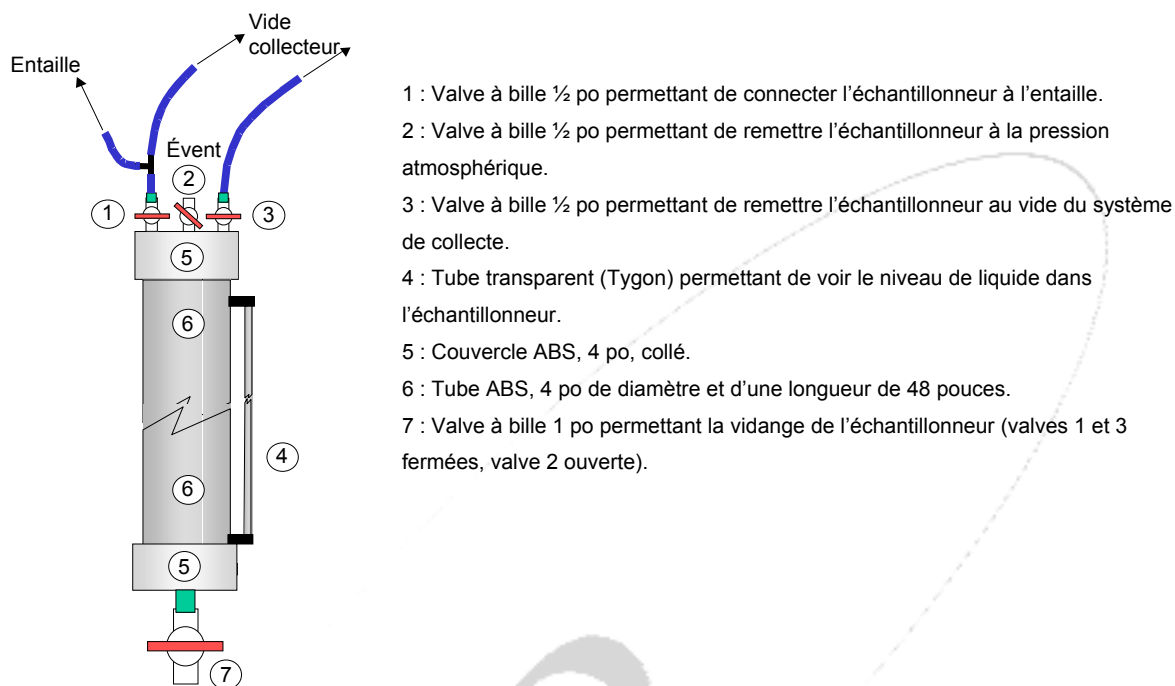


Figure 1. Composantes d'un échantillonneur de 10 litres

4.3 Prélèvement de carottes

À Mont-Laurier, à la fin de la saison de coulée 2002, une carotte d'environ 50 mm de longueur a été prélevée à 2,5 cm au dessus de l'entaille faite en 2002. Une mesure des cernes de croissance a été réalisée au laboratoire afin de connaître la croissance radiale des érables. La mesure du dernier cerne, correspondant à la croissance de l'année 2001, a été écartée lorsque les calculs étaient effectués pour être reliées aux variables réponses de l'année 2001.

4.4 Entaillage et dispositif de récolte

Dans les semaines du 15 février 2001 et du 15 février 2003, nous avons procédé à l'entaillage de la première année à Mont-Laurier et à Tingwick respectivement. Chaque érable portait une seule entaille, quelque soit son diamètre. L'orientation de l'entaille était sud-est à Mont-Laurier et aléatoire à Tingwick. L'entaillage a été effectué à 2 m au dessus du sol et chaque entaille a été reliée à un échantillonneur, lui-même relié au système de mise sous vide. À la fin des récoltes de 2001 à Mont-Laurier et de 2003 à Tingwick, les érables ont été désentailés. Les échantillonneurs ont été rincés et laissés sur place jusqu'aux prochaines saisons.

Dans les semaines du 15 février 2002 et du 15 février 2004, les mêmes érables ont été entaillés de nouveau et le dispositif de collecte a été remis en fonction. L'orientation des entailles était maintenant est à Mont-Laurier et encore aléatoire à Tingwick, tout en prenant soin de pas entailler près de l'entaille de l'année précédente. À la fin des récoltes 2002 et 2004, les érables ont été désentailés et le dispositif a été démantelé. Les quatre années de mesure s'étalaient sur la totalité des saisons de coulée.

4.5 Vide à l'entaille

Le vide à la pompe a été vérifié tous les matins. Le vide aux collecteurs a été vérifié quotidiennement lors de la récolte et a été maintenu à -20" Hg pour les années 2002 à 2004. En 2001, le vide a été de -20" Hg durant la moitié de la saison de coulée et durant l'autre moitié de la saison de coulée, le vide était identique dans tout le système, mais pouvait varier de -10 à -20" Hg d'un jour à l'autre. Les chalumeaux ont été vérifiés régulièrement et enfoncés lorsque nécessaire.

4.6 Mesure du volume de la coulée, prise d'échantillon de l'eau d'érable et préparation de l'échantillon composite

S'il y a eu un gel important, le contenu de l'échantillonneur a gelé, puis peut avoir dégelé partiellement alors que la coulée suivante a débuté. Dans ce cas, le maximum d'eau d'érable est soutiré et mesuré au cylindre gradué, laissant le glaçon dans l'échantillonneur. S'il n'y a pas eu de gel, le volume de coulée est obtenu par calcul. La hauteur du liquide observable dans le tube transparent (Figure 1) est mesurée et ensuite convertie en volume (section 4.7). Lors des jours de très fortes coulées, plusieurs mesures par jour sont effectuées. Lors de très faibles coulées (hauteur de liquide inférieure à 300 mm), la mesure est prise aux deux ou trois jours au maximum afin de limiter le développement possible de contamination microbienne.

Chaque prélèvement sert à préparer un échantillon composite qui permettra de doser les teneurs moyennes en sucre de chaque arbre pour chaque période de récolte. La première étape consiste à prélever de chaque arbre un volume d'environ 45 ml d'eau d'érable dans une bouteille propre et bien rincée de 50 ml. Les échantillonneurs sont ensuite vidangés ou le contenu des cylindres gradués est jeté. Ces échantillons sont conservés sur la glace, puis amenés au laboratoire. Connaissant les quantités d'eau d'érable prélevées de chaque échantillonneur, 0,2% du volume mesuré ou calculé, est soutiré à l'aide d'une micropipette pour chaque échantillonneur et ensuite déposé dans des bouteilles de 500 ml gardées congelées à -15°C. Les sucres de l'échantillon composite sont dosés par chromatographie liquide à haute performance (HPLC Waters : pompe 590, injecteur WISP 712, colonne Sugar Pak 1).

4.7 Calcul de la surface et du volume du houppier, du volume de coulée et de la production de sirop par entaille

La surface projetée au sol du houppier est calculée avec la formule suivante :

$$S_{\text{houp}} = \pi * D^2 / 4$$

où :

D = longueur moyenne des quatre branches mesurées (m).

Le volume du houppier est calculé en utilisant la formule de l'ellipsoïde. La moyenne de deux mesures opposées des projections verticales au sol des branches permet de calculer deux rayons perpendiculaires de la cime :

$$V_{\text{houp}} = 4/3 * \pi * a * b * c$$

où :

V_{houp} = volume du houppier (m³);

a = demie longueur du houppier (m);

b = premier rayon du houppier (m);

c = deuxième rayon du houppier (m).

Le volume de la coulée est calculé avec la formule suivante :

$$V_{\text{eau}} = ((H * 8,107) + V_m) / 1000$$

où :

V_{eau} = volume de la coulée (L);

H = hauteur de la coulée dans l'échantillonneur (mm);

V_m = volume mort moyen = 592 ml.

La production saisonnière théorique de sirop par entaille a été calculée à partir du °Brix, de la densité et du volume d'eau d'érable récoltée. Étant donnée la corrélation importante ($r^2 = 0,99$) entre la valeur de °Brix et la teneur en sucres totaux dosée par HPLC, cette dernière a été utilisée comme valeur de Brix.

À partir du °Brix de l'eau, on calcule la densité de l'eau d'érable selon la formule suivante :

$$D_{\text{eau}} = (a + c(^{\circ}\text{Brix}_{\text{eau}})) / (1 + b(^{\circ}\text{Brix}_{\text{eau}}) + d(^{\circ}\text{Brix}_{\text{eau}}^2))$$

où :

D_{eau} = densité de l'eau d'érable;

a = 0,999992956631726;

b = -0,0095262369550272;

c = -0,00539288034998694;

d = 0,0000222308169457791;

°Brix_{eau} = degré Brix de l'eau d'érable.

Connaissant la densité de l'eau d'érable, on calcule la production de sirop :

$$V_{\text{sirop}} = ((V_{\text{eau}}) * (^{\circ}\text{Brix}_{\text{eau}}) * (D_{\text{eau}})) / (^{\circ}\text{Brix}_{\text{sirop}} * D_{\text{sirop}})$$

où :

V_{sirop} = volume de sirop (L);

V_{eau} = volume de l'eau d'érable (L);

°Brix_{sirop} = 66;

D_{sirop} = densité du sirop à 66°Brix = 1,3248.

Les valeurs de densités sont basées sur une solution modèle de saccharose (Weast, 1974-75). Il convient de mentionner ici que les valeurs de sirops produits résultent de calculs puisqu'aucun sirop n'a réellement été fabriqué.

4.8 Analyses statistiques

Pour chaque arbre de chaque site, les données des deux années de récolte ont été jumelées afin de calculer des moyennes pour chaque arbre pour chaque variable réponse. Nous avons réalisé les analyses statistiques avec le logiciel XLStat (Version 2007).

