



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

Vers la formulation de nouvelles normes d'entailage
pour conserver la production acéricole à long terme

Volet A : détermination de la quantité de bois sain
basée sur les taux de croissance régionaux

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

Collaborateurs : Julien Lavoie
Guy Boudreault

RÉSUMÉ

Nous avons étudié les parcelles échantillons permanentes du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec établies depuis 1970 afin de calculer la croissance diamétrale des érables à sucre dans les principales régions productrices de sirop d'érable du Québec. Cette croissance diamétrale varie de 1,58 à 3,73 mm par année selon les diverses sous-régions écologiques étudiées. Il appert qu'aucune région n'affiche une croissance suffisante pour supporter la pratique actuelle qui permet d'entailler les érable à sucre dès qu'ils ont atteint un DHP de 20 cm sans entraîner de pertes de rendement à long terme dû au compartimentage.

Une révélation inattendue est l'observation d'une diminution de la croissance diamétrale généralisée plus forte pour l'érable à sucre que pour les essences compagnes. C'est le facteur « Année » qui a été identifié comme le plus significatif à cet effet.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	vi
1 Problématique	1
2 Matériel et méthodes	10
3 Résultats et discussion	12
3.1 Simulations faites avec les données de croissance par sous-région écologique	18
3.2 Évolution de la croissance diamétrale au cours des trois dernières décennies : volet exploratoire	22
3.3 Évolution de la croissance diamétrale au cours des trois dernières décennies : analyse statistique	25
3.3.1 Analyse sur les érables à sucre	25
3.3.1.1 Analyse sur les arbres	25
3.3.1.2 Analyse sur les parcelles	29
3.3.2 Analyse sur les autres essences que l'érable à sucre	38
3.3.2.1 Analyse sur les arbres	38
3.3.2.2 Analyse sur les parcelles	40
4 Conclusion	47
5 Références citées	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Régie d'exploitation d'un érable entaillé pour la première fois à 20 cm de DHP avec une croissance radiale de 1 mm par année	4
Tableau 2. Régie d'exploitation d'un érable entaillé pour la première fois à 20 cm de DHP avec quelques caractéristiques de croissance et un diamètre d'entaillage de 7,9 mm.....	6
Tableau 3. Nombre d'années pendant lequel un arbre de 20 cm de DHP initial peut être entaillé sous diverses conditions avant que toute sa circonférence ait été exploitée.....	9
Tableau 4. Nombre de jours de croissance écoulés dans une année selon la date où l'inventaire a été fait	10
Tableau 5. Nombre de parcelles échantillons permanentes (PEP) et nombre de paires d'observations disponibles pour calculer les accroissements en DHP de l'érable à sucre.....	13
Tableau 6. Moyennes des croissances diamétrales annuelles pondérées (mm) de l'érable à sucre selon différentes stratifications	14
Tableau 7. Valeurs ajustées des croissances diamétrales annuelles pondérées (mm) de l'érable à sucre par sous-région écologique	16
Tableau 8. Valeurs ajustées des croissances diamétrales annuelles pondérées (mm) de l'érable à sucre pour les combinaisons de dépôt et de densité par sous-région écologique	17
Tableau 9. Nombre d'année après le premier entaillage pendant lequel un érable à sucre peut être entaillé avant le compartimentage complet.....	19
Tableau 10. DHP (cm) atteint au terme de la première série d'entaillage ayant compartimenté toute la zone entaillable et DHP requis pour initier une seconde série d'entaillage	19
Tableau 11. Nombre d'années de mise au repos après la fin de la première série d'entaillage avant de pouvoir entailler de nouveau dans le bois sain	20
Tableau 12. DHP (cm) lors de l'initiation de la deuxième série d'entaillage	20
Tableau 13. Durée de la deuxième série d'entaillage avant le compartimentage complet (années).....	21
Tableau 14. Équations de régression de la croissance diamétrale annuelle des autres essences que l'érable à sucre en fonction du temps toutes sous-régions écologiques confondues.....	23
Tableau 15. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance des érables à sucre pris individuellement par sous-région écologique et par année.....	28
Tableau 16. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les érables à sucre pris individuellement par sous-région écologique	28
Tableau 17. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance moyenne des érables à sucre par parcelle, par sous-région écologique et par année.....	31
Tableau 18. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les érables à sucre pris par parcelle par sous-région écologique	32
Tableau 19. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance moyenne des érables à sucre par parcelle pour les cinq paramètres étudiés	35

Tableau 20. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les érables à sucre pris par parcelle dans les huit sous-régions écologiques et estimation des pentes de régression moyennes pour le DHP moyen, la surface terrière totale et la densité moyenne des parcelles ...	36
Tableau 21. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance des arbres d'autres essences que l'érable à sucre pris individuellement par sous-région écologique et par année	39
Tableau 22. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les arbres d'autres essences que l'érable à sucre pris individuellement par sous-région écologique	39
Tableau 23. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance moyenne des arbres d'autres essences que l'érable à sucre par parcelle, par sous-région écologique et par année.....	41
Tableau 24. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les arbres d'autres essences que l'érable à sucre pris par parcelle par sous-région écologique	42
Tableau 25. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance moyenne des arbres d'autres essences que l'érable à sucre par parcelle pour les cinq paramètres étudiés	45
Tableau 26. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les arbres d'autres essences que l'érable à sucre pris par parcelle dans les huit sous-régions écologiques et estimation des pentes de régression moyennes pour le DHP moyen, la surface terrière totale et la densité moyenne des parcelles.....	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schémas présentant la forme développée du bois coloré comme réaction à l'entaille	1
Figure 2. Schéma présentant un érable ayant 20 cm de DHP au début du cycle d'entaille et entaillé à la même hauteur pendant 19 ans	2
Figure 3. Schéma présentant le compartimentage résultant de 19 années d'entaille (vue partielle)	3
Figure 4. Résidus de l'analyse de variance effectuée sur la variable « Accroissement diamétral annuel pondéré »	15
Figure 5. Résidus de l'analyse de variance effectuée sur la variable « Racine carrée de l'accroissement diamétral annuel pondéré + 1 »	16
Figure 6. Évolution de l'accroissement en DHP de l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique	22
Figure 7. Évolution de l'accroissement en DHP des autres essences que l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique	23
Figure 8. Évolution de l'accroissement en DHP de quatre autres essences que l'érable à sucre entre 1970 et 2003	24
Figure 9. Résidus de l'analyse de variance effectuée avec la variable « croissance annuelle »	25
Figure 10. Résidus de l'analyse de variance effectuée avec la variable « log_croiss »	26
Figure 11. Évolution du log de l'accroissement en DHP de l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous- région écologique	27
Figure 12. Résidus de l'analyse de variance effectuée avec la variable « croissance annuelle moyenne des érables à sucre d'une parcelle »	29
Figure 13. Résidus de l'analyse de variance effectuée avec la variable « log_croiss »	30
Figure 14. Évolution du log de l'accroissement moyen en DHP de l'érable à sucre dans une même parcelle entre 1970 et 2003 par sous-région écologique	31
Figure 15. Log de l'accroissement moyen en DHP de l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction du DHP initial moyen dans la parcelle par sous-région écologique	33
Figure 16. Log de l'accroissement moyen en DHP de l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de la surface terrière totale dans la parcelle par sous-région écologique	33
Figure 17. Log de l'accroissement moyen en DHP de l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de la densité moyenne dans la parcelle par sous-région écologique	34
Figure 18. Évolution de la surface terrière des parcelles entre 1970 et 2003 par sous-région écologique	36
Figure 19. Évolution du log de l'accroissement en DHP des autres essences que l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique	38
Figure 20. Évolution du log de l'accroissement moyen en DHP des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle entre 1970 et 2003 par sous-région écologique	41

Figure 21. Log de l'accroissement moyen en DHP des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction du DHP initial moyen dans la parcelle par sous-région écologique.....	43
Figure 22. Log de l'accroissement moyen en DHP des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de la surface terrière totale dans la parcelle par sous-région écologique.....	44
Figure 23. Log de l'accroissement moyen en DHP des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de la densité moyenne dans la parcelle par sous-région écologique.....	44



1 PROBLÉMATIQUE

La production acéricole occupe une part importante de l'économie québécoise avec la participation de plus de 7000 producteurs générant des chiffres d'affaire allant de 136M\$ (2007) à 160M\$ (2005) par année. Avec des productions variant entre 62 et 74 millions de livres de sirop d'érable livrées entre 2005 et 2007, la part québécoise représente plus de 85% de la production mondiale (Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois, 2008) et 90% de la production canadienne et elle est vendue dans plus de 40 pays différents (Fédération des producteurs acéricoles du Québec, 2005a; 2005b; 2006; 2007). Cette production est réalisée à la fois sur des terres privées et sur des terres publiques. La méthode d'exploitation est passée depuis environ 40 ans du mode artisanal au mode industriel. Toutefois, nous n'avons pas examiné toutes les répercussions que le changement du mode de récolte pouvait avoir sur la ressource exploitée.

Un phénomène insidieux, mais non moins important de la production acéricole, est le compartimentage, aussi désigné par formation de bois coloré. Il est reconnu depuis quelques décennies comme une réponse physiologique naturelle et incontournable chez les arbres entaillés pour la production de sirop d'érable. L'arbre entaillé réagit en produisant des substances chimiques pour contrer l'infiltration d'air et des microorganismes (Houston *et al.*, 1990). Le bois coloré est indétectable et toute entaille fraîche en contact avec du bois compartimenté aura un rendement diminué, voire nul (Allard *et al.*, 1997; Fortin *et al.*, 2008). Le bois coloré s'étire verticalement dans le tronc. Il prend une forme géométrique apparentée à deux coins superposés avec un angle droit au fond, dont la largeur dépasse le diamètre de l'entaille sur environ 2 mm de chaque côté. Sur la longueur, elle se distribue également au dessus et au dessous de l'entaille et est proportionnelle au diamètre de la blessure. La profondeur est maximale à proximité de l'entaille et diminue progressivement à mesure qu'on s'en éloigne. La longueur de la zone improductive serait d'environ 40 à 50 cm de part et d'autre de l'entaille (Houston *et al.*, 1990). La figure 1 présente un schéma de la description précédente.

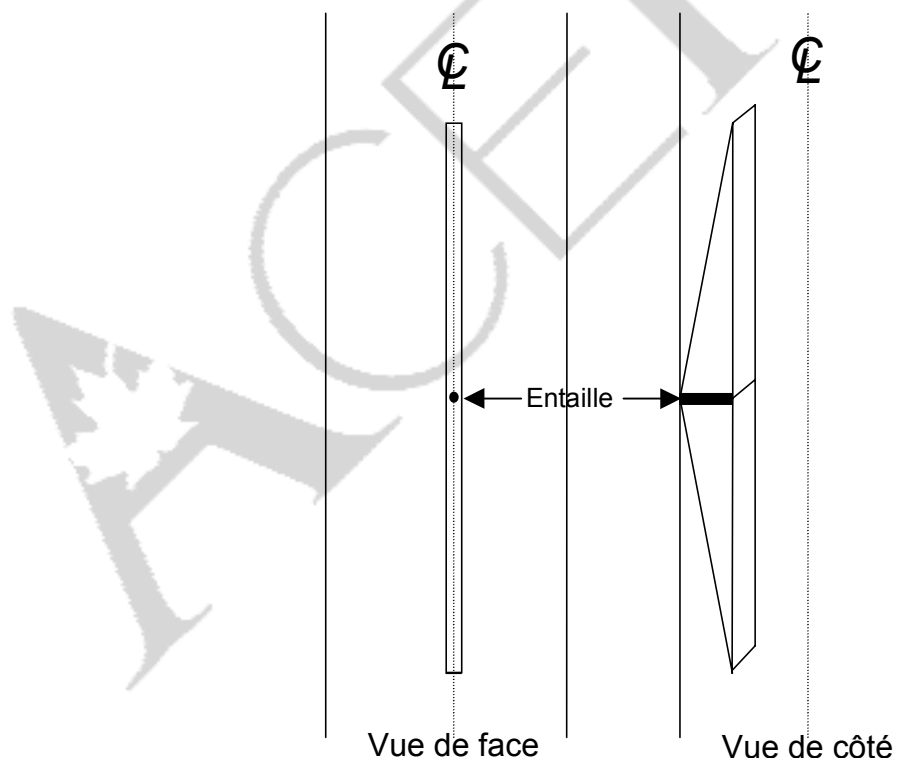


Figure 1. Schémas présentant la forme développée du bois coloré comme réaction à l'entailage

La figure 2 présente le schéma d'une série d'entailles qui seraient toutes faites exactement à la même hauteur. Cet érable a 20 cm au DHP lors de la première entaille et croît à raison de 1 mm en rayon par année pendant 20 ans. La profondeur des entailles est de 63 mm et leur diamètre de 11 mm. De façon à tenir compte du compartimentage latéral, le schéma présente une zone compartimentée de 15 mm de largeur. Les chiffres 1 à 19 représentent les années où sont faites les entailles. Les coins intérieurs de chaque zone de compartimentage se touchent, ce qui équivaut à maximiser le potentiel d'entailage. On constate que la 19^e année est la dernière où l'entailage pourra être réalisé dans du bois sain. Il est à noter que ce schéma ne tient pas compte de la fusion qui peut se faire entre deux entailles, ce qui ne ferait qu'empirer la situation. Si on veut continuer d'exploiter cet arbre tout en obtenant le maximum de rendement, il faut aller à un niveau supérieur (ou inférieur) à une distance minimale de 80 cm du premier niveau (Figure 3). (Cela suppose qu'on croit qu'il faille garder au moins 40 cm pour permettre le développement de bois coloré sous l'entaille du deuxième niveau).

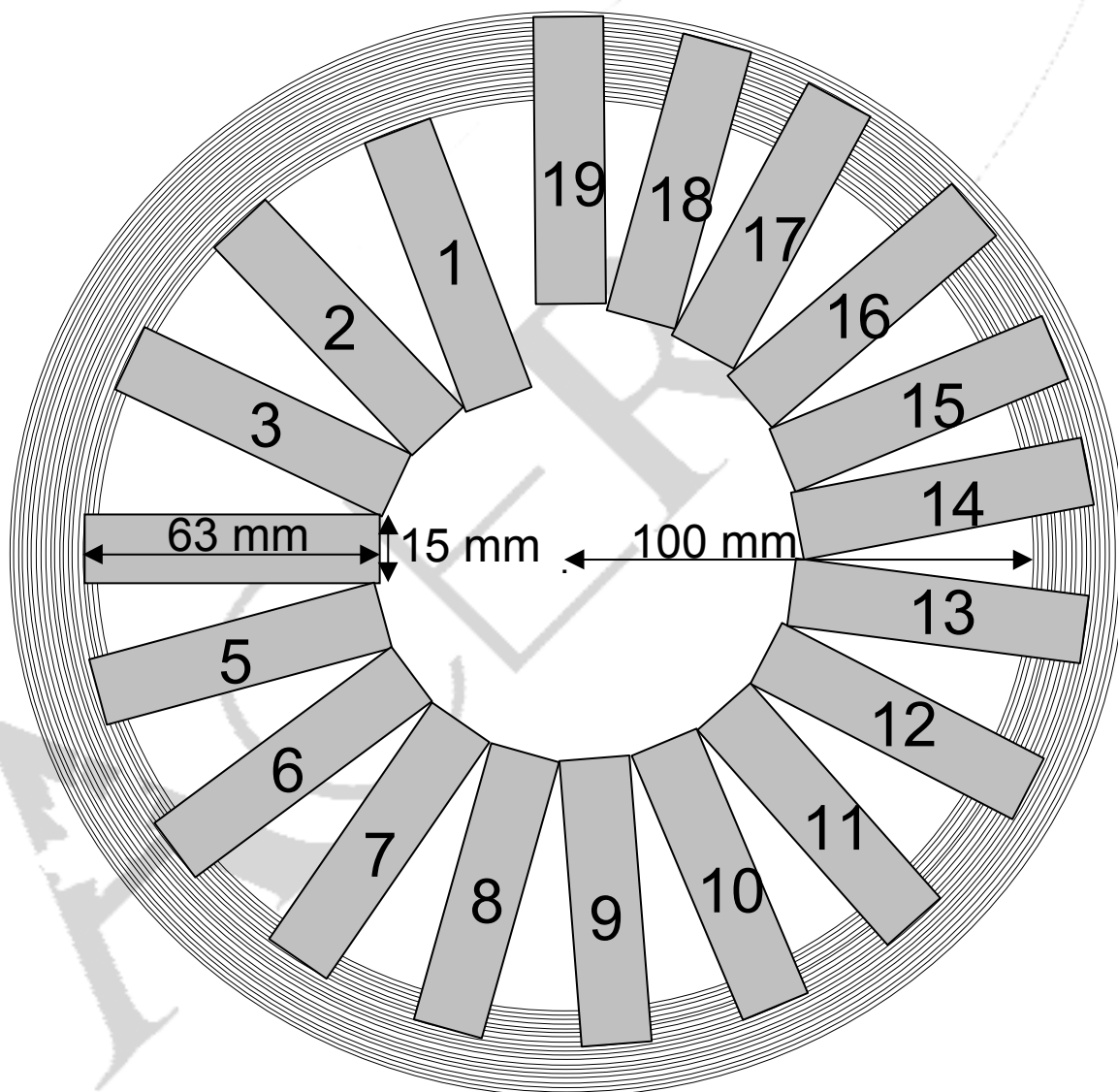


Figure 2. Schéma présentant un érable ayant 20 cm de DHP au début du cycle d'entailage et entaillé à la même hauteur pendant 19 ans

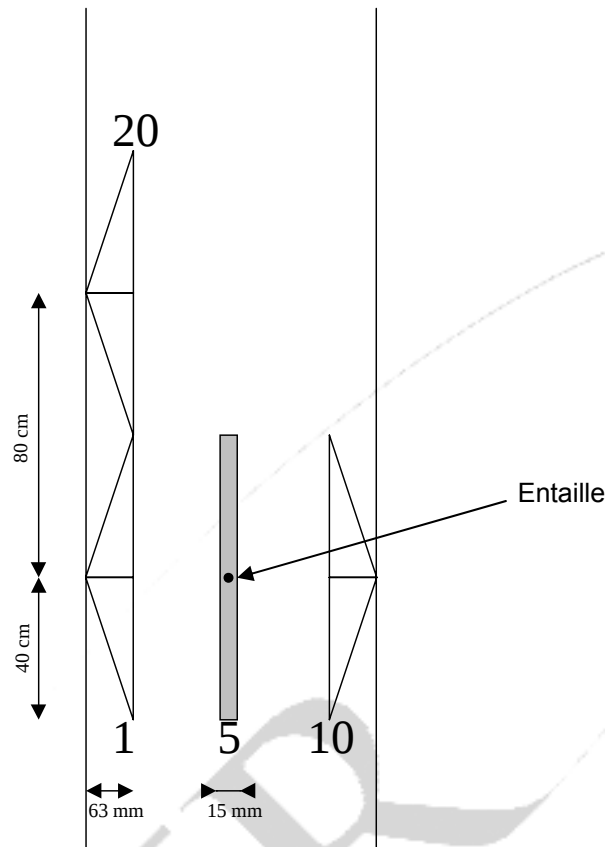


Figure 3. Schéma présentant le compartimentage résultant de 19 années d'entailage (vue partielle)

Le tableau 1 reprend maintenant les mêmes caractéristiques que celles présentées dans les figures 1 à 3. Quoique non illustré à la figure 2, le fond de l'entaille peut être relié au centre de l'arbre par deux lignes imaginaires formant un angle « α ». Cet angle diminue d'année en année à mesure que l'arbre croît, mais l'effet cumulatif ne peut être ignoré. C'est d'ailleurs cet effet cumulatif qui engendre tout le problème. Avec une croissance radiale de 1 mm/an et un diamètre d'entailage de 11 mm, on aura exploité, au mieux, toute la circonférence du tronc après 19 ans, tel que déjà présenté. Continuant cet exercice, mais passant au deuxième niveau (les changements de niveau d'entailage sont accentués par une trame grisée), le même arbre pourra être entaillé jusqu'à la 48^e année. À la 49^e année, cet arbre devra être mis au repos car, d'abord, il n'est pas de pratique courante d'entailler trop haut dans l'arbre, et ensuite il n'a pas atteint le diamètre voulu de 326 mm qui permettrait de recommencer un autre cycle au niveau 1. Ce diamètre voulu (D_2) est le résultat de la formule suivante :

$$D_2 = D_1 + (2 \times \text{Profondeur de l'entaille}),$$

où : D_1 = le DHP lors de la première entaille,

et il sera atteint à la 64^e année (non illustré au tableau 1).

Toutefois, si on utilise un chalumeau qui demande une entaille plus petite, soit 7,9 mm (utilisé ici pour la démonstration), on constate que le même arbre pourra être exploité pendant 25 ans avant qu'on doive changer de niveau. Le deuxième niveau pourra être exploité de la 26^e à la 67^e année (non illustré au tableau 1). À la 68^e année, on pourra immédiatement reprendre son exploitation au premier niveau, sans délai d'attente, puisque son diamètre (D_2) sera alors de 336 mm (vs 326 mm vu comme minimum).

Tableau 1. Régie d'exploitation d'un érable entaillé pour la première fois à 20 cm de DHP avec une croissance radiale de 1 mm par année

		Diamètre de l'entaille (mm)					
		11			7,9		
Année	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage
1	200	23	23	1	18	18	1
2	202	22	45	1	18	36	1
3	204	22	67	1	17	53	1
4	206	21	88	1	17	70	1
5	208	21	109	1	17	87	1
6	210	20	129	1	16	103	1
7	212	20	149	1	16	119	1
8	214	19	168	1	15	134	1
9	216	19	187	1	15	149	1
10	218	19	206	1	15	164	1
11	220	18	224	1	14	178	1
12	222	18	242	1	14	193	1
13	224	17	259	1	14	206	1
14	226	17	276	1	14	220	1
15	228	17	293	1	13	233	1
16	230	16	309	1	13	246	1
17	232	16	325	1	13	259	1
18	234	16	341	1	13	272	1
19	236	16	357	1	12	284	1
20	238	15	15	2	12	296	1
21	240	15	30	2	12	308	1
22	242	15	45	2	12	320	1
23	244	14	59	2	12	331	1
24	246	14	74	2	11	343	1
25	248	14	88	2	11	354	1
26	250	14	102	2	11	11	2
27	252	14	115	2	11	22	2
28	254	13	128	2	11	32	2
29	256	13	142	2	10	43	2
30	258	13	155	2	10	53	2
31	260	13	167	2	10	63	2
32	262	13	180	2	10	73	2
33	264	12	192	2	10	83	2
34	266	12	205	2	10	93	2
35	268	12	217	2	10	102	2
36	270	12	229	2	9	112	2
37	272	12	240	2	9	121	2
38	274	12	252	2	9	130	2
39	276	11	263	2	9	139	2
40	278	11	275	2	9	148	2
41	280	11	286	2	9	157	2
42	282	11	297	2	9	166	2
43	284	11	308	2	9	175	2
44	286	11	318	2	9	183	2
45	288	11	329	2	8	192	2
46	290	10	339	2	8	200	2
47	292	10	350	2	8	208	2
48	294	10	360	2	8	216	2
49	296	10		0	8	224	2
50	298	10		0	8	232	2

L'utilisation de chalumeaux de petit diamètre permet de rallonger la période d'exploitabilité, mais l'augmentation du taux de croissance a des effets encore plus intéressants. Avec des valeurs 1, 1,5 et 2 mm par année en croissance radiale, nous dressons le tableau 2 où seulement le chalumeau de petit diamètre (7,9 mm) est utilisé. Il est vraisemblable que sur une longue période, la croissance ne sera pas régulière, étant affectée par divers événements perturbateurs naturels comme des épidémies d'insectes ou du dépérissement (Auclair, 2005). Duchesne *et al.* (2003) ont d'ailleurs démontré que le dépérissement observé était précédé d'une diminution de la croissance en surface terrière. Toutefois, pour des fins de démonstration, nous écartons ces baisses de croissance, malgré qu'elles ne manqueront pas de se produire. Avec une croissance radiale de 1 mm/an, un arbre ayant un DHP de 20 cm au premier entaillage pourra être entaillé pendant 25 ans avant qu'on doive changer de niveau. Pour une croissance de 1,5 mm/an, cette durée est portée à 29 ans et pour 2 mm/an, on aura exploité toute la circonférence du tronc au premier niveau après 33 ans. Pour l'arbre croissant à 1 mm/an, l'exploitation au deuxième niveau se fera de la 26^e jusqu'à la 67^e année. À la 68^e année, on pourra revenir au premier niveau sans délai d'attente comme dans le cas présenté au tableau 1 avec un chalumeau de 11 mm de diamètre, puisque le DHP seuil de 326 mm aura été dépassé. Cette situation est encore améliorée pour les deux autres (meilleurs) taux de croissance. Après 100 ans, l'arbre croissant à 1 mm/an atteindra le diamètre de 40 cm. Or, à un tel diamètre, les normes en vigueur (Gouvernement du Québec, 2004) permettent l'ajout d'une deuxième entaille. Ce faisant, la valeur de l'angle « α » est doublée pour tenir compte de cette deuxième entaille et le cycle continue ainsi, ce qui s'applique aussi pour les deux autres taux de croissance. Ces seuils sont accentués avec des caractères gras au tableau 2.