5 RÉSULTATS

Le tableau 1 présente les caractéristiques dendrométriques des érables entaillés aux deux sites. À Mont-Laurier, les érables ont des DHP variant entre 10 et 73 cm avec une moyenne de 34 cm. Leurs hauteurs varient de 9,5 à 33,6 m, avec une moyenne de 22,2 m. Leurs longueurs de houppier varient de 2,3 à 18,5 m avec une longueur moyenne de 9,6 m. Leurs diamètres de houppier varient de 1,2 à 17,6 m avec un diamètre moyen de 6,2 m. Leurs surfaces projetées de houppier varient de 1 à 243 m² avec une surface moyenne de 36,3 m². Leurs volumes de houppier varient de 10 à 1718 m³ avec un volume moyen de 246 m³. Les croissances radiales par périodes de cinq ans ne présentent pas d'anomalies et augmentent régulièrement dans le temps, même si le nombre d'échantillons diminue. Le fait que le nombre d'échantillons diminue à mesure que s'allongent les périodes est normal, puisque nous avons toujours prélevé des carottes sensiblement de mêmes longueurs. Les arbres qui croissent le mieux ont donc moins de cernes de croissance pour une longueur déterminée de carotte. À Tingwick, les érables ont des DHP variant entre 22 et 80 cm avec une moyenne de 45 cm. Leurs hauteurs varient de 13,8 à 31,8 m, avec une moyenne de 23,9 m. Leurs longueurs de houppier varient de 5,1 à 20,8 m avec une longueur moyenne de 13,8 m. Leurs diamètres de houppier varient de 1,7 à 13,6 m avec un diamètre moyen de 7,7 m. Leurs surfaces projetées de houppier varient de 2 à 144 m² avec une surface moyenne de 50,5 m². Leurs volumes de houppier varient de 28 à 1786 m³ avec un volume moyen de 492 m³.

Tableau 1. Caractéristiques dendrométriques des érables aux sites de Mont-Laurier et de Tingwick (moyennes et écarts types)

	Mont-Laurier			Tingwick	
	N			N	
DHP (cm)	299	34,29 ± 12,57a [†]		77	45,01 ± 13,09b
Hauteur totale (m)	296	22,22 ± 3,90a		75	23,88 ± 4,28b
Longueur du houppier (m)	296	9,58 ± 2,43a		75	13,79 ± 3,55b
Diamètre moyen du houppier (m)	299	6,16 ± 2,88a		77	7,67 ± 2,35b
Surface du houppier (m ²)	299	36,34 ± 34,74a		77	50,46 ± 29,16b
Volume du houppier (m ³)	294	246,3 ± 272,3a		74	492,1 ± 344,2b
Croissance radiale (mm)		2001	2002		
5 ans	291	4,25 ± 2,52	4,27 ± 2,66		n. d.
10 ans	291	9,38 ± 4,68	9,17 ± 4,69		n. d.
15 ans	291	13,41 ± 6,25	13,45 ± 6,42		n. d.
20 ans	291	18,74 ± 8,11	18,29 ± 8,06		n. d.
30 ans	285	31,48 ± 11,58	31,01 ± 11,68		n. d.
40 ans	225	40,85 ± 11,68	41,18 ± 12,15		n. d.
50 ans	124	44,35 ± 10,66	44,46 ± 10,76		n. d.

† Les valeurs suivies de lettres différentes pour un même paramètre sont significativement différentes au seuil $\alpha < 0,01$.

Nous avons ensuite cherché à vérifier si les données provenant des deux sites étaient suffisamment semblables pour être combinées dans une seule analyse. Nous avons calculé des données moyennes par arbre à partir des deux années de mesure pour les trois paramètres de coulée (volume de coulée, concentration en sucre et production de sirop). Cet examen sommaire révèle que les données des deux sites sont en bonne partie superposées, tel que présenté aux figures 2, 3 et 4. Puisque les nuages de

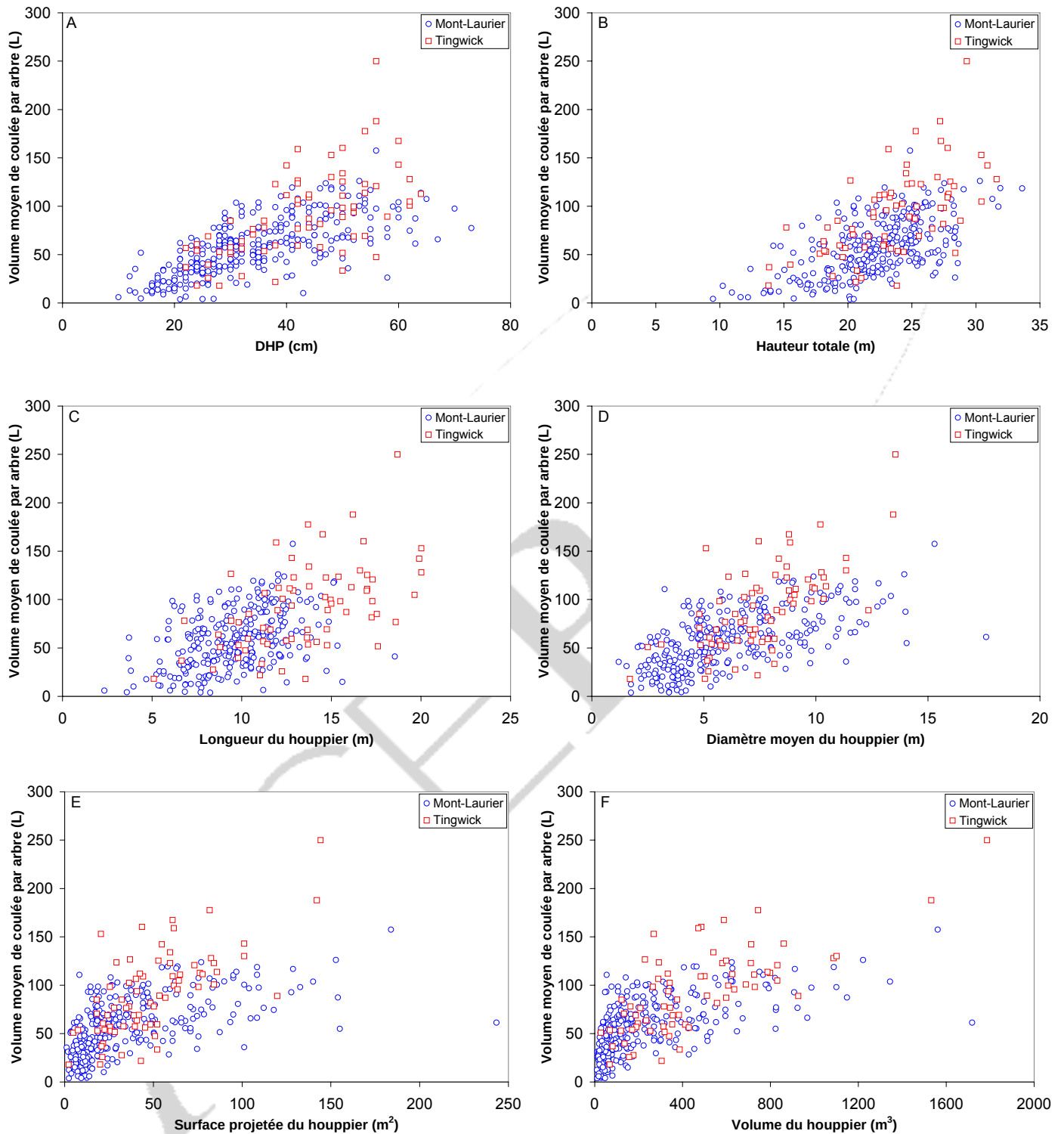


Figure 2. Relations entre le volume de coulée et six caractéristiques dendrométriques pour les sites de Mont-Laurier et de Tingwick

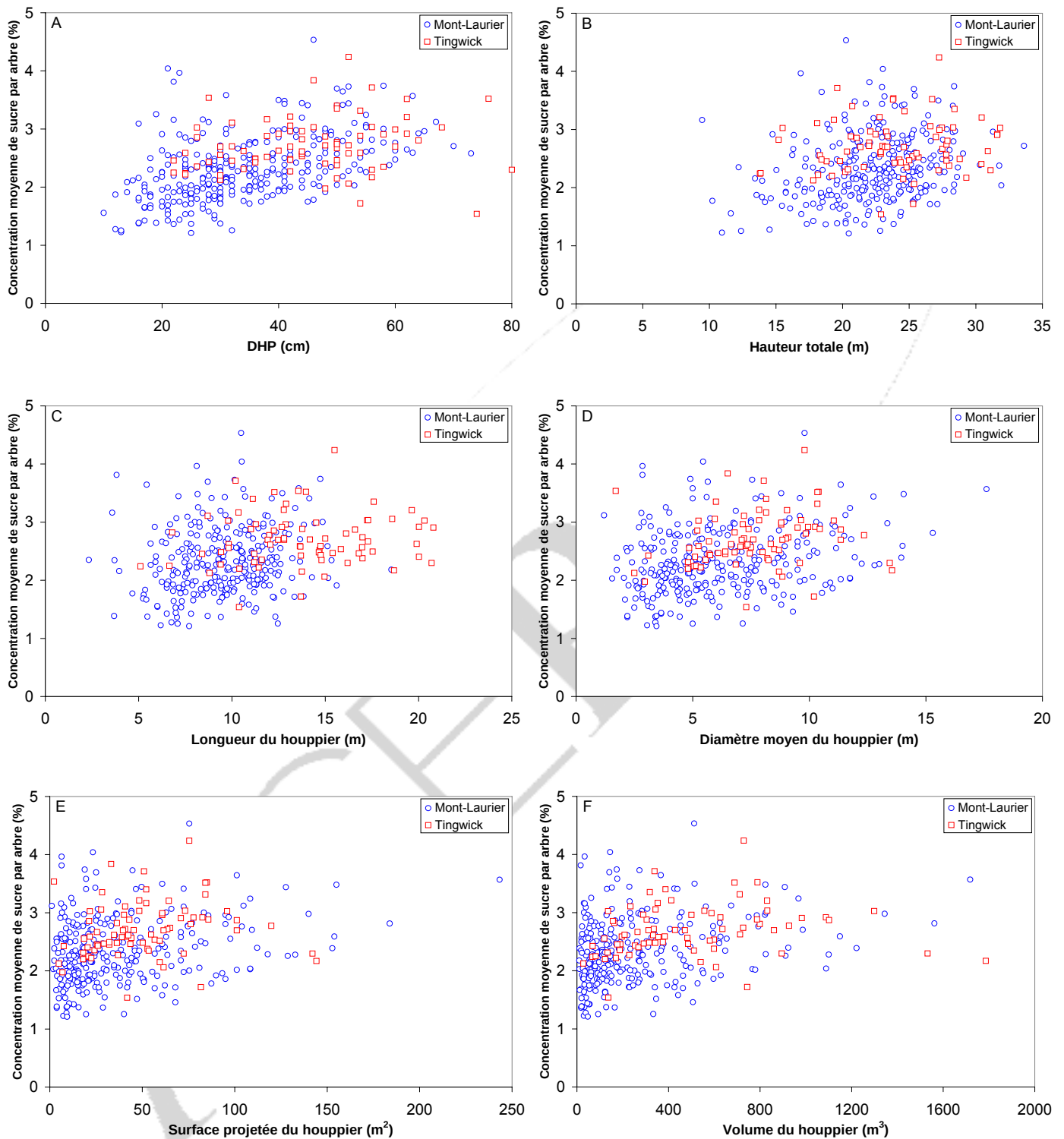


Figure 3. Relations entre la concentration en sucre et six caractéristiques dendrométriques pour les sites de Mont-Laurier et de Tingwick

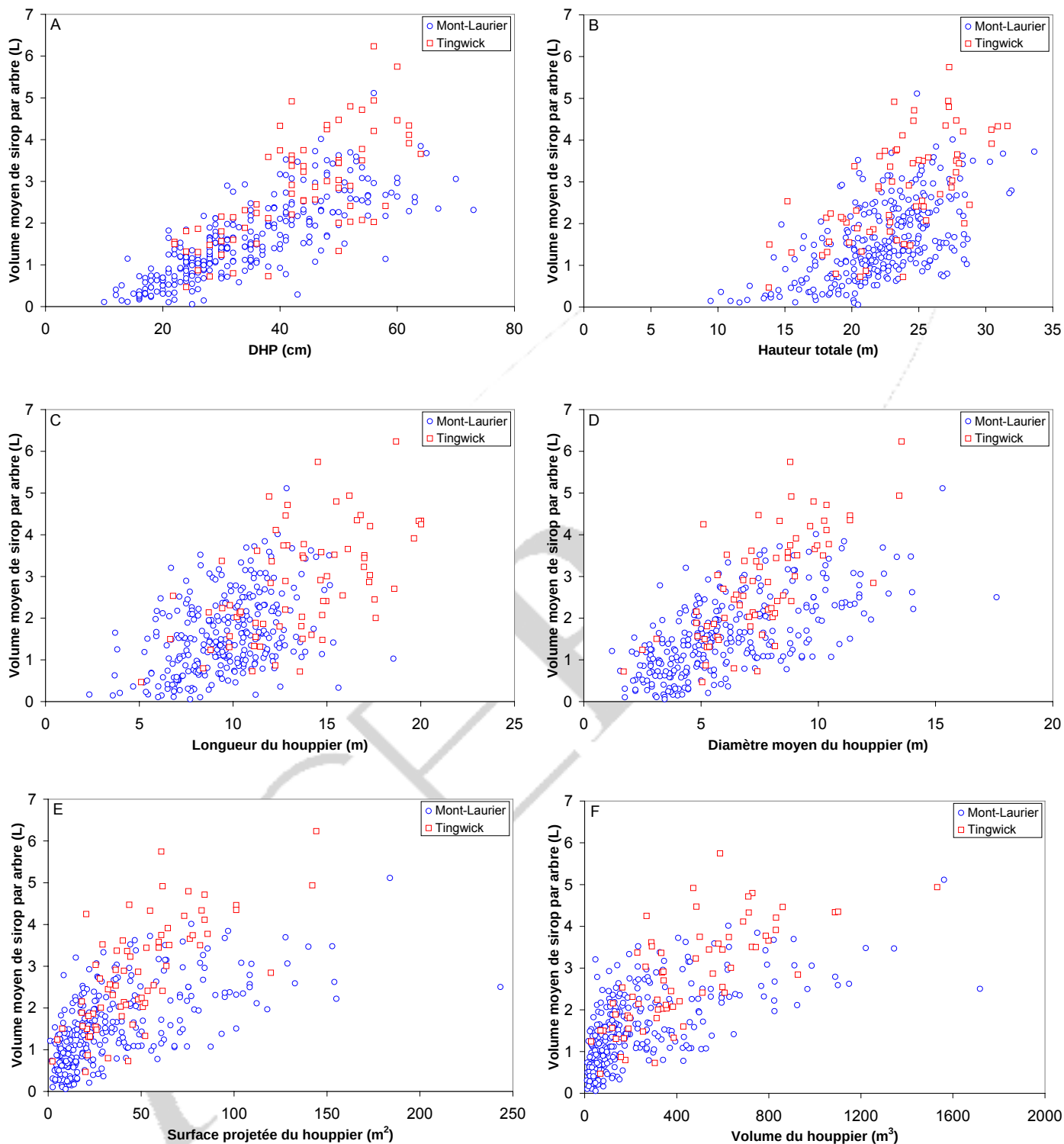


Figure 4. Relations entre le volume de sirop et six caractéristiques dendrométriques pour les sites de Mont-Laurier et de Tingwick

points sont de forme relativement comparables, il est adéquat de modéliser l'effet des variables mesurées sur les variables réponses de manière globale, c'est-à-dire sur les deux sites simultanément, plutôt que de construire un modèle par site, malgré que les deux sites présentent des caractéristiques dendrométriques statistiquement différentes au seuil $\alpha < 0,01$ (Tableau 1). Des relations linéaires semblent adéquates pour exprimer le lien entre les couples puisqu'il n'y a pas de relation non linéaire évidente. Les relations linéaires semblent plus prononcées pour les variables coulée moyenne et sirop moyen, et ce, peu importe le site considéré. Il semble exister un petit nombre de valeurs extrêmes, mais leur importance devrait être minime étant donné la taille du fichier.

Les caractéristiques dendrométriques ont été traitées par analyse en composantes principales. Le tableau 2 présente la matrice de corrélation entre les caractéristiques dendrométriques pour les deux sites confondus. Tous les coefficients de corrélation sont significatifs au seuil $\alpha = 0,01$ (test bilatéral). Le tableau 3 présente la variance expliquée par cette analyse. Deux composantes principales expliquent à elles seules 87,72% de la variabilité, ce qui indique un énorme degré de redondance entre les variables. La figure 5 illustre cette redondance.

Tableau 2. Matrice de corrélation entre les caractéristiques dendrométriques des érables pour les deux sites

		DHP	Hauteur totale	Longueur du houppier	Diamètre du houppier	Surface projetée du houppier	Volume du houppier
DHP	Coef. de Pearson	1,000	0,654	0,517	0,688	0,648	0,674
	Niveau de signification		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Nombre d'observations	376	370	370	375	375	367
Hauteur totale	Coef. de Pearson	0,654	1,000	0,705	0,422	0,394	0,515
	Niveau de signification	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000
	Nombre d'observations	370	371	371	371	371	368
Longueur du houppier	Coef. de Pearson	0,517	0,705	1,000	0,392	0,362	0,584
	Niveau de signification	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
	Nombre d'observations	370	371	371	371	371	368
Diamètre du houppier	Coef. de Pearson	0,688	0,422	0,392	1,000	0,970	0,911
	Niveau de signification	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
	Nombre d'observations	375	371	371	376	376	368
Surface projetée du houppier	Coef. de Pearson	0,648	0,394	0,362	0,970	1,000	0,940
	Niveau de signification	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
	Nombre d'observations	375	371	371	376	376	368
Volume du houppier	Coef. de Pearson	0,674	0,515	0,584	0,911	0,940	1,000
	Niveau de signification	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Nombre d'observations	367	368	368	368	368	368

Tableau 3. Variance expliquée par l'analyse en composantes principales

Composantes	Valeurs propres		
	Total	Portion de variance (%)	Variance cumulée (%)
1	4,178	69,632	69,632
2	1,085	18,083	87,715
3	0,430	7,168	94,882
4	0,233	3,381	98,764
5	0,060	1,006	99,770
6	0,014	0,230	100,000