Tableau 2. Régie d'exploitation d'un érable entaillé pour la première fois à 20 cm de DHP avec quelques caractéristiques de croissance et un diamètre d'entaillage de 7,9 mm

Année	Croissance radiale (mm/an)											
	1,0				1,5				2,0			
	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage
1	200	18	18	1	200	18	18	1	200	18	18	1
2	202	18	36	1	203	18	36	1	204	17	36	1
3	204	17	53	1	206	17	53	1	208	17	52	1
4	206	17	70	1	209	16	69	1	212	16	68	1
5	208	17	87	1	212	16	85	1	216	15	83	1
6	210	16	103	1	215	15	100	1	220	14	97	1
7	212	16	119	1	218	15	115	1	224	14	111	1
8	214	15	134	1	221	14	129	1	228	13	125	1
9	216	15	149	1	224	14	143	1	232	13	137	1
10	218	15	164	1	227	13	156	1	236	12	150	1
11	220	14	178	1	230	13	169	1	240	12	162	1
12	222	14	193	1	233	13	182	1	244	12	173	1
13	224	14	206	1	236	12	194	1	248	11	184	1
14	226	14	220	1	239	12	206	1	252	11	195	1
15	228	13	233	1	242	12	218	1	256	10	206	1
16	230	13	246	1	245	11	230	1	260	10	216	1
17	232	13	259	1	248	11	241	1	264	10	226	1
18	234	13	272	1	251	11	252	1	268	10	235	1
19	236	12	284	1	254	11	262	1	272	9	244	1
20	238	12	296	1	257	10	273	1	276	9	254	1
21	240	12	308	1	260	10	283	1	280	9	262	1
22	242	12	320	1	263	10	293	1	284	9	271	1
23	244	12	331	1	266	10	302	1	288	8	279	1
24	246	11	343	1	269	10	312	1	292	8	288	1
25	248	11	354	1	272	9	321	1	296	8	296	1
26	250	11	11	2	275	9	330	1	300	8	303	1
27	252	11	22	2	278	9	339	1	304	8	311	1
28	254	11	32	2	281	9	348	1	308	7	319	1
29	256	10	43	2	284	9	357	1	312	7	326	1
30	258	10	53	2	287	8	8	2	316	7	333	1
31	260	10	63	2	290	8	17	2	320	7	340	1
32	262	10	73	2	293	8	25	2	324	7	347	1
33	264	10	83	2	296	8	33	2	328	7	354	1
34	266	10	93	2	299	8	41	2	332	7	7	2
35	268	10	102	2	302	8	49	2	336	6	13	2
36	270	9	112	2	305	8	56	2	340	6	19	2
37	272	9	121	2	308	7	64	2	344	6	26	2
38	274	9	130	2	311	7	71	2	348	6	32	2
39	276	9	139	2	314	7	78	2	352	6	38	2
40	278	9	148	2	317	7	85	2	356	6	44	2
41	280	9	157	2	320	7	92	2	360	6	50	2
42	282	9	166	2	323	7	99	2	364	6	55	2
43	284	9	175	2	326	7	106	2	368	6	61	2
44	286	9	183	2	329	7	113	2	372	6	67	2
45	288	8	192	2	332	7	119	2	376	5	72	2
46	290	8	200	2	335	7	126	2	380	5	77	2
47	292	8	208	2	338	6	132	2	384	5	83	2
48	294	8	216	2	341	6	139	2	388	5	88	2
49	296	8	224	2	344	6	145	2	392	5	93	2
50	298	8	232	2	347	6	151	2	396	5	98	2
51	300	8	240	2	350	6	157	2	400	10	108	2

Année	Croissance radiale (mm/an)											
	1,0				1,5				2,0			
	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage
52	302	8	248	2	353	6	163	2	404	10	118	2
53	304	8	255	2	356	6	169	2	408	10	127	2
54	306	8	263	2	359	6	175	2	412	10	137	2
55	308	7	270	2	362	6	181	2	416	9	146	2
56	310	7	278	2	365	6	186	2	420	9	156	2
57	312	7	285	2	368	6	192	2	424	9	165	2
58	314	7	292	2	371	6	198	2	428	9	174	2
59	316	7	299	2	374	5	203	2	432	9	183	2
60	318	7	307	2	377	5	209	2	436	9	191	2
61	320	7	314	2	380	5	214	2	440	9	200	2
62	322	7	320	2	383	5	219	2	444	9	209	2
63	324	7	327	2	386	5	224	2	448	8	217	2
64	326	7	334	2	389	5	230	2	452	8	226	2
65	328	7	341	2	392	5	235	2	456	8	234	2
66	330	7	348	2	395	5	240	2	460	8	242	2
67	332	7	354	2	398	5	245	2	464	8	250	2
68	334	7	7	1	401	10	255	2	468	8	258	2
69	336	6	13	1	404	10	265	2	472	8	266	2
70	338	6	19	1	407	10	274	2	476	8	274	2
71	340	6	26	1	410	10	284	2	480	8	281	2
72	342	6	32	1	413	9	293	2	484	8	289	2
73	344	6	38	1	416	9	303	2	488	8	297	2
74	346	6	45	1	419	9	312	2	492	7	304	2
75	348	6	51	1	422	9	321	2	496	7	311	2
76	350	6	57	1	425	9	330	2	500	7	319	2
77	352	6	63	1	428	9	339	2	504	7	326	2
78	354	6	69	1	431	9	348	2	508	7	333	2
79	356	6	75	1	434	9	357	2	512	7	340	2
80	358	6	81	1	437	9	9	1	516	7	347	2
81	360	6	86	1	440	9	17	1	520	7	354	2
82	362	6	92	1	443	9	26	1	524	7	7	1
83	364	6	98	1	446	9	35	1	528	7	14	1
84	366	6	104	1	449	8	43	1	532	7	20	1
85	368	6	109	1	452	8	51	1	536	7	27	1
86	370	6	115	1	455	8	60	1	540	7	34	1
87	372	6	120	1	458	8	68	1	544	7	40	1
88	374	5	126	1	461	8	76	1	548	6	47	1
89	376	5	131	1	464	8	84	1	552	6	53	1
90	378	5	137	1	467	8	92	1	556	6	59	1
91	380	5	142	1	470	8	100	1	560	6	66	1
92	382	5	147	1	473	8	108	1	564	6	72	1
93	384	5	153	1	476	8	116	1	568	6	78	1
94	386	5	158	1	479	8	123	1	572	6	84	1
95	388	5	163	1	482	8	131	1	576	6	90	1
96	390	5	168	1	485	8	139	1	580	6	96	1
97	392	5	173	1	488	8	146	1	584	6	102	1
98	394	5	178	1	491	7	154	1	588	6	108	1
99	396	5	184	1	494	7	161	1	592	6	114	1
100	398	5	189	1	497	7	168	1	596	6	120	1
101	400	10	198	1	500	7	176	1	600	9	128	1
102	402	10	208	1	503	7	183	1	604	9	137	1
103	404	10	218	1	506	7	190	1	608	8	145	1
104	406	10	228	1	509	7	197	1	612	8	154	1
105	408	10	238	1	512	7	204	1	616	8	162	1

Année	Croissance radiale (mm/an)											
	1,0				1,5				2,0			
	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage	DHP (mm)	Angle α (°)	Angles α cumulés (°)	Niveau d'entaillage
106	410	10	247	1	515	7	211	1	620	8	170	1
107	412	10	257	1	518	7	218	1	624	8	179	1
108	414	9	266	1	521	7	225	1	628	8	187	1
109	416	9	276	1	524	7	232	1	632	8	195	1
110	418	9	285	1	527	7	239	1	636	8	203	1
111	420	9	294	1	530	7	246	1	640	8	211	1
112	422	9	303	1	533	7	252	1	644	8	219	1
113	424	9	313	1	536	7	259	1	648	8	227	1
114	426	9	322	1	539	7	265	1	652	8	234	1
115	428	9	331	1	542	7	272	1	656	8	242	1
116	430	9	340	1	545	7	279	1	660	8	250	1
117	432	9	349	1	548	6	285	1	664	8	257	1
118	434	9	357	1	551	6	291	1	668	8	265	1
119	436	9	9	2	554	6	298	1	672	7	272	1
120	438	9	18	2	557	6	304	1	676	7	280	1
121	440	9	26	2	560	6	310	1	680	7	287	1
122	442	9	35	2	563	6	317	1	684	7	294	1
123	444	9	43	2	566	6	323	1	688	7	302	1
124	446	9	52	2	569	6	329	1	692	7	309	1
125	448	8	60	2	572	6	335	1	696	7	316	1
126	450	8	69	2	575	6	341	1	700	7	323	1
127	452	8	77	2	578	6	347	1	704	7	330	1
128	454	8	85	2	581	6	353	1	708	7	337	1
129	456	8	94	2	584	6	359	1	712	7	344	1
130	458	8	102	2	587	6	6	2	716	7	351	1
131	460	8	110	2	590	6	12	2	720	7	358	1
132	462	8	118	2	593	6	18	2	724	7	7	2
133	464	8	126	2	596	6	23	2	728	7	14	2
134	466	8	134	2	599	6	29	2	732	7	20	2
135	468	8	142	2	602	9	38	2	736	7	27	2
136	470	8	150	2	605	9	46	2	740	7	34	2
137	472	8	158	2	608	8	55	2	744	7	40	2
138	474	8	166	2	611	8	63	2	748	7	47	2
139	476	8	174	2	614	8	72	2	752	7	53	2
140	478	8	181	2	617	8	80	2	756	6	60	2
141	480	8	189	2	620	8	88	2	760	6	66	2
142	482	8	197	2	623	8	96	2	764	6	73	2
143	484	8	204	2	626	8	105	2	768	6	79	2
144	486	8	212	2	629	8	113	2	772	6	86	2
145	488	8	220	2	632	8	121	2	776	6	92	2
146	490	7	227	2	635	8	129	2	780	6	98	2
147	492	7	234	2	638	8	137	2	784	6	104	2
148	494	7	242	2	641	8	145	2	788	6	110	2
149	496	7	249	2	644	8	153	2	792	6	117	2
150	498	7	257	2	647	8	161	2	796	6	123	2

La situation que nous venons de présenter est idéale et n'est probablement jamais rencontrée dans les faits. D'une année à l'autre, les producteurs acéricoles ne font pas leurs entailles rigoureusement à la même hauteur, ni n'appliquent une progression logique pour faire le tour du tronc. Ils s'inspirent plutôt des blessures encore visibles et sont contraints d'entailler à la hauteur rendue disponible par la couverture de neige, ce qui fait que les niveaux d'entailage un et deux sont confondus. Ils sont aussi limités dans leurs choix de positionnement d'entaille par la disposition du matériel de récolte, ce qui fait que ce n'est pas toute la circonférence d'un tronc qui est accessible. De plus, nous négligeons les éventuelles fusions qui pourraient se développer entre le bois coloré des diverses entailles, ce qui augmenterait le problème. Force est donc de constater que tôt ou tard, des entailles seront nécessairement faites, en tout ou en partie, dans du bois coloré, ce qui réduira obligatoirement la production. Pour revenir entailler à nouveau exactement vis-à-vis la première entaille, il faut que l'arbre ait accumulé assez de nouveau bois dont l'épaisseur égalera la profondeur de l'entaille.

Le tableau 3 présente le nombre d'années pendant lequel un arbre de 20 cm de DHP initial peut être entaillé sous diverses conditions avant que toute sa circonférence ait été exploitée. On voit que le compartimentage complet est le résultat de trois variables, soit deux reliées aux pratiques d'entailage elles-mêmes et une qui est reliée au taux de croissance. Les pratiques actuelles favorisent l'utilisation de petits chalumeaux (diamètre de 7,9 mm). Ainsi, si on compare les profondeurs d'entailage et les croissances annuelles, on voit qu'on peut plus allonger la vie utile d'un arbre en ayant une meilleure croissance diamétrale qu'en réduisant la profondeur de l'entaille. Pour un diamètre d'entailage de 7,9 mm, les arbres croissant à 2 mm par année seront exploitables 12 années de plus que ceux croissant à 1 mm par année s'ils sont entaillés à 50 mm de profondeur, alors que cette différence ne sera que de 8 années s'ils sont entaillés à 63 mm de profondeur.

Tableau 3. Nombre d'années pendant lequel un arbre de 20 cm de DHP initial peut être entaillé sous diverses conditions avant que toute sa circonférence ait été exploitée

Variables								
Diamètre de l'entaille (mm)	7,9				11,0			
Profondeur de l'entaille (cm)	63		50		63		50	
Croissance radiale annuelle (mm/an)	1	2	1	2	1	2	1	2
Nombre d'années	25	33	34	46	19	23	25	32
Différence d'années	8		12		4		7	

Le taux de croissance des arbres semble donc être plus déterminant que les autres variables pour contrer le compartimentage. On sait cependant que la croissance des arbres varie selon les différentes régions (écologiques) et la densité des peuplements (Gouvernement du Québec, 1999). Il est aussi probable que le type de dépôt ait quelque chose à voir avec la croissance. C'est donc dans cette optique que nous avons mené de projet. Afin d'avoir des données de croissance qui reflètent le plus possible la réalité, nous avons utilisé les données des parcelles échantillons permanentes du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) pour en venir à proposer une régie d'entailage qui tiendra compte des particularités régionales et écologiques facilement identifiables sur les cartes écoforestières disponibles. La Direction des inventaires forestiers (DIF) du MRNF gère une banque de données des depuis près de 40 ans. Cette banque a été utilisée pour calculer les taux de croissance des érables à sucre selon divers paramètres.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Nous avons extrait les données des parcelles échantillons permanentes situées dans les régions écologiques 1a, 2b, 2c, 3d et 4f (Saucier *et al.*, 1998). Nous avons décelé et corrigé les informations incohérentes. L'examen des données a révélé que certains accroissements n'étaient pas calculables entre deux périodes. C'est le cas notamment lorsque la deuxième mesure de DHP est plus petite que la première ou lorsque l'arbre a une inscription indiquant que deux DHP successifs ne sont pas comparables. Cette situation résulte généralement d'une observation de l'estimateur qui déclare que la mesure au temps « *t* » n'a pas été prise au même endroit que celle au temps « *t-1* ». Pour tous les autres cas où les mesures sont comparables, nous avons calculé des accroissements annuels.