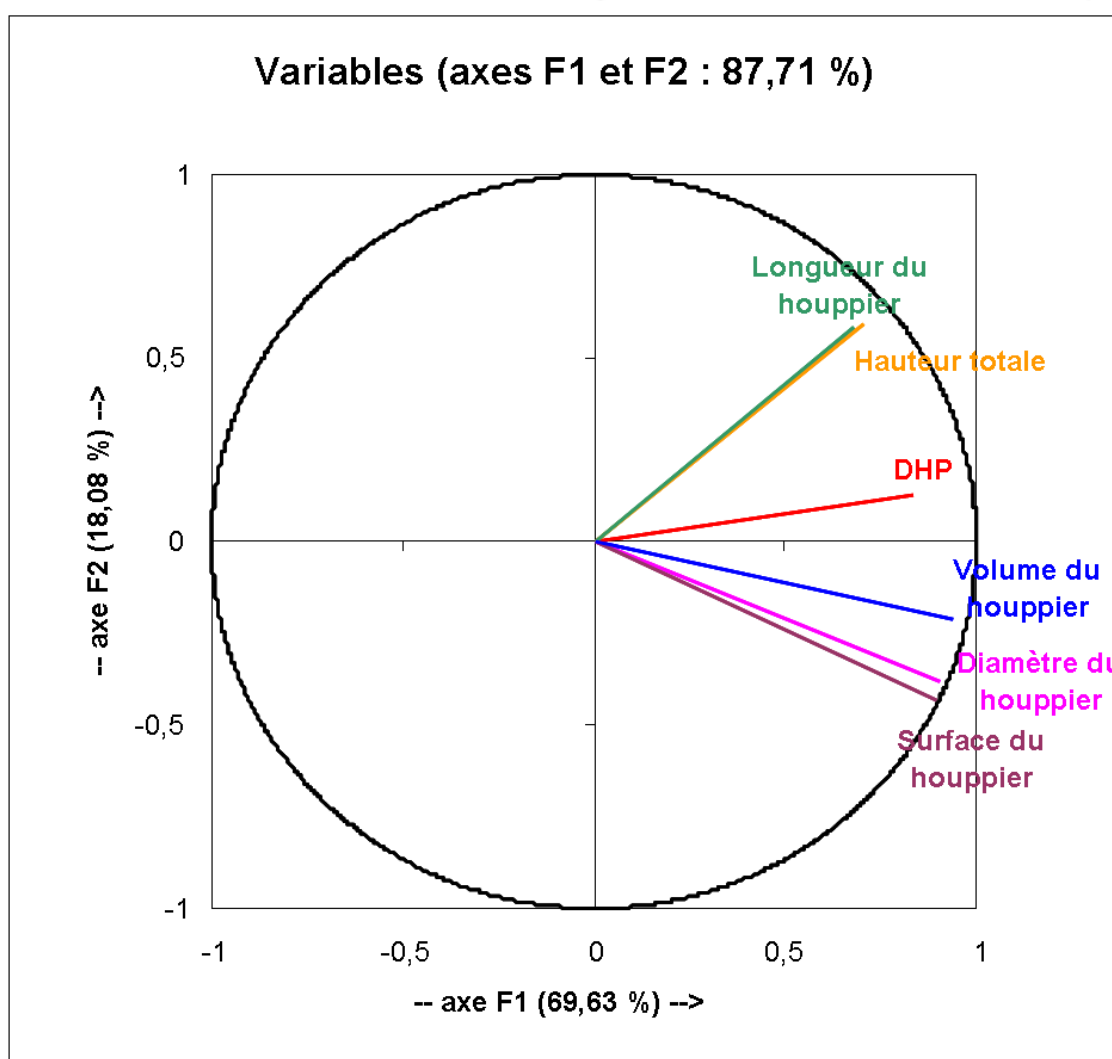


Figure 5. Cercle des corrélations illustrant le degré de corrélation entre les six variables

La figure 5 révèle une corrélation positive très élevée entre la longueur du houppier et la hauteur totale des arbres (vecteurs superposés). Bien qu'un peu moins élevées, ces corrélations sont aussi fortes pour le diamètre, la surface et le volume des houppiers (vecteurs rapprochés). Par contre, il y a peu de corrélation entre ces dernières variables et les deux premières mentionnées (angles des vecteurs proches de 90°). En ce qui concerne le DHP, il est moyennement corrélé avec les autres variables.

Ces observations indiquent que la régression linéaire multiple n'est pas appropriée lorsque les variables explicatives sont trop corrélées. Un outil alternatif, la régression par les moindres carrés partiels (PLS; (Partial Least Squares) a donc été employée.

5.1 Facteurs prédictifs des paramètres de coulée

Nous avons examiné les relations entre les paramètres de coulée et les variables dendrométriques avec la régression PLS. Les coefficients de régression pour les six variables ont été standardisés afin de tenir compte des étendues différentes d'une variable à l'autre. Par exemple, les valeurs de DHP varient entre 10 et 80 (cm) alors que celles du volume du houppier varient entre 10 et 1786 (m³).

5.1.1 RÉGRESSION AVEC LES DONNÉES DES DEUX SITES CONFONDUS

Nous avons d'abord cherché à relier les variables réponses aux données dimensionnelles des arbres des deux sites à la fois, ce qui exclut donc les données de croissance en diamètre qui ne sont disponibles que pour l'ensemble de Mont-Laurier.

5.1.1.1 Volume de coulée

La figure 6 présente les coefficients standardisés et les intervalles de confiance (95%) des six variables dendrométriques pour le volume de coulée. Le DHP, la hauteur totale, la longueur et le diamètre du houppier ont un effet positif significatif, alors que la surface et le volume du houppier n'en ont pas. Il convient toutefois de noter que la limite inférieure de l'intervalle de confiance pour la longueur du houppier s'approche de l'abscisse (valeur « 0 »), de sorte que sa capacité de prédiction peut être pratiquement écartée.

5.1.1.2 Concentration en sucre

La figure 7 présente les coefficients standardisés et les intervalles de confiance (95%) des six variables dendrométriques pour la concentration en sucre. Le DHP est la seule variable qui ait un effet notable sur la concentration en sucre. Pour toutes les autres caractéristiques dendrométriques, les effets ne sont pas significatifs.

5.1.1.3 Production de sirop

La figure 8 présente les coefficients standardisés et les intervalles de confiance (95%) des six variables dendrométriques pour la production de sirop. Le DHP et le diamètre du houppier ont un effet positif significatif, alors que les autres variables n'en ont pas.

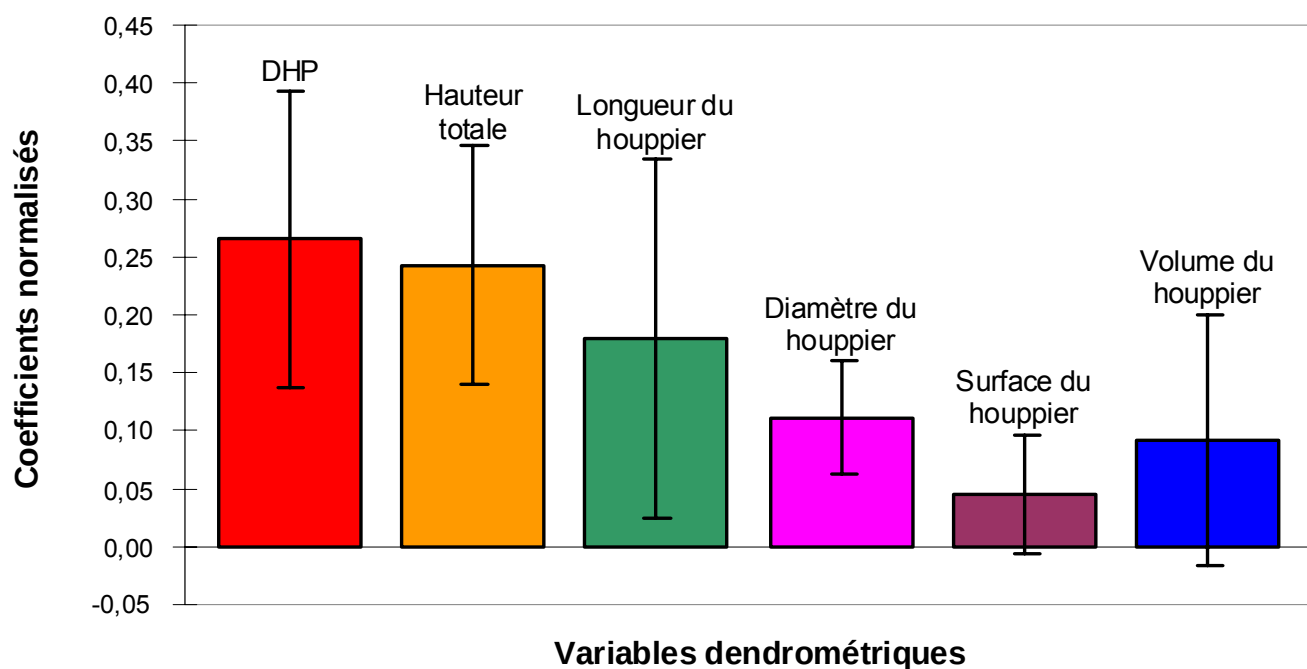


Figure 6. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques pour le volume de coulée