Puisque deux inventaires successifs ne sont pas faits exactement à la même date du calendrier et que la croissance est limitée à une courte période de l'année, le calcul du temps écoulé ne peut pas être la simple soustraction entre les deux dates d'inventaires. Nous avons considéré que la saison de croissance s'étalait du 1^{er} juin au 31 juillet, constituant donc une période de 61 jours (Fédération des producteurs de bois du Québec et Ministère des Ressources naturelles du Québec, 1995). Le nombre de saisons de croissance (NSC) est un résultat fractionnaire résultant de la formule suivante :

$$NSC = \text{Année2} - \text{Année1} + AP$$

AP = année partielle (positive ou négative)
et sa valeur est calculée avec la formule suivante :

$$AP = (JC2 - JC1)/61$$

où :

JC2 = Jour de croissance de l'année 2 et

JC1 = Jour de croissance de l'année 1.

Les valeurs JC1 et JC2 sont extraites du tableau 4.

Tableau 4. Nombre de jours de croissance écoulés dans une année selon la date où l'inventaire a été fait

Jour de calendrier	Jour de croissance
1 ^{er} janvier au 31 mai	0
1 ^{er} juin	1
2 juin	2
...	...
31 juillet	61
1 ^{er} août au 31 décembre	61

Cette approche a été supportée par des représentants du ministère des Ressources naturelles et de la Faune lors de deux rencontres *ad hoc* où quelques résultats préliminaires de ce projet ont été présentés (Grenier, 2008a; 2008b).

Les fichiers des parcelles permanentes obtenus de la Direction des inventaires forestiers concernant les dix sous-régions écologiques retenues contenaient 182 016 enregistrements d'arbres numérotés et 1611 enregistrements de parcelles avec un ou plusieurs inventaires. Des requêtes pour interroger cette banque de données avec « Er » comme critère de strate dans les tables de peuplements observés ou cartographiés ont donné 729 parcelles différentes. Ce ne sont toutefois pas toutes ces parcelles qui pouvaient être retenues. De ce nombre, 390 avaient peu ou aucun érables à sucre, 22 avaient subi une coupe totale après le premier inventaire et 52 ont été écartées parce qu'elles n'avaient qu'un seul inventaire. Il restait donc 265 parcelles utilisables dans cette étude (Tableau 5).

Nous avons extrait tous les enregistrements d'arbres numérotés de ces 265 parcelles, ce qui a généré un fichier contenant 9410 enregistrements. Nous avons supprimé tous les enregistrements de gaules, ceux présentant des tiges mortes lors du premier inventaire et les tiges « intrus » lors d'un inventaire quelconque de la série. Le nombre d'enregistrements retenus comptait alors 8346 lignes. Nous avons finalement retranché les 3739 arbres qui ne sont pas des érables à sucre, ce qui laisse 4607 enregistrements d'érables à sucre.

Ces 4607 lignes peuvent contenir de l'information pour des arbres ayant fait l'objet de deux à cinq inventaires. Les accroissements sont calculables sur des paires de données, soit DHP2-DHP1, DHP3-DHP2, etc. Il est parfois impossible de calculer un accroissement. Cette situation survient lorsque qu'une mesure de DHP (2 à 5) est accompagnée d'une note indiquant que ce DHP n'est pas comparable au DHP précédent, lorsque l'arbre est mort ou coupé, lorsque l'arbre est une recrue au dernier inventaire ou toute combinaison de ces conditions. Il y avait donc 820 lignes sur lesquelles on ne pouvait calculer aucune croissance, laissant donc 3787 lignes totalisant 6930 paires de données sur lesquelles les accroissements en diamètre peuvent être calculés.

Les valeurs « $DHP_i - DHP_{i-1}$ » donnent l'accroissement en diamètre entre deux inventaires pour un même arbre. On divise ces valeurs par le nombre de saison de croissance et on obtient la croissance annuelle moyenne en diamètre pour chaque paire d'observations. Pour chaque arbre, on calcule ensuite son accroissement diamétral annuel pondéré par le nombre d'années où les accroissements annuels sont calculables. Nous avons ensuite examiné le fichier des 3787 érables à sucre pour rechercher les valeurs d'accroissement diamétral annuel pondéré qui pourraient être à l'extérieur du nuage de points avec comme critère ceux s'écartant de plus ou moins trois écarts types de la moyenne. Cinquante-six arbres rencontraient ces conditions. Nous avons examiné ces données et avons enlevé les valeurs des accroissements périodiques qui, eux aussi, étaient supérieurs ou inférieurs à trois écarts-types de leurs moyennes périodiques. Cet exercice a complètement éliminé 23 arbres et les valeurs d'accroissement diamétral annuel pondéré des 33 autres arbres ont été ajustées pour tenir compte des accroissements périodiques non retenus. Cet exercice a été fait une seule fois et le fichier final contient 3764 lignes totalisant 6868 paires de données sur lesquelles les statistiques sur les accroissements en diamètre peuvent être calculées (Tableau 5).

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'examen du tableau 5 permet de constater d'emblée que certains dépôts sont peu représentés (3AN, 8 paires; 6SY, 10 paires), alors que d'autres le sont beaucoup (1A, 2040 paires; 1AM, 2639 paires). De plus, comme nous voulions faire des combinaisons impliquant les densités des parcelles, le nombre de combinaisons aurait pu devenir démesuré, alors que le nombre d'observations pour ces combinaisons aurait pu devenir petit. Devant cet état de fait, nous avons décidé de faire des grands groupes de dépôts en prévision qu'il serait difficile de faire des statistiques valables sur des groupes contenant peu d'observations. De tous ces dépôts, nous n'avons donc retenu que le « nombre » comme identifiant (Tableau 6; grand groupe de dépôt).

La densité d'un peuplement peut varier au fil du temps et peut être différente d'un inventaire à l'autre. Comme nous avons choisi d'utiliser les accroissements pondérés pour chaque arbre, il fallait en faire de même pour estimer la densité moyenne accolée à chaque arbre pendant toute la période d'observation. Afin de calculer cette densité moyenne pour une parcelle, nous avons d'abord accordé une valeur numérique à chaque classe de densité, soit 90 pour la classe « A », 70 pour la classe « B », 50 pour la classe « C », 32 pour la classe « D » et 12 lorsqu'aucune densité n'était notée pour la parcelle. Ces valeurs correspondent à la médiane des étendues établies par les Normes d'inventaire forestier (Gouvernement du Québec, 2006). Ayant maintenant une valeur numérique de densité pour un inventaire d'une parcelle donnée, nous calculons ensuite une moyenne pondérée pour chaque parcelle en fonction du temps pendant lequel cette parcelle avait la densité observée. Finalement, les densités numériques pondérées sont ramenées en classes (A, B, C et D, selon les mêmes règles que les Normes).

Tableau 5. Nombre de parcelles échantillons permanentes (PEP) et nombre de paires d'observations disponibles pour calculer les accroissements en DHP de l'érable à sucre

Sous-région écologique	Dépôt	Nombre de PEP	Nombre de paires d'observations	Sous-région écologique	Dépôt	Nombre de PEP	Nombre de paires d'observations
1a-T	1A	4	98	3d-M	1A	22	691
	1AY	7	214		1AM	9	268
	3AN	1	8		1AY	28	671
	5A	1	44		2BE	1	42
	5S	4	98		8AM	2	38
	5SY	1	21		8AY	2	39
	R1A	2	87		Total	64	1749
	Total	20	570				
2b-T	1A	4	50	3d-S	1A	6	238
	1AM	4	73		1AM	3	87
	1AY	6	138		1AY	7	215
	5A	1	26		M1A	1	14
	5S	9	159		R1A	4	177
	6S	3	117	Total	21	731	
	6SY	1	10	3d-T	1A	9	281
	8AM	1	8		1AM	3	60
	M1A	1	58		1AY	8	224
	R1A	2	73		8AY	1	27
	R6S	2	27		Total	21	592
	Total	34	739				
2c-T	1A	15	446	4f-M	1A	7	76
	1AM	3	72		1AY	22	495
	1AY	13	413		8A	3	20
	M1A	1	38	8AY	1	49	
	R1A	1	28	Total	33	640	
	Total	33	997	4f-S	8A	1	34
			Total		1	34	
3c-T	1AM	1	74	4f-T	1A	10	160
	Total	1	74		1AM	2	87
			1AY		15	269	
			8A		6	151	
			8AY		4	75	
			Total		37	742	
			TOUTES	TOTAL	265	6868	

On peut regrouper les résultats pour calculer des moyennes selon la stratification retenue. Ces résultats sont présentés de façon brute au tableau 6.

Tableau 6. Moyennes des croissances diamétrales annuelles pondérées (mm) de l'érable à sucre selon différentes stratifications

Sous-région écologique	Nombre d'arbres	Accroissement diamétral annuel moyen pondéré (mm)	Grand groupe de dépôt	Nombre d'arbres	Accroissement diamétral annuel moyen pondéré (mm)	Classe de densité	Nombre d'arbres	Accroissement diamétral annuel moyen pondéré (mm)
1a-T	268	2,24	1	185	2,02	A	35	2,38
						B	150	1,93
			3	8	5,60	C	8	5,60
			5	75	2,45	A	25	2,78
						B	50	2,28
2b-T	429	2,02	1	228	1,95	A	115	2,06
						B	90	1,83
						C	23	1,90
			5	119	2,14	A	70	1,99
						B	49	2,36
			6	74	2,15	A	52	1,95
						B	8	1,18
						C	14	3,43
8	8	1,09	B	8	1,09			
2c-T	485	2,69	1	485	2,69	A	284	2,70
						B	148	2,48
						C	53	3,17
3c-T	31	1,55	1	31	1,55	B	31	1,55
3d-M	896	2,45	1	837	2,42	A	262	2,47
						B	411	2,35
						C	164	2,53
			2	20	2,45	B	20	2,45
			8	39	2,92	B	28	2,81
						C	11	3,22
3d-S	386	2,54	1	386	2,54	A	68	2,10
						B	274	2,56
						C	44	3,05
3d-T	283	2,81	1	274	2,81	A	75	2,07
						B	140	2,89
						C	59	3,55
			8	9	2,73	A	9	2,73
4f-M	432	2,70	1	388	2,70	A	139	2,16
						B	171	2,56
						C	74	3,97
						D	4	3,89
			8	44	2,73	A	35	2,51
			C	9	3,55			
4f-S	18	3,70	8	18	3,70	C	18	3,70
4fT	536	2,51	1	334	2,53	A	33	2,85
						B	254	2,33
						C	47	3,41
			8	202	2,46	A	152	2,59
						B	50	2,09
TOUTES	3764	2,49						

Nous avons traité les données avec la procédure GLIMMIX du logiciel SAS afin de vérifier l'homogénéité de la variance. La figure 4 présente les résultats des résidus normalisés de cette première analyse de variance. La partie « A » présente un effet d'entonnoir qui suggère une variance non constante. Plusieurs bâtonnets de la partie « B » n'atteignent pas ou dépassent la courbe normale superposée. Le mauvais alignement des points de la partie « C » sur la diagonale et la présence de valeurs extrêmes à la partie « D » témoignent que les résidus ne sont pas distribués normalement. Cela nous a incités à transformer la variable dépendante selon des procédures habituellement employées. Parmi les transformations essayées, nous avons retenu la racine carrée de l'accroissement diamétral annuel pondéré + 1. Cet ajout de « + 1 » était pour éviter les cas où des valeurs brutes inférieures à 1 se traduiraient par des valeurs de racine carrée supérieures aux valeurs initiales.

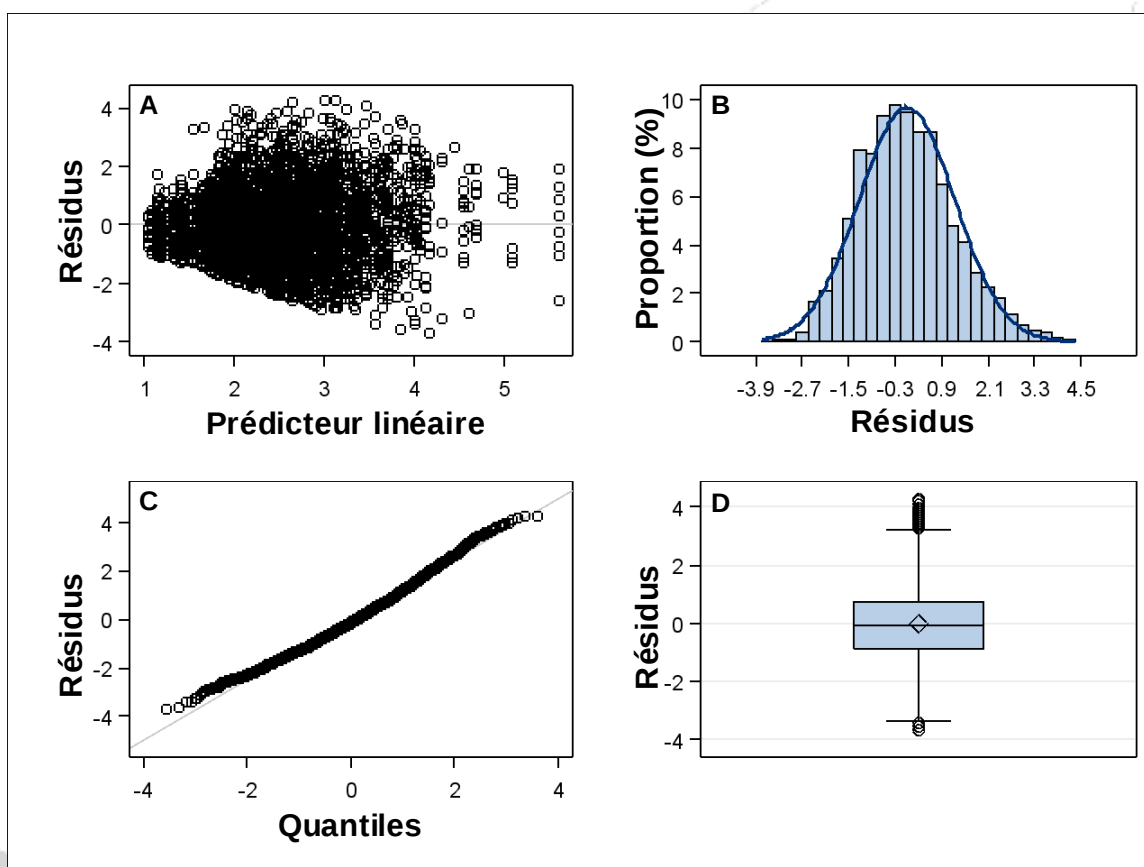


Figure 4. Résidus de l'analyse de variance effectuée sur la variable « Accroissement diamétral annuel pondéré »

La figure 5 présente les résultats des résidus de cette analyse de variance sur la variable transformée. On y constate que les résidus sont maintenant mieux ajustés sur une distribution normale. L'effet d'entonnoir est amenuisé (A), la plupart des bâtonnets touchent la courbe normale (B) et les valeurs extrêmes sont disparues (D). Quoiqu'imparfaite, la transformation effectuée est celle qui a donné les meilleurs résultats et c'est pourquoi nous l'avons retenue. Nous avons ensuite recalculé les valeurs ajustées des croissances diamétrales annuelles pondérées, dont les résultats sont présentés aux tableaux 7 et 8.