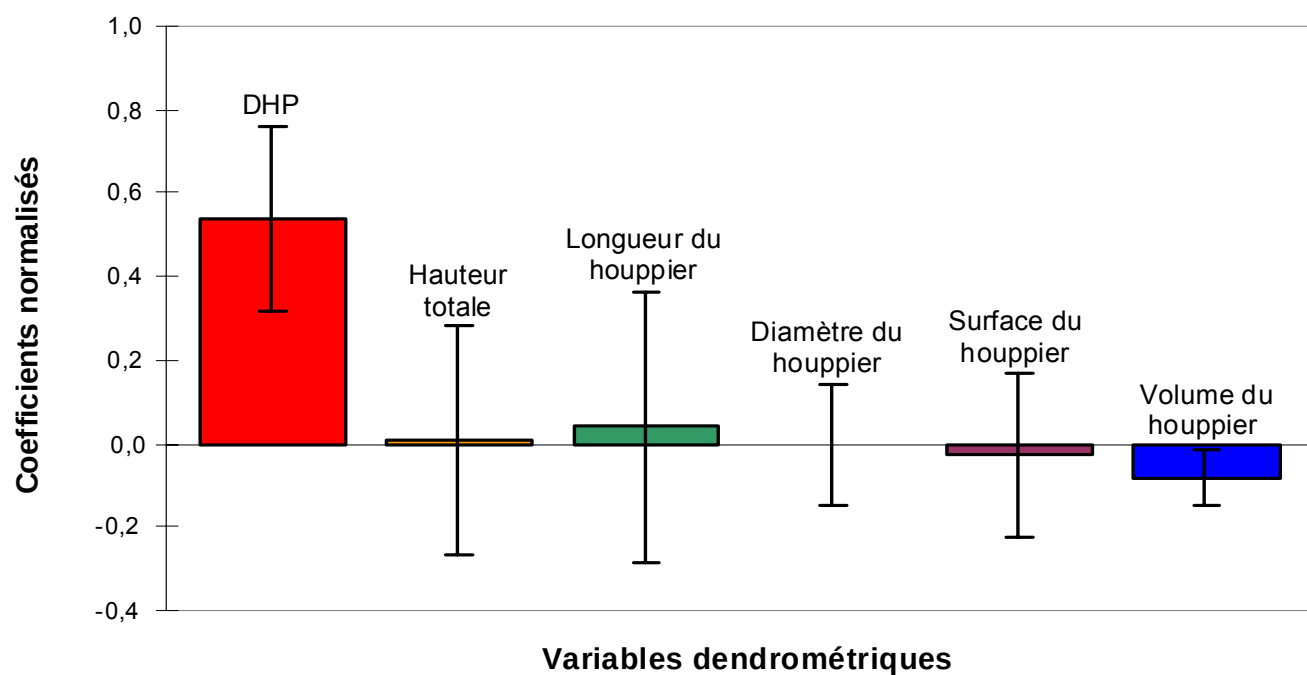


Figure 7. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques pour la concentration en sucre

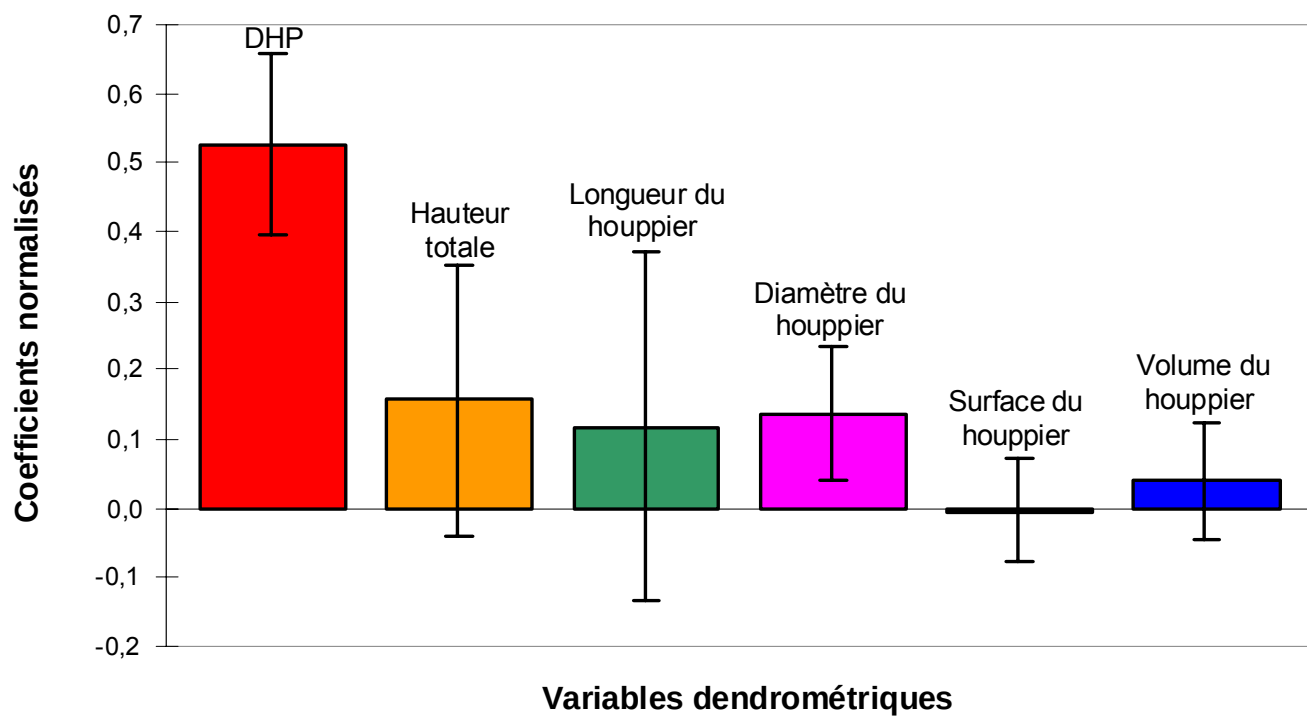


Figure 8. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques pour la production de sirop

5.1.2 RÉGRESSION AVEC LES DONNÉES DU SITE MONT-LAURIER

Comme déjà mentionné, nous avons extrait des carottes pour mesurer la croissance radiale, mais seulement au site de Mont-Laurier. Les figures 9 à 11 présentent les relations entre les trois variables réponses et les croissances radiales des cinq à cinquante dernières années, sauf pour la période des quinze dernières années dont les résultats ne sont pas présentés par souci de mise en page. Toutefois, les coefficients de corrélation pour la période de 15 ans suivent les mêmes tendances que celles des autres périodes. À cette étape-ci, contrairement aux analyses précédentes, nous n'avons pas calculé de moyennes sur deux ans par arbre, mais avons utilisé les données brutes. Le nombre de données de croissance en diamètre diminue donc à mesure que s'allongent les périodes de croissance, allant de 573 observations pour les périodes de 5 à 20 ans à 237 observations pour la période 50 ans.

Parmi les trois variables réponses, c'est pour le volume de coulée que les relations sont les meilleures, bien que les coefficients de corrélation soient très bas ($r^2 = 0,10$ à $0,26$). C'est la période de 30 ans qui affiche le meilleur coefficient de corrélation. Il n'y a aucune corrélation entre la concentration de sucre et les périodes de croissance ($r^2 = 0,00$ à $0,02$) et pour le volume de sirop, le meilleur coefficient de corrélation est encore pour la période de 30 ans avec $r^2 = 0,19$ et les autres sont tous très bas.

Nous avons repris les analyses de régression PLS avec les données de ce site, tout en conservant les variables dimensionnelles, mais maintenant en calculant les moyennes sur deux ans pour chaque arbre. Comme les données des variables de croissance pour les périodes de 40 et 50 ans n'étaient pas aussi nombreuses que pour les périodes de 30 ans et moins, nous les avons écartées des analyses.

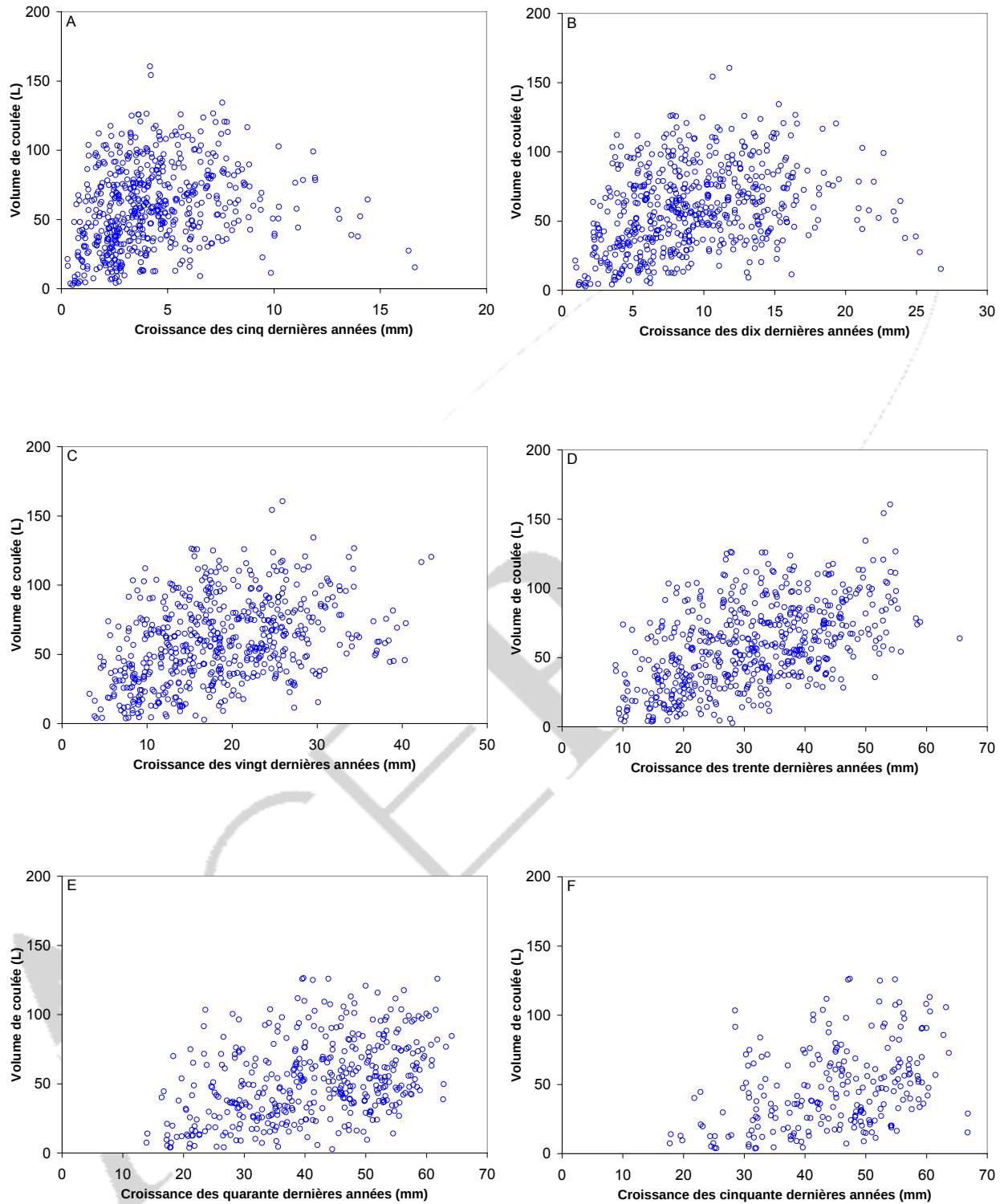


Figure 9. Relation entre le volume de coulée et six périodes de croissance pour le site de Mont-Laurier