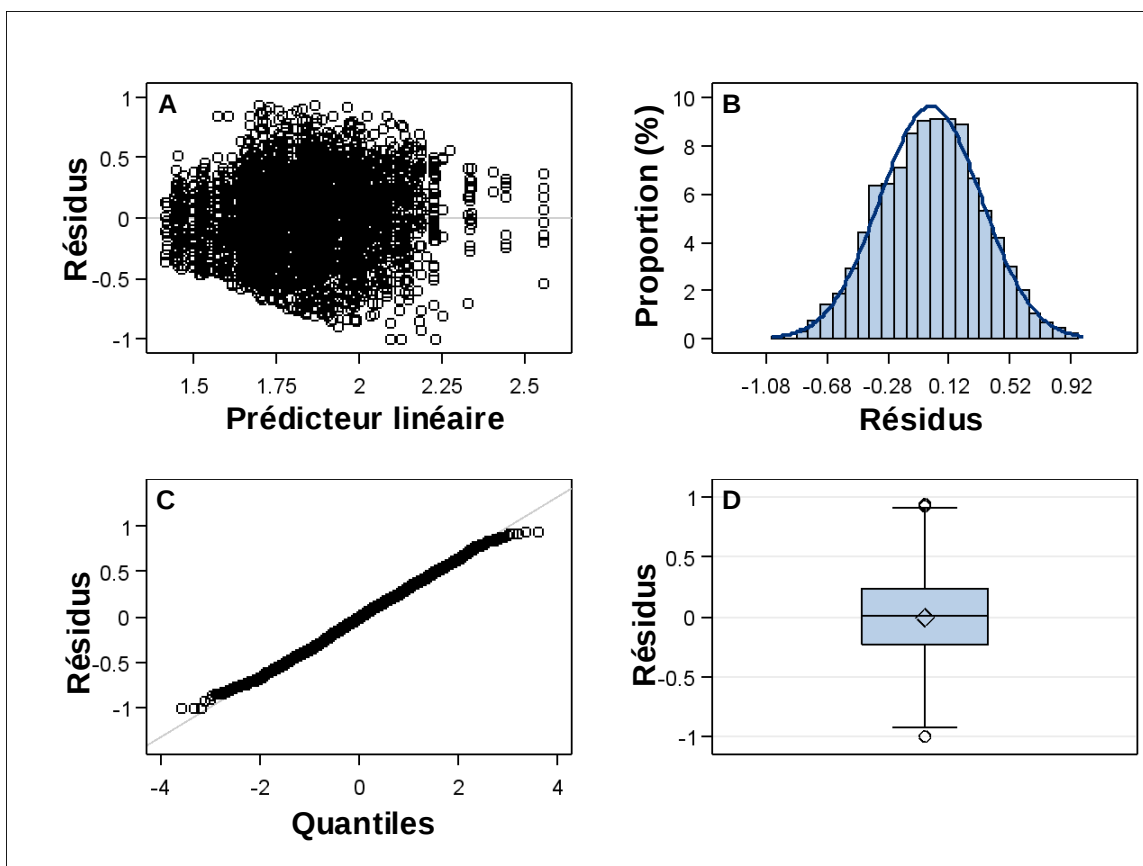


Figure 5. Résidus de l'analyse de variance effectuée sur la variable « Racine carrée de l'accroissement diamétral annuel pondéré + 1 »

Tableau 7. Valeurs ajustées des croissances diamétrales annuelles pondérées (mm) de l'érable à sucre par sous-région écologique

Sous-région écologique	Fréquence	Borne inférieure	Moyenne	Borne supérieure
1a-T	268	2,459	2,925 a [†]	3,421
2b-T	429	1,623	1,930 b	2,255
2c-T	485	2,475	2,773 a	3,083
3c-T	31	0,521	1,575 ab	2,922
3d-M	896	2,243	2,635 ab	3,050
3d-S	386	2,147	2,544 ab	2,966
3d-T	283	2,351	2,831 ab	3,345
4f-M	432	2,661	3,118 a	3,603
4f-S	18	2,182	3,726 ab	5,584
4f-T	536	2,443	2,779 a	3,132

[†] Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($p = 0,05$)

Tableau 8. Valeurs ajustées des croissances diamétrales annuelles pondérées (mm) de l'érable à sucre pour les combinaisons de dépôt et de densité par sous-région écologique

Sous-région écol.	Grand groupe de dépôt	Classe de densité	Fréquence	Borne inférieure	Moyenne	Borne supérieure
1a-T	1	A	35	1,649	2,390 a	3,226
		B	150	1,589	2,033 a	2,514
	3	C	8	3,620	5,645 bc	8,045
		A	25	1,764	2,790 ac	3,984
		B	50	1,554	2,243 a	3,017
2b-T	1	A	115	1,445	1,944 a	2,491
		B	90	1,344	1,845 a	2,396
		C	23	1,238	2,041 a	2,972
	5	A	70	1,370	1,954 a	2,605
		B	49	1,662	2,329 a	3,073
	6	A	52	0,953	1,662 a	2,487
		B	8	0,173	1,251 a	2,703
		C	14	2,236	3,451 a	4,864
	8	B	8	0,128	1,187 a	2,620
2c-T	1	A	284	2,402	2,792 a	3,203
		B	148	2,108	2,537 a	2,995
		C	53	2,329	2,997 a	3,727
3c-T	1	B	31	0,521	1,575	2,922
3d-M	1	A	262	2,126	2,490 a	2,875
		B	411	2,113	2,385 a	2,669
		C	164	2,153	2,562 a	2,998
	2	B	20	1,173	2,454 a	4,045
		B	28	1,937	2,826 a	3,836
3d-S	1	C	11	1,628	3,117 a	4,951
		A	68	1,391	2,033 a	2,755
		B	274	2,231	2,617 a	3,025
3d-T	1	C	44	2,118	3,019 a	4,037
		A	75	1,573	2,192 a	2,880
		B	140	2,403	2,910 ac	3,453
	8	C	59	2,795	3,509 bc	4,287
		A	9	1,327	2,774 ac	4,585
4f-M	1	A	139	1,574	2,105 a	2,687
		B	171	2,153	2,576 a	3,027
		C	74	3,441	4,063 bc	4,727
		D	4	2,039	3,967 ac	6,382
	8	A	35	1,677	2,665 ac	3,813
4f-S	8	C	9	2,225	3,540 ac	5,087
		C	18	2,182	3,726	5,584
4f-T	1	A	33	2,106	3,000 a	4,012
		B	254	2,097	2,452 a	2,828
		C	47	2,831	3,561 a	4,356
	8	A	152	2,178	2,693 a	3,249
		B	50	1,331	2,259 a	3,350

† Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($p = 0,05$) à l'intérieur d'une sous-région écologique

Les sous-régions 3c-T et 4f-S sont peu représentées avec 31 et 18 observations seulement et chacune ne présente qu'une seule classe de densité. L'examen des tableaux 6 et 8 montre que la très grande majorité des données concernent les peuplements de classes de densité A et B avec respectivement 36 et 50% de représentativité, alors que les peuplements de classes de densité C et D ne regroupent que 14% des données. Vu la faible représentativité des peuplements clairs, et admettant qu'ils ne seraient pas intéressants pour l'acériculture, nous les écartons pour la suite de notre travail. Nous écartons aussi les sous-régions 3c-T et 4f-S vu leur faible représentativité.

L'examen du tableau 8 permet de constater qu'il n'y a pas de différences significatives entre les moyennes des croissances diamétrales ajustées à l'intérieur d'une même sous-région écologique pour les combinaisons dépôt-densité. Il y a toutefois des exceptions pour les sous-régions 1a-T, 3d-T et 4f-M. Ces exceptions concernent des combinaisons où les densités des peuplements sont faibles (C ou D). Vu la faible représentativité des peuplements clairs, et admettant qu'ils ne seraient pas intéressants pour l'acériculture, nous les écartons pour la suite de notre travail. D'emblée on peut affirmer qu'il ne vaut pas la peine de stratifier autant les groupes, puisque, généralement, les différences ne sont pas significatives à l'intérieur des sous-régions écologiques.

Nous proposons donc de ne retenir que les accroissements par sous-région écologique (Tableau 7). Avec les valeurs de croissance retenues, nous pouvons reprendre les simulations que nous avons présentées dans la demande de subvention de ce projet.

3.1 SIMULATIONS FAITES AVEC LES DONNÉES DE CROISSANCE PAR SOUS-RÉGION ÉCOLOGIQUE

Nous avons repris la même méthode que celle exposée dans la section « Problématique » pour procéder à diverses simulations. Dans tous les cas, nous avons utilisé une profondeur et un diamètre d'entaillage de 6,3 cm et 7,9 mm respectivement et les croissances radiales présentées au tableau 7, divisée par deux. La division par deux est requise puisque les simulations sont faites avec des croissances radiales, alors que les données du tableau 7 en sont de croissance diamétrale. Nous posons aussi l'hypothèse que les érables à sucre sont entaillés à un seul niveau, ou une seule hauteur. Également, même lorsque les érables ont dépassé les seuils de 40 et 60 cm, nous ne leur faisons qu'une seule entaille. Nous avons limité les simulations à la classe de 30 cm parce que les tendances observables se manifestent déjà et que les effectifs dans les classes supérieures ne sont pas nombreux. Nous avons projeté les simulations sur une période de 150 ans en conservant le même taux de croissance tout au long de la période.

Le tableau 9 présente le nombre d'années qui s'écouleront pour les arbres de chaque classe de diamètre et dans chaque région écologique avant qu'ils soient complètement compartimentés à un niveau donné. Comme la sous-région 3c-T est celle où la croissance est la plus petite, il est normal que ce soit celle dans laquelle le compartimentage complet se produise le plus rapidement. La sous-région 4f-S présente la situation contraire puisqu'elle affiche la meilleure croissance. Quelque soit la sous-région écologique, on remarque que la durée d'exploitation avant le compartimentage complet est plutôt courte pour les arbres de 20 cm de DHP avec des valeurs qui sont même plus petites que la durée normale de la carrière d'une personne (< 30 ans). Les durées d'exploitation optimales s'allongent au fur et à mesure que les arbres sont initialement plus gros, mais dès maintenant on peut penser qu'une personne qui acquerrait une érablière exploitée depuis une trentaine d'années ne pourrait pas espérer en tirer les mêmes rendements que l'exploitant précédant.

Tableau 9. Nombre d'année après le premier entaillage pendant lequel un érable à sucre peut être entaillé avant le compartimentage complet

Classe de DHP initial (cm)	Sous-région écologique									
	1a-T	2b-T	2c-T	3c-T	3d-M	3d-S	3d-T	4f-M	4f-S	4f-T
20	29	25	28	24	27	27	28	29	32	28
22	36	32	36	30	35	35	36	38	41	36
24	44	39	43	37	43	42	44	46	50	43
26	52	45	51	43	50	50	52	54	59	51
28	60	52	59	50	58	57	59	62	68	59
30	68	59	67	56	65	65	67	70	77	67

Le tableau 10 présente le DHP qui sera atteint par classe de DHP initial dans chaque sous-région écologique lorsque ces arbres seront compartimentés après le nombre d'années écoulées présenté au tableau 9. Ici encore, c'est la sous-région 3c-T qui présente les plus petits DHP lors du compartimentage complet, alors que pour la sous-région 4f-S, c'est le contraire. Une fois que la circonférence d'un tronc a été exploitée complètement, si on veut entailler à nouveau vis-à-vis de la première entaille faite « x » années auparavant, il faut que cet arbre ait accumulé une épaisseur de nouveau bois égale à la profondeur de l'entaille pratiquée. Cela se traduit par un DHP de 32,6 cm pour les arbres qui avaient 20 cm lors du premier entaillage, 34,6 cm pour ceux qui avaient 22 cm, etc. On remarque que ces seuils ne sont atteints nulle part pour les arbres des DHP initiaux de 20 et 22 cm, sauf pour la région 4f-S, et qu'ils sont atteints dans trois des dix sous-régions (1a-T, 4f-M et 4f-S) pour la classe de DHP initial de 24 cm (cases encadrées de lignes pointillées). Les arbres de n'importe laquelle classe de DHP des sous-régions 2b-T et 3c-T n'atteignent pas les dimensions permettant d'initier une seconde série d'entaillage même après avoir laissé passer les durées présentées au tableau 9.