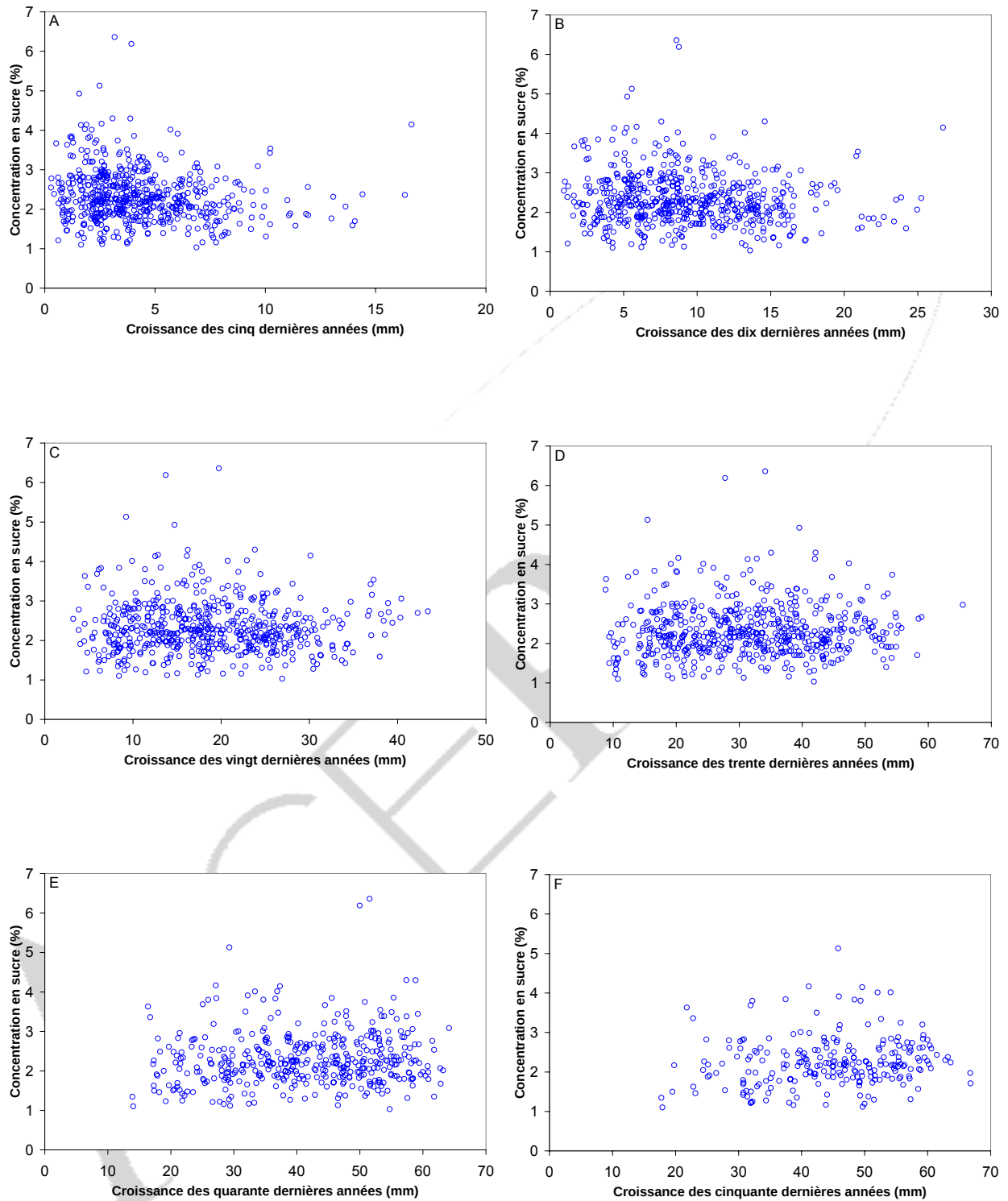


Figure 10. Relation entre la concentration en sucre et six périodes de croissance pour le site de Mont-Laurier

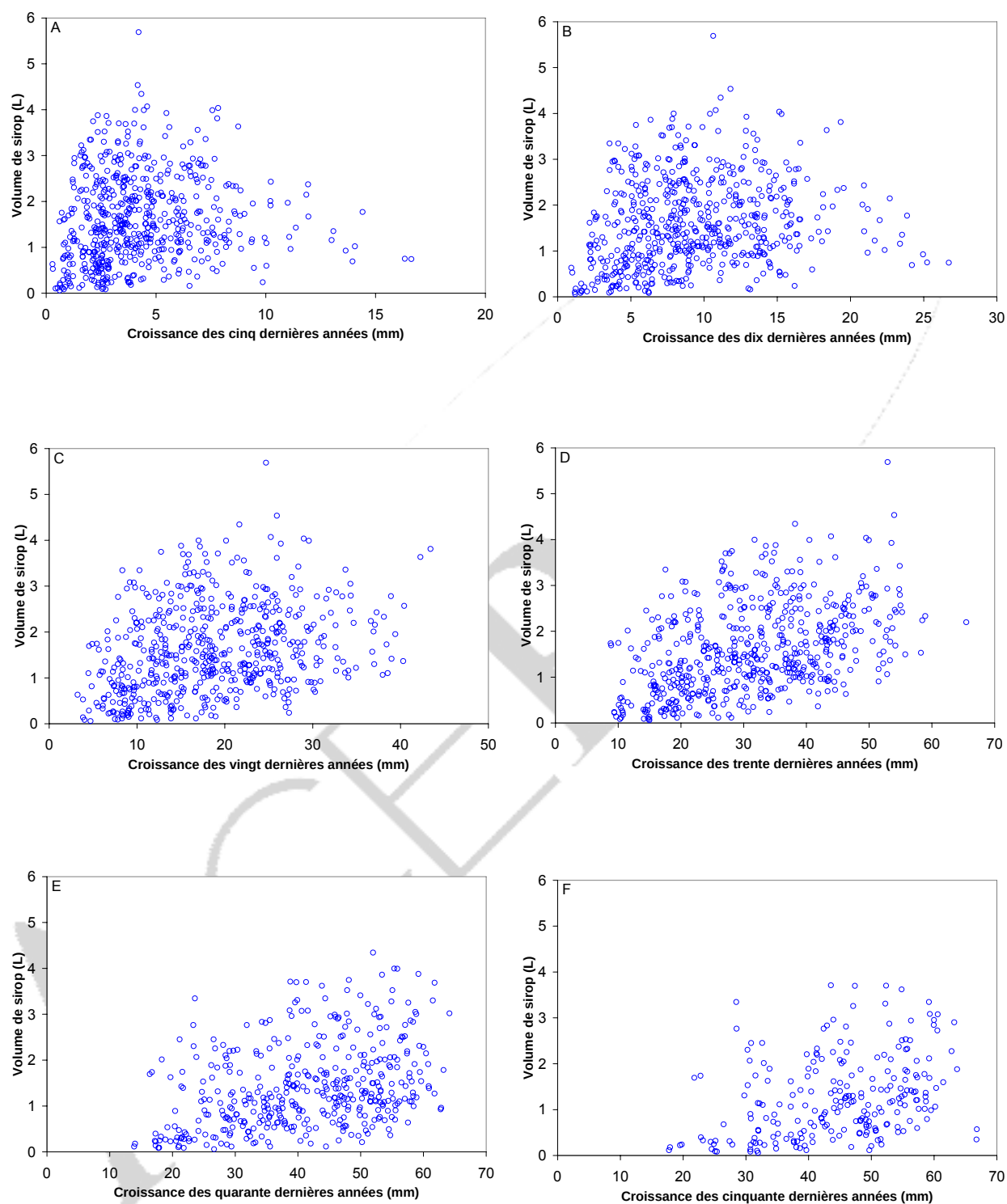


Figure 11. Relation entre le volume de sirop et six périodes de croissance pour le site de Mont-Laurier

5.1.2.1 Volume de coulée

La figure 12 présente les coefficients standardisés et les intervalles de confiance (95%) des six variables dendrométriques et de cinq variables de croissance pour le volume de coulée. Le DHP, la hauteur totale, et le diamètre du houppier ont un effet positif significatif, alors que la longueur, la surface et le volume du houppier n'en ont pas. Au sujet des variables de croissance, c'est celle de 30 ans qui est la plus significative, de part sa longueur de bâtonnet et son court intervalle de confiance.

5.1.2.2 Concentration en sucre

La figure 13 présente les coefficients standardisés et les intervalles de confiance (95%) des six variables dendrométriques et de cinq variables de croissance pour la concentration en sucre. Le DHP est la variable qui se démarque le plus, malgré une petite importance pour trois des quatre variables de houppier. Aucune des variables de croissance n'est significative.

5.1.2.3 Production de sirop

La figure 14 présente les coefficients standardisés et les intervalles de confiance (95%) des six variables dendrométriques et de cinq variables de croissance pour la production de sirop. Le DHP et la hauteur totale ont un effet positif significatif, alors que les autres variables n'en ont pas. Au sujet des variables de croissance, tout comme pour la variable coulée, c'est celle de 30 ans qui est la plus significative, de part sa longueur de bâtonnet et son court intervalle de confiance.

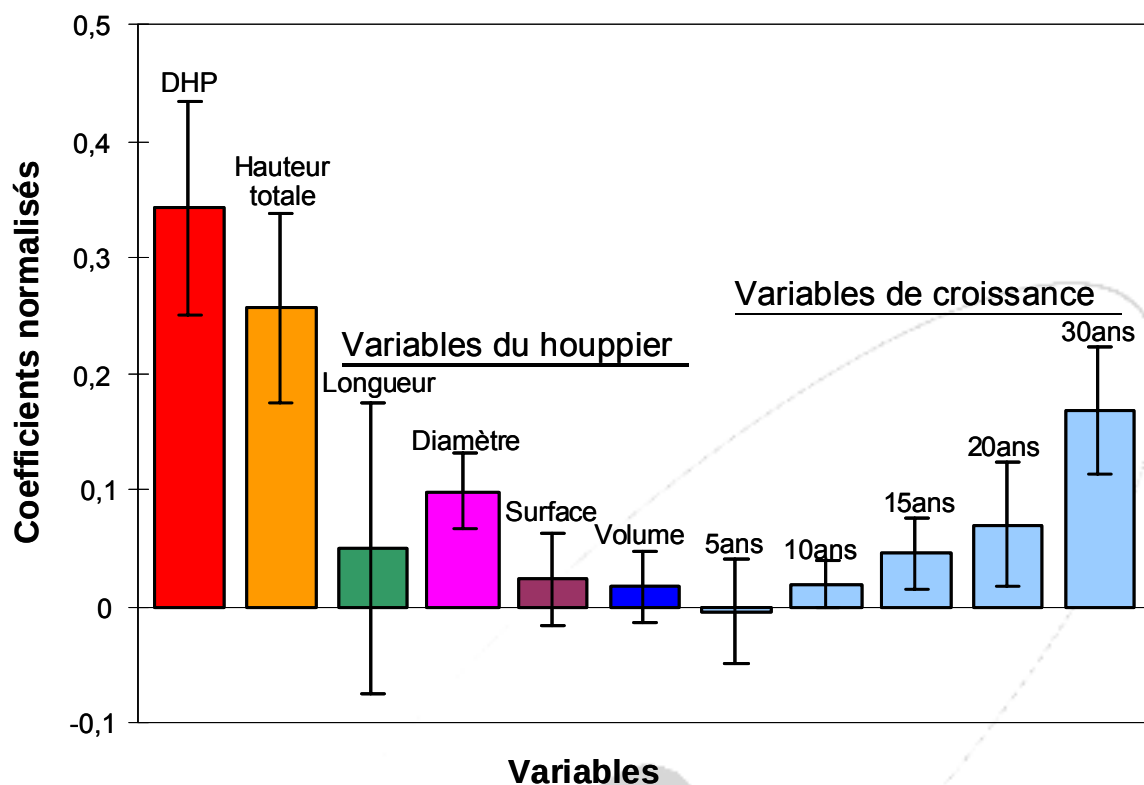


Figure 12. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques et des cinq variables de croissance pour le volume de coulée

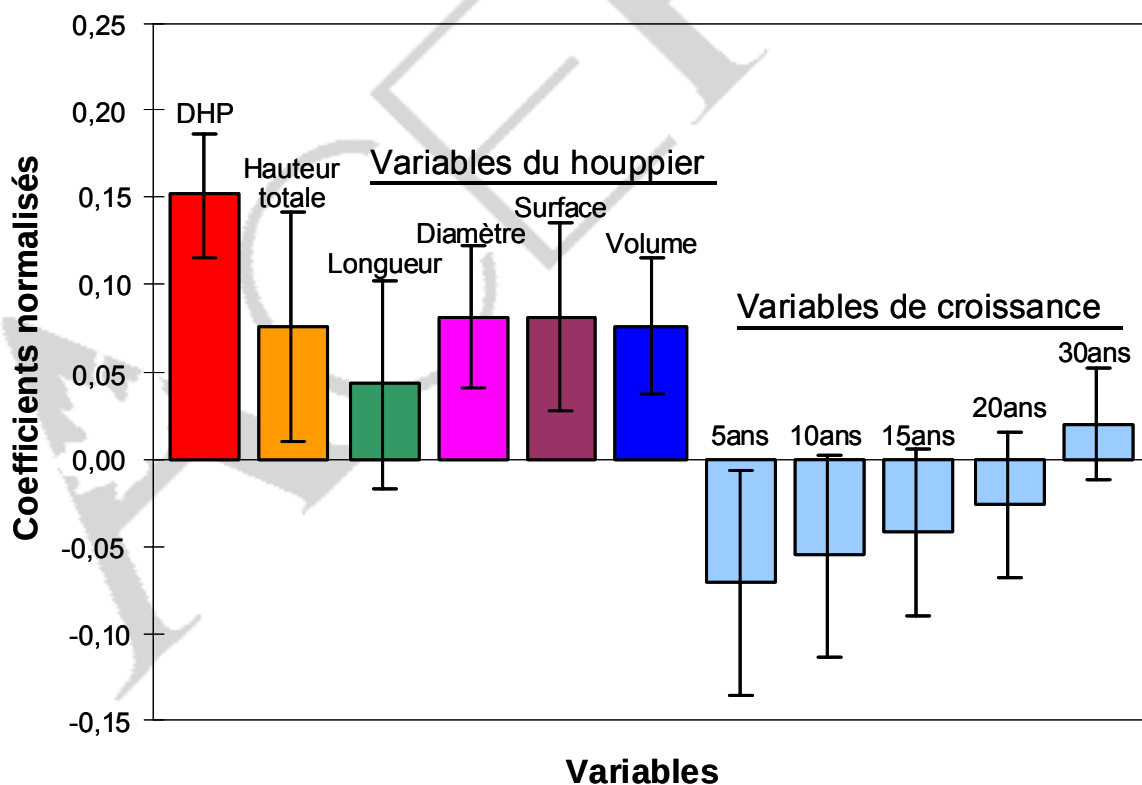


Figure 13. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques et des cinq variables de croissance pour la concentration en sucre

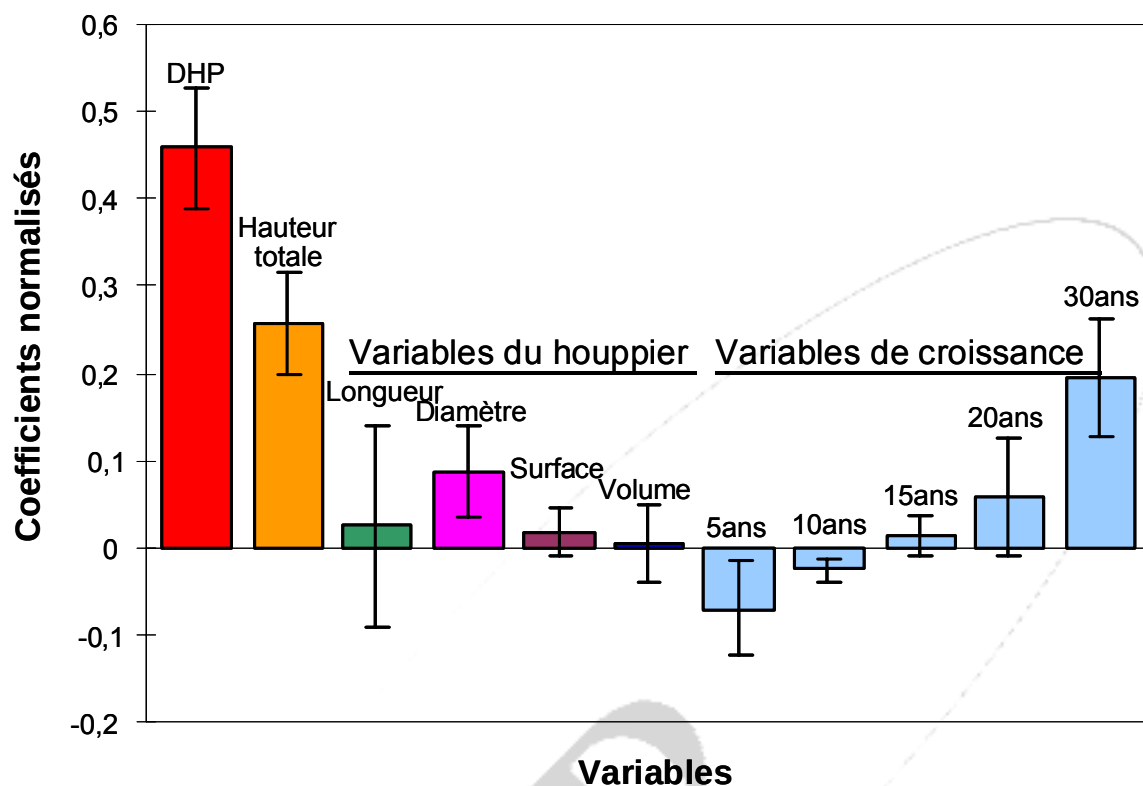


Figure 14. Coefficients normalisés et intervalles de confiance des six variables dendrométriques et des cinq variables de croissance pour la production de sirop

6 DISCUSSION

Bien qu'il existe des différences significatives entre les caractéristiques dendrométriques par site, les relations entre variables explicatives et réponses ne semblent pas suffisamment différentes pour justifier une analyse par site. La corrélation, ou la redondance, importante entre les variables explicatives ne permet pas d'utiliser la régression linéaire standard afin de construire des modèles fiables et déterminer quelles variables dendrométriques sont les plus importantes variables prédictives. En ce sens, la régression PLS est un outil qui s'est avéré beaucoup plus approprié et qui a notamment permis de déterminer quelles variables ont le plus d'importance pour prédire les réponses.