Tableau 10. DHP (cm) atteint au terme de la première série d'entaillage ayant compartimenté toute la zone entailable et DHP requis pour initier une seconde série d'entaillage

Classe de DHP initial (cm)	Sous-région écologique										DHP pour prochaine série (cm)
	1a-T	2b-T	2c-T	3c-T	3d-M	3d-S	3d-T	4f-M	4f-S	4f-T	
20	28,2	24,6	27,5	23,6	26,9	26,6	27,6	28,7	31,6	27,5	32,6
22	32,2	28,0	31,7	26,6	31,0	30,6	31,9	33,5	36,9	31,7	34,6
24	36,6	31,3	35,6	29,7	35,1	34,4	36,2	38,0	42,3	35,6	36,6
26	40,9	34,5	39,9	32,6	38,9	38,5	40,4	42,5	47,6	39,9	38,6
28	45,3	37,8	44,1	35,7	43,0	42,2	44,4	47,0	53,0	44,1	40,6
30	49,6	41,2	48,3	38,7	46,9	46,3	48,7	51,5	58,3	48,3	42,6

Il arrive donc qu'une première série d'entailles puisse épuiser complètement son niveau d'entaillage, de sorte que toute entaille pratiquée ensuite sera nécessairement faite dans du bois compartimenté. Si on veut s'assurer d'entailler dans du bois sain, il faut que l'arbre ait accumulé assez de ce nouveau bois, ce qui peut demander une mise au repos pendant un certain nombre d'années. C'est ce que présente le tableau 11 : il s'agit du nombre d'années pendant lesquelles un arbre ne pourra plus être entaillé avant que son DHP atteigne les seuils de 32,6 cm, 34,6 cm, etc. soit les DHP minimums requis permettant à une entaille de la deuxième série d'être faite tout juste vis-à-vis la première entaille de la première série. Il est à remarquer que, quelque soit la région écologique, la classe de DHP initial de 20 cm commandera toujours éventuellement une mise au repos, alors que cela reste aussi vrai pour la classe de 22 cm, sauf dans la sous-région écologique 4f-S. Cela indiquerait dès maintenant que notre norme actuelle permettant d'entailler les arbres dès qu'ils ont 20 cm au DHP devrait peut-être être révisée à la hausse.

Les sous-régions 2b-T et 3c-T ont des taux de croissance tellement faibles que même les arbres de DHP initial de 30 cm doivent être mis au repos un certain nombre d'années après la première série d'entaillage. Pour ces deux sous-régions, la simple révision des norme d'entaillage ne sera pas suffisante pour lutter contre le compartimentage. Il est vraisemblable que des travaux d'aménagement stimulant la croissance diamétrale devraient être envisagés.

Tableau 11. Nombre d'années de mise au repos après la fin de la première série d'entaillage avant de pouvoir entailler de nouveau dans le bois sain

Classe de DHP initial (cm)	Sous-région écologique									
	1a-T	2b-T	2c-T	3c-T	3d-M	3d-S	3d-T	4f-M	4f-S	4f-T
20	14	41	18	56	21	23	17	12	2	18
22	7	34	10	50	13	15	9	3	0	10
24	0	27	3	43	5	8	1	0	0	3
26	0	21	0	37	0	0	0	0	0	0
28	0	14	0	30	0	0	0	0	0	0
30	0	7	0	24	0	0	0	0	0	0

Le tableau 12 présente les DHP qu'auront atteint les arbres lorsque cette deuxième série d'entaillage pourra être amorcée. Lorsque les temps de repos présentés au tableau 11 sont différents de zéro, le DHP cible est le même que celui requis pour chaque classe de DHP initial (voir tableau 10). C'est le cas pour toutes les sous-régions pour les classes de 20 et 22 cm, à l'exception de la sous-région 4f-S pour la classe de 22 cm de DHP. Lorsque les temps de repos du tableau 11 égalent zéro, cela signifie que la croissance régulière de l'arbre permet de rattraper le compartimentage et que les DHP de la deuxième série suivront de près ceux de la fin de la première série (ou la valeur supérieure la plus proche atteinte dû aux arrondis dans les calculs des DHP; valeurs encadrées de pointillés). Par exemple, pour la sous-région 1a-T et la classe de DHP de 24 cm, le DHP de l'arbre entaillé en 44^e année (Tableau 9) était de 36,6 cm (Tableau 10). Sa croissance radiale annuelle de 1,463 mm (Tableau 7) a porté son DHP à 36,9 cm en 45^e année dépassant le DHP seuil requis de 36,6 cm, d'où aucun temps de repos (Tableau 11). À l'inverse, pour la sous-région écologique 2b-T et la classe de DHP de 20 cm, le DHP de l'arbre entaillé en 25^e année (Tableau 9) était de 24,6 cm (Tableau 10). Sa croissance radiale annuelle de 0,965 mm (Tableau 7) a porté son DHP à 24,8 cm en 26^e année, mais cette valeur ne dépassant pas le DHP seuil requis de 32,6 cm, commande un temps de repos de 41 ans (Tableau 11) et le DHP requis de 32,6 cm ne sera atteint qu'en 67^e année.

Tableau 12. DHP (cm) lors de l'initiation de la deuxième série d'entaillage

Classe de DHP initial (cm)	Sous-région écologique									
	1a-T	2b-T	2c-T	3c-T	3d-M	3d-S	3d-T	4f-M	4f-S	4f-T
20	32,6	32,7	32,8	32,6	32,6	32,7	32,7	32,8	32,7	32,8
22	34,6	34,7	34,8	34,6	34,6	34,7	34,7	34,8	37,3	34,8
24	36,9	36,7	36,8	36,6	36,6	36,7	36,7	38,3	42,6	36,8
26	41,2	38,7	40,1	38,6	39,2	38,7	40,7	42,8	48,0	40,1
28	45,6	40,7	44,4	40,6	43,3	42,5	44,7	47,3	53,3	44,4
30	49,9	42,7	48,6	42,6	47,1	46,5	49,0	51,8	58,7	48,6

Le tableau 13 présente les durées pendant lesquelles les entailles de la deuxième série pourront être faites avant que les arbres soient de nouveau entièrement compartimentés. La durée de ces deuxième séries est de beaucoup supérieure à celle de la première série. De façon générale, la période de simulation de 150 ans était trop courte pour permettre de calculer les durées des deuxième séries, sauf pour la classe de 20 cm dans la sous-région 3c-T. Une deuxième série durant 65 ans compartimente complètement de nouveau ces arbres et une deuxième période de repos est même nécessaire avant d'amorcer une troisième série d'entailage, ce qui n'est pas le cas pour les autres classes de DHP dans les autres sous-régions.

Tableau 13. Durée de la deuxième série d'entailage avant le compartimentage complet (années)

Classe de DHP initial (cm)	Sous-région écologique									
	1a-T	2b-T	2c-T	3c-T	3d-M	3d-S	3d-T	4f-M	4f-S	4f-T
20	79	69	77	65	76	75	78	82	89	77
22	86	75	85	>70†	83	82	86	90	>109†	85
24	96	82	93	>70†	91	90	94	104	>100†	93
26	>98†	>84†	>99†	>70†	>100†	97	>98†	>96†	>91†	>99†
28	>90†	>84†	>91†	>70†	>92†	>93†	>91†	>88†	>82†	>91†
30	>82†	>84†	>83†	>70†	>85†	>85†	>83†	>80†	>73†	>83†

† : La fin de la deuxième série dépasse la période de projection de 150 ans

3.2 ÉVOLUTION DE LA CROISSANCE DIAMÉTRALE AU COURS DES TROIS DERNIÈRES DÉCENNIES : VOLET EXPLORATOIRE

Nous avons examiné la croissance diamétrale sur un horizon de quelque trente ans, soit de 1970 (première année de disponibilité des données) jusqu'en 2003 (dernière année de disponibilité des données). Puisque nous avons calculé la croissance périodique annuelle entre deux inventaires pour chaque arbre, nous pouvons appliquer cette même valeur sur toutes les années qui correspondent à cette période ou encore nous pouvons appliquer une seule valeur sur une seule année choisie à l'intérieur de la période. Nous pouvons ensuite regrouper tous les arbres par sous-régions écologique pour observer les tendances.

La figure 6 présente l'évolution de l'accroissement en DHP de l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique. Chaque point est la moyenne de croissance de tous les érables à sucre par année et par sous-région écologique. À l'exception de la sous-région 4f-S, toutes les sous-régions présentent des diminutions en accroissement diamétral annuel. Il convient toutefois de noter que la sous-région 4f-S ne comportait que 18 arbres. Pareilles observations de diminution de croissance ont aussi été observées par d'autres chercheurs (Labrecque *et al.*, 2006; Duchesne *et al.*, 2002).

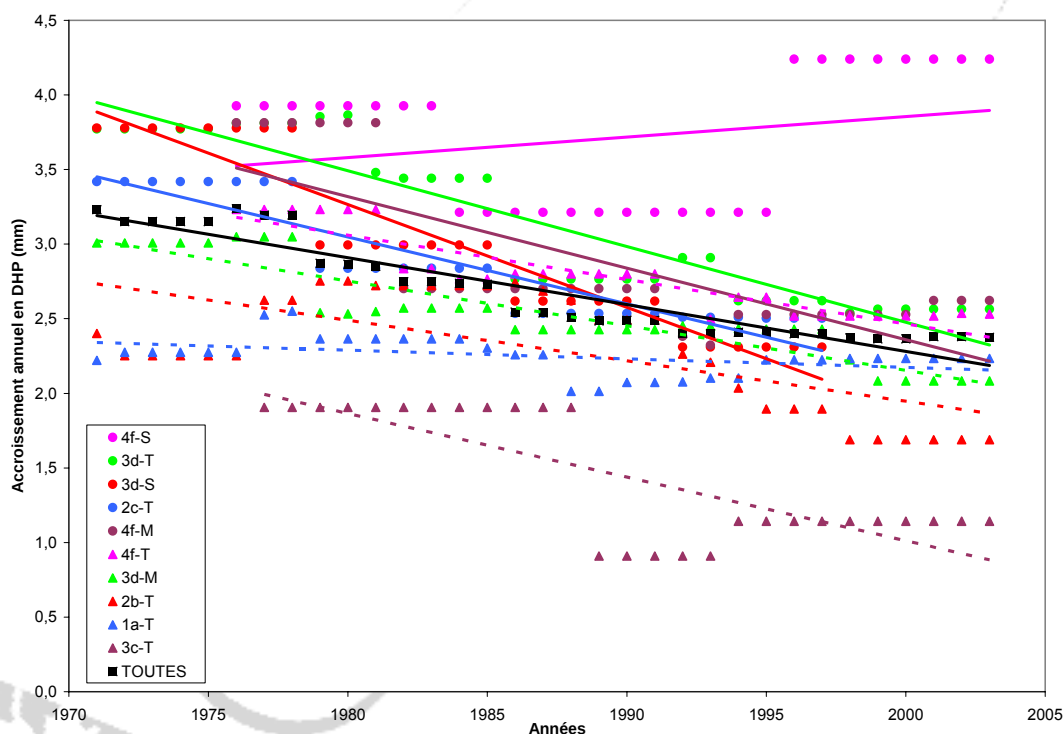


Figure 6. Évolution de l'accroissement en DHP de l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique

Puisqu'on observe une diminution de croissance annuelle en diamètre chez les érables à sucre depuis plus de trois décennies, nous avons voulu vérifier s'il y avait une contrepartie avec les arbres des autres essences. La figure 7 présente l'évolution de l'accroissement en DHP chez les autres essences que l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique. Chaque point est la moyenne de croissance de tous les autres arbres par année et par sous-région écologique.

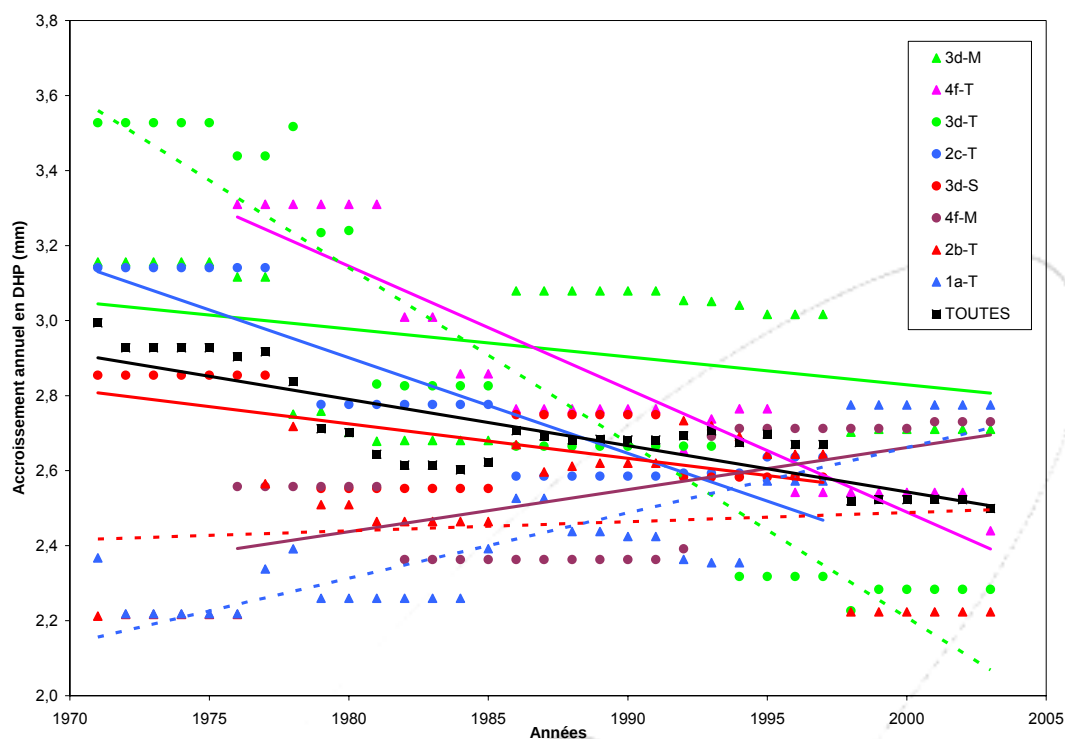


Figure 7. Évolution de l'accroissement en DHP des autres essences que l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique

Les 3738 arbres des dix sous-régions écologiques qui ne sont pas des érables à sucre appartiennent à près de trente espèces, mais quatre d'entre elles composent environ 50% de ce nombre (Tableau 14). Outre la pruche du Canada, les trois autres essences ont des croissances diamétrales annuelles qui diminuent depuis trente ans (Figure 8). Le hêtre à grandes feuilles est reconnu comme envahisseur des parterres forestiers depuis quelques décennies. Nos données renforcent ces observations, en quelque sorte, car malgré que la pente de sa droite de régression ne soit pas positive, sa pente négative est beaucoup moins prononcée que celle de l'érable à sucre (-0,0314 (Tableau 28) vs -0,0019). Il semble donc que le hêtre soit l'essence compagne qui subi le moins de préjudice.

Tableau 14. Équations de régression de la croissance diamétrale annuelle des autres essences que l'érable à sucre en fonction du temps toutes sous-régions écologiques confondues

Essence	Nombre d'arbres	Proportion (%)	Équations de régression	R ²
BOJ	665	18%	-0,0166x + 3,26	0,7375 [†]
ERR	595	16%	-0,0290x + 3,35	0,8716
HEG	505	14%	-0,0019x + 2,60	0,0220
PRU	108	3%	+0,0519x - 1,80	0,6872 [‡]
Les quatre espèces principales	1873	50%	-	-

[†] données de 1978 et 1979 exclues

[‡] données de 1978 exclues

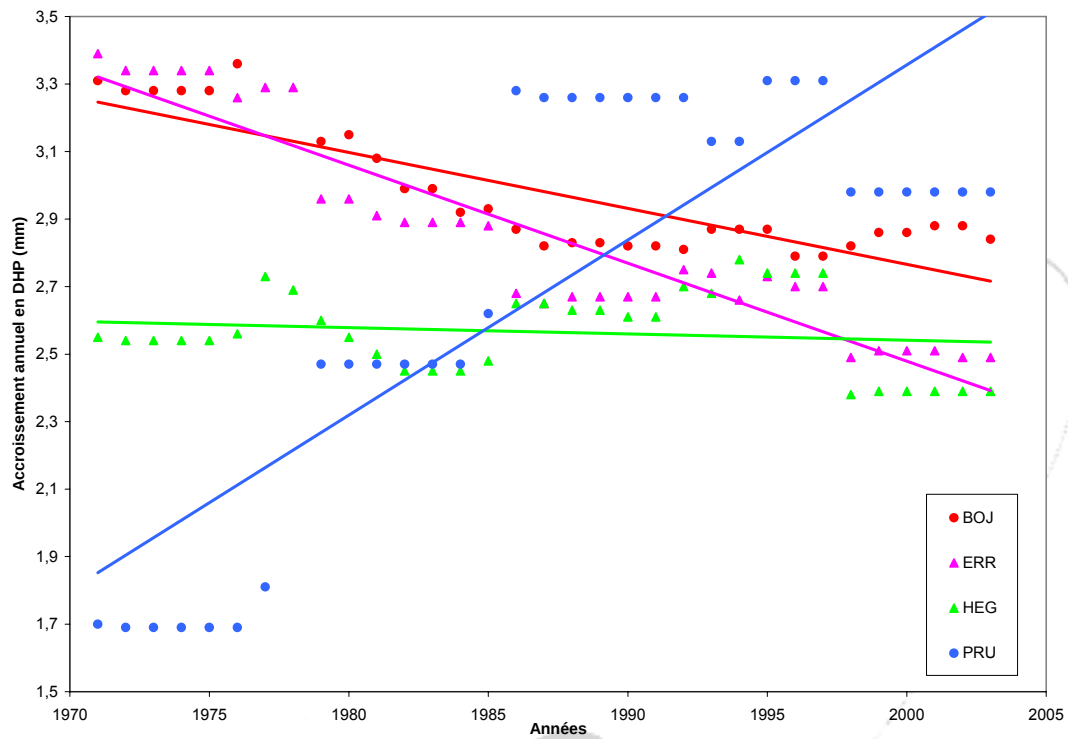


Figure 8. Évolution de l'accroissement en DHP de quatre autres essences que l'érable à sucre entre 1970 et 2003

Maintenant que ces résultats préliminaires sont présentés, nous les avons soumis à une analyse statistique rigoureuse. C'est l'objet de la prochaine section.

3.3 ÉVOLUTION DE LA CROISSANCE DIAMÉTRALE AU COURS DES TROIS DERNIÈRES DÉCENNIES : ANALYSE STATISTIQUE

Après l'examen exploratoire des données, nous les avons soumises à des analyses statistiques pour vérifier si les tendances observées étaient statistiquement valables. Dans un premier temps, nous avons examiné les données pour les érables à sucre et nous avons ensuite repris les analyses pour les arbres des autres essences.

3.3.1 Analyse sur les érables à sucre

La première partie de l'analyse a porté sur les arbres individuels. En deuxième partie, nous avons analysé les données au niveau des parcelles.

3.3.1.1 Analyse sur les arbres

Nous avons fait les analyses de régression à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS avec l'arbre comme facteur aléatoire puisque nous avons mesuré chacun d'eux à plusieurs périodes. Dans un premier temps, nous avons examiné la croissance annuelle de chaque érable à sucre comme variable dépendante et les variables explicatives étaient la sous-région écologique (Région) et l'année au milieu de la période (Année 1 = 1974, Année 2 = 1975, ..., Année 28 = 2001). Il s'est toutefois avéré que les résidus de l'analyse de variance n'étaient pas bien distribués, comme le présente la figure 9. La partie « A » présente un effet d'entonnoir qui suggère une variance non constante. Plusieurs bâtonnets de la partie « B » n'atteignent pas ou dépassent la courbe normale superposée. Le mauvais alignement des points de la partie « C » sur la diagonale, dû aux valeurs extrêmes, témoignent que les résidus ne sont pas distribués normalement. Cela nous a incité à transformer la variable dépendante selon des procédures habituellement employées. Parmi les transformations essayées, nous avons retenu le logarithme de la croissance annuelle ($\log_croiss$) comme nouvelle variable dépendante.

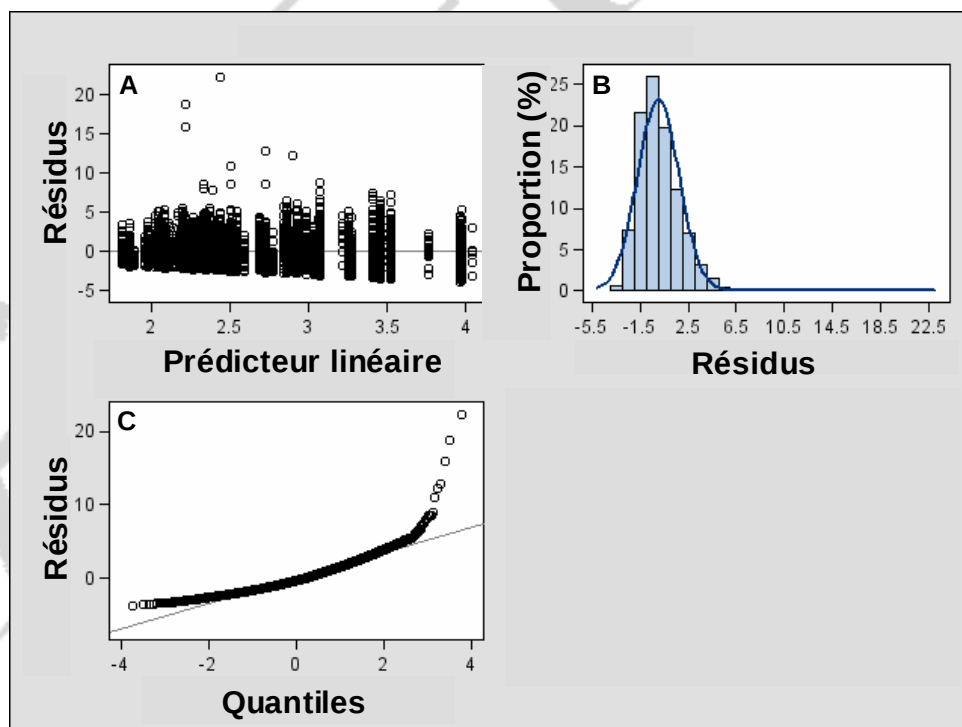


Figure 9. Résidus de l'analyse de variance effectuée avec la variable « croissance annuelle »

La figure 10 montre que les résidus de la nouvelle analyse de variance sont mieux ajustés sur une distribution normale avec la log-croissance qu'avec la croissance non transformée. L'effet d'entonnoir est disparu (A) et les points sont mieux alignés sur la diagonale (C). Plusieurs bâtonnets n'atteignent pas ou dépassent la courbe normale superposée (B). Quoique imparfaite, la transformation log est celle qui permet de s'approcher le plus d'une distribution normale pour les résidus, bien que le test de normalité soit rejeté au seuil de 0,01. Puisque les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sont assez près de ceux d'une distribution normale et que l'analyse de régression est assez robuste à la non-normalité, on peut quand même considérer valides les résultats avec la transformation log.

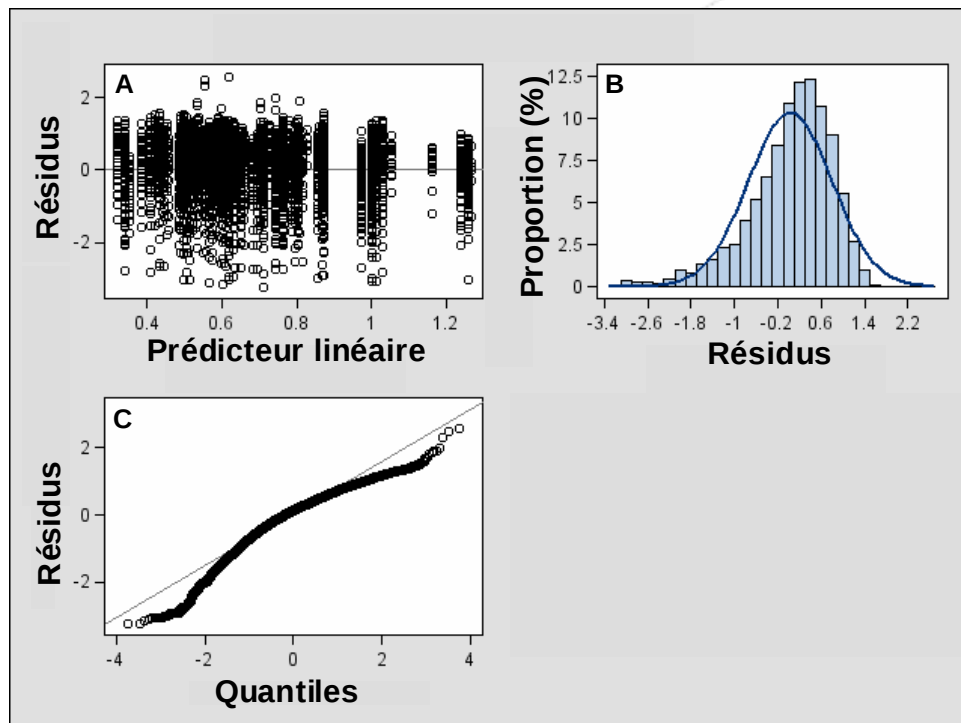


Figure 10. Résidus de l'analyse de variance effectuée avec la variable « log_croiss »

La figure 11 présente le log de la croissance annuelle des érables à sucre en fonction de l'année de milieu de la période d'inventaire pour les dix sous-régions écologiques. On note une décroissance dans le temps pour neuf des dix sous-régions. La sous-région 4f-S est la seule qui semble présenter une augmentation de croissance. Ce graphique est exploratoire et c'est l'analyse de régression qui permettra de déterminer si cette décroissance est statistiquement significative.