Pour la coulée, le DHP est la variable prédictive la plus importante, et ce en utilisant les données des deux sites ou seulement celles de Mont-Laurier. Provencher (2006) arrive aussi à cette conclusion en ayant utilisé la régression multiple (stepwise) avec le DHP, le diamètre de cime et le taux de croissance comme variables explicatives. Blum (1973) a aussi obtenu de bonnes corrélations en utilisant la régression multiple entre la coulée et le DHP, mais cette variable n'était pas seule en cause. De plus, ces tendances n'ont pas été observées lors de la deuxième année de ses essais. La hauteur totale est la deuxième meilleure variable prédictive, et ce encore pour un ou deux sites. Elle est presque aussi importante que le DHP lorsque les deux sites sont considérés. Blum (1973) rapporte que la hauteur totale était la deuxième en importance pour prédire le volume de coulée dans un de ses trois sites, mais encore seulement une année sur deux. Le diamètre du houppier est la troisième meilleure variable prédictive. Provencher (2006) a aussi identifié cette variable comme significative, mais sa contribution était moindre que celle du DHP. Tout comme pour la hauteur totale, Blum (1973) rapporte que cette variable est ressortie pour deux de ses trois sites et encore une seule année sur les deux où son étude fut menée. Les trois autres variables dendrométriques reliées au houppier ne présentent pas un bon potentiel de prédiction. D'abord, leur contributions sont faibles et ensuite, leurs intervalles de confiances sont étendus. Le diamètre du houppier est meilleure variable prédictive que sa surface. On aurait pu s'attendre à ce que ces deux variables aient la même capacité de prédiction, mais il semble que la mise au carré du diamètre n'amène pas plus d'information. On aurait aussi pu s'attendre à ce que le volume de la cime soit plus performant comme variable dendrométrique, ce qui est souvent rapporté comme une bonne variable prédictive. Par contre, ces observations ont souvent été faites sur des érables en plein champ ou le long de routes (Morrow, 1953), donc non soumis à la compétition qui existe entre les arbres en forêt. Rappelons que cette variable est le résultat d'un calcul impliquant la prise de trois mesures, elles-mêmes quelque peu difficiles à réaliser. Peut-être que la prise de plus que trois mesures aurait amené plus de précisions sur les valeurs calculées, un peu comme l'a fait Tucker (1990) où il a mesuré huit rayons et deux demi-hauteurs de cime. Parmi les variables de croissance, plus elles sont de longue durée et meilleures sont leurs capacités de prédiction. Cela indique qu'il est inutile de carotter seulement les quelques premiers millimètres sous l'écorce pour espérer avoir une réponse, mais que les carottes doivent être assez longues. Laing et Howard (1990) rapportent aussi des corrélations positives entre la coulée et une croissance rapide en DHP.

Pour la concentration en sucre, le DHP est la meilleure variable prédictive. C'est d'ailleurs la seule variable qui se démarque clairement lorsque les deux sites sont considérés simultanément. Lorsqu'examiné pour le seul site de Mont-Laurier, les autres variables amènent un certain degré de prévision, mais leurs intervalles de confiance sont grands en regard de leurs contributions. En ce qui concerne les variables de croissance, elles n'apportent aucune information. On en déduit donc qu'un arbre qui croît rapidement en DHP n'accumule pas plus de sucre qu'un autre qui croît lentement, ce qui est différent de la réponse coulée. Morrow (1953) rapporte que les arbres à grosses cimes donnent une sève plus sucrée que ceux à petites cimes. Toutefois, il s'agit ici encore de ces arbres de plein champ. Laing et Howard (1990) ont obtenu de bonnes corrélations entre la sucrosité de la sève et le taux de croissance, mais ils rapportent que les arbres avec de grosses cimes n'ont pas nécessairement donné d'eau plus sucrée. Blum (1973) rapporte que les caractéristiques dendrométriques auraient de faibles corrélations avec les concentrations de sucre.

Pour la production de sirop, il y a naturellement des contributions des deux autres variables réponses. Le DHP est la variable dendrométrique qui est la meilleure prédictive pour un ou deux sites. Par contre, pour les autres variables, la hauteur totale aurait pu amener une certaine forme d'explication, mais elle n'est

significative que pour le seul site de Mont-Laurier. Tout comme pour le volume de coulée, la croissance en DHP de la période 30 ans est une bonne variable prédictive.



7 CONCLUSION

Le DHP semble donc être l'élément le plus déterminant dans le volume de la coulée, la concentration en sucre et la production de sirop qui en découle. Provencher (2006) arrive aussi à cette conclusion. Puisque le DHP est une mesure facile à obtenir et qu'il est fortement corrélé aux autres variables, on pourrait limiter les mesures à prendre à cette seule variable afin de prédire les volumes de sirop produits dans une exploitation acéricole. La croissance en diamètre, bien qu'ayant amené beaucoup d'informations, n'a pas dépassé le DHP en capacité de prédiction. L'acquisition de ces données est très coûteuse, donc nous ne recommanderions pas de carotter les arbres dans le seul but de prédire la production de sirop.

Il faut garder à l'esprit que les arbres choisis pour cette étude étaient « de qualité », ce qui n'est pas nécessairement le cas de tous les arbres d'une exploitation acéricole quelconque, où les acériculteurs doivent composer avec des arbres de toutes qualités. En ce sens, il ne faudrait pas limiter le choix des tiges sur leurs seules taille, mais aussi considérer les autres aspects phytosanitaires. L'étude réalisée ne permet pas de faire une prédiction plus précise de la productivité des érables ni d'identifier les causes de la variabilité inter arbre qui est connue pour être élevée chez l'érable à sucre. Si une autre étude du genre devait être réalisée, d'autres paramètres intrinsèques et extrinsèques devraient être mesurés en parallèle avec les données déjà retenues pour compléter cette étude et être en mesure de mieux comprendre ce qui détermine les variations de la coulée, tels que les conditions climatiques lors des périodes de coulée, les conditions climatiques lors des saisons de croissance précédant les périodes de coulée, la quantité de rayons médullaires et les réserves carbonées et l'activité des enzymes de dégradation des réserves carbonées.

RÉFÉRENCES

- BLUM, B. M. 1973. Relation of sap and sugar yields to physical characteristics of sugar maple trees. *For. Sci.* 19 (3) : 175-179.
- GREGORY, R. A. 1978. Living element of the conducting secondary xylem of sugar maple (*Acer saccharum*). *IAWA Bull.* 4 : 65-69.
- JOHNSON, R. W., TYREE, M. et DIXON, M. A. 1987. A requirement for sucrose in xylem sap flow from dormant maple trees. *Plant Physiol.* 84 : 495-500.
- KRIEBEL, H. B. 1990. Genetic improvement in sugar maple for high sugar content : II. Relative effectiveness of maternal and biparental selection. *Can. J. For. Res.* 20 : 837-844.
- LAING, F. M. et HOWARD, D. B. 1990. Sap sweetness consistency vs growth rates in young sugar maples. *North. J. Appl. For.* 7 : 5-9.
- LAROCHELLE, F., FORGET, É., RAINVILLE, A. et BOUSQUET, J. 1998. Sources of temporal variations in sap sugar content in a mature sugar maple (*Acer saccharum*) plantation. *For. Ecol. Manag.* 106 : 307-313.
- MARVIN, J. W., MORSELLI, M. et LAING, F. M. 1967. A correlation between sugar content and volume yields in sugar maple – an 18-year study. *For. Sci.* 13 : 346-351.
- MORROW, R. R. 1953. Influence of number and depth of tap holes on maple sap flow. *Cornell Univ. Agr. Exp. Stn. Ithaca, N. Y., bull. n° 982*, 12 p.
- MORSELLI, M. F., MARVIN, J. W. et LAING, F. M. 1978. Image-analysing computer in plant science : more vascular rays in sugar maples of high sap and sugar yields. *Can. J. Bot.* 56 : 973-986.
- POTHIER, D. 1995. Effets des coupes d'éclaircie et des variations climatiques interannuelles sur la production et la teneur en sucre de la sève d'une érablière. *Can. J. For. Res.* 25 : 1815-1820.
- PROVENCHER, J.-L. 2006. Influence de certaines variables dendrométriques sur la coulée printanière des érables à sucre. Allocution publique présentée au Complexe scientifique de Québec le 16 février 2006.
- TAYLOR, F. H. 1956. Variation in sugar content of maple sap. *Univ. Vermont Agric. Exp. Stn. Bull.* 587, 39 pp.
- TUCKER, G. 1990. Crown architecture and xylem-borne sucrose production in stand-grown sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) of the Adirondack mountains. Thèse de doctorat, Univ. Cornell.
- WEAST, R. C. 1974-75. Handbook of chemistry and physics (55th ed.), CRC Press, Cleveland, OH, D-130.