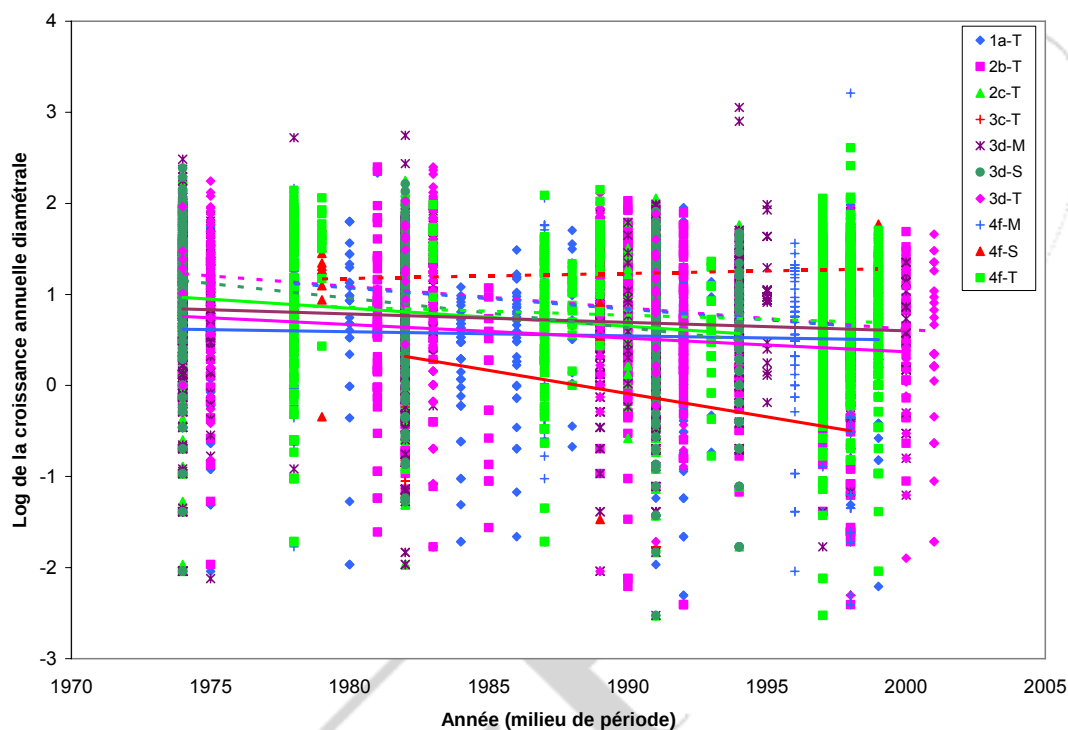


Figure 11. Évolution du log de l'accroissement en DHP de l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique

On dispose de 18 588 observations (4647 ÉRS x 4 périodes). De ce nombre, on exclut les observations des régions 3c-T et 4f-S, parce qu'elles ne contiennent que 36 et 20 arbres respectivement. Il reste donc 18 364 observations utilisables. On « perd » aussi 11 503 observations en raison de données de croissance annuelle manquantes. Donc, les analyses ont porté sur 6861 observations. L'ajustement du modèle de régression avec les facteurs « Région » (Sous-région écologique), « Année » et l'interaction entre les deux variables explicatives donne les résultats présentés au tableau 15.

Tableau 15. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance des érables à sucre pris individuellement par sous-région écologique et par année

	Résultats d'ANOVA			
	NDL (num)	NDL (dénom)	F	Pr > F
Région	7	3075	20,69	< 0,0001
Année	1	3075	451,68	< 0,0001
Année * Région	7	3075	13,46	< 0,0001

L'interaction « Année * Région » est significative ($p < 0,0001$), ce qui signifie que la relation entre la croissance et l'année n'est pas la même dans toutes les sous-régions écologiques et les pentes des relations des huit sous-régions écologiques sont significativement différentes entre elles. D'ailleurs, on peut voir cette interaction à la figure 11 puisque certaines droites se croisent. C'est le facteur « Année » qui explique le plus de variance ($F = 451,68$). Les estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les huit sous-régions écologiques sont présentées au tableau 16.

Tableau 16. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les érables à sucre pris individuellement par sous-région écologique

		Estimé des paramètres				
Effet	Région	Estimé	Erreur type	NDL	T	Pr > t
Ordonnée à l'origine	1a-T	0,6661	0,05751	3075	11,58	< 0,0001
	2b-T	0,6193	0,05662	3075	10,94	< 0,0001
	2c-T	1,0294	0,03934	3075	26,17	< 0,0001
	3d-M	0,8862	0,03248	3075	27,29	< 0,0001
	3d-S	1,0359	0,05094	3075	20,33	< 0,0001
	3d-T	1,2925	0,06342	3075	20,38	< 0,0001
	4f-M	1,4204	0,06924	3075	20,52	< 0,0001
	4f-T	0,9076	0,07638	3075	11,88	< 0,0001
Pente des régressions	1a-T	-0,00865	0,002700	3075	-3,20	0,0014
	2b-T	-0,01120	0,002684	3075	-4,17	< 0,0001
	2c-T	-0,02967	0,002275	3075	-13,04	< 0,0001
	3d-M	-0,01594	0,001714	3075	-9,30	< 0,0001
	3d-S	-0,02619	0,002700	3075	-9,70	< 0,0001
	3d-T	-0,02664	0,002647	3075	-10,06	< 0,0001
	4f-M	-0,03215	0,002961	3075	-10,86	< 0,0001
	4f-T	-0,00822	0,003174	3075	-2,59	0,0096

Les ordonnées à l'origine des droites de régression sont toutes significativement différentes de 0 ($Pr > |t| < 0,0001$) pour les huit sous-régions, ce qui signifie que la croissance annuelle n'était pas nulle au début de la période d'acquisition des données. La pente des droites de régression est négative et elles sont toutes significativement différentes de 0 pour les huit sous-régions écologiques à l'étude ($Pr > |t| \leq 0,0096$), ce qui signifie que la croissance annuelle en DHP de l'érable à sucre diminue significativement dans le temps, et ce, pour les huit sous-régions écologiques.

Cette analyse ne tient pas compte des autres variables qui pourraient expliquer la croissance des érables à sucre, soit le DHP initial moyen, la surface terrière initiale et la densité. Puisque ces variables ont été mesurées au niveau de la parcelle et non de l'arbre, une analyse sur les parcelles a également été effectuée.

3.3.1.2 Analyse sur les parcelles

Les analyses faites au niveau des arbres ne tiennent pas compte des autres variables qui pourraient expliquer la diminution de croissance des érables à sucre, soit la classe de densité, le DHP initial moyen et la surface terrière initiale. L'analyse a donc été reprise en tenant compte de ces variables reliées aux parcelles.

Nous avons fait les analyses de régression à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS avec la parcelle comme facteur aléatoire puisque nous avons mesuré chacune d'elles à plusieurs périodes. Dans un premier temps, nous avons examiné la croissance annuelle moyenne des érables à sucre d'une même parcelle comme variable dépendante et les variables explicatives étaient la sous-région écologique (Région) et l'année au milieu de la période (Année 1 = 1974, Année 2 = 1975, ..., Année 28 = 2001). Il s'est toutefois avéré que les résidus de l'analyse de variance n'étaient pas bien distribués, comme le présente la figure 12. La partie « A » présente un effet d'entonnoir qui suggère une variance non constante. Plusieurs bâtonnets de la partie « B » n'atteignent pas ou dépassent la courbe normale superposée. Le mauvais alignement des points de la partie « C » sur la diagonale, dû aux valeurs extrêmes, témoignent que les résidus ne sont pas distribués normalement. Cela nous a incité à transformer la variable dépendante selon des procédures habituellement employées. Parmi les transformations essayées, nous avons retenu le logarithme de la croissance annuelle (log_croiss) comme nouvelle variable dépendante.

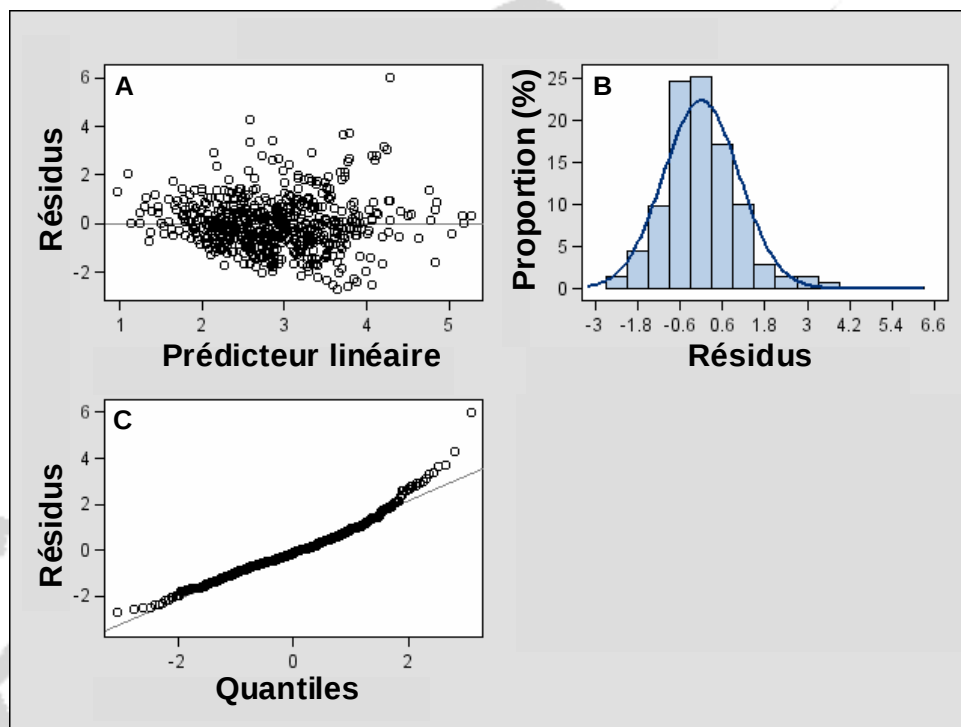


Figure 12. Résidus de l'analyse de variance effectuée avec la variable « croissance annuelle moyenne des érables à sucre d'une parcelle »

La figure 13 montre que les résidus de la nouvelle analyse de variance sont mieux ajustés sur une distribution normale avec la log-croissance qu'avec la croissance non transformée. L'effet d'entonnoir est disparu (A) et les points sont presque parfaitement alignés sur la diagonale (C). La plupart des bâtonnets coïncident presque parfaitement avec la courbe normale superposée (B). Quoiqu'imparfaite, la transformation log est celle qui permet de s'approcher le plus d'une distribution normale pour les résidus, bien que le test de normalité soit rejeté au seuil de 0,01. Puisque les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sont assez près de ceux d'une distribution normale et que l'analyse de régression est assez robuste à la non-normalité, on peut quand même considérer valides les résultats avec la transformation log.

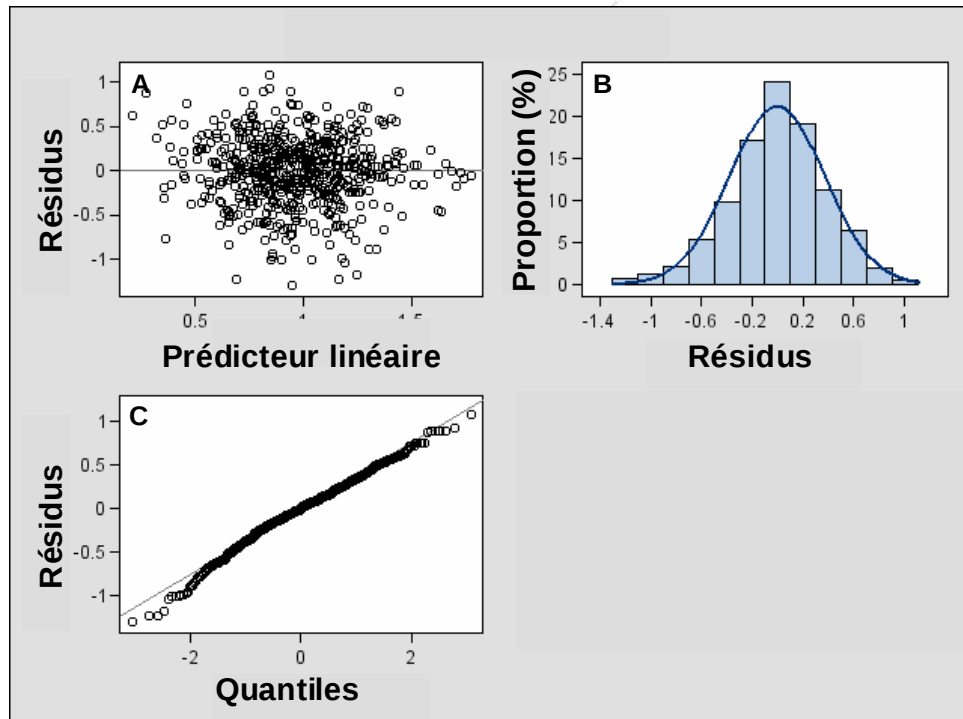


Figure 13. Résidus de l'analyse de variance effectuée avec la variable « log_croiss »

La figure 14 présente le log de la croissance annuelle moyenne des érables à sucre dans une même parcelle en fonction de l'année au milieu de la période d'inventaire pour les dix sous-régions écologiques. On observe la même tendance qu'à la figure 11, c'est-à-dire une diminution de la croissance dans le temps pour neuf des dix sous-régions écologiques. La sous-région 4f-S est la seule qui semble présenter une augmentation de croissance. Ce graphique est exploratoire et c'est l'analyse de régression qui suit permettra de déterminer si cette décroissance est statistiquement significative.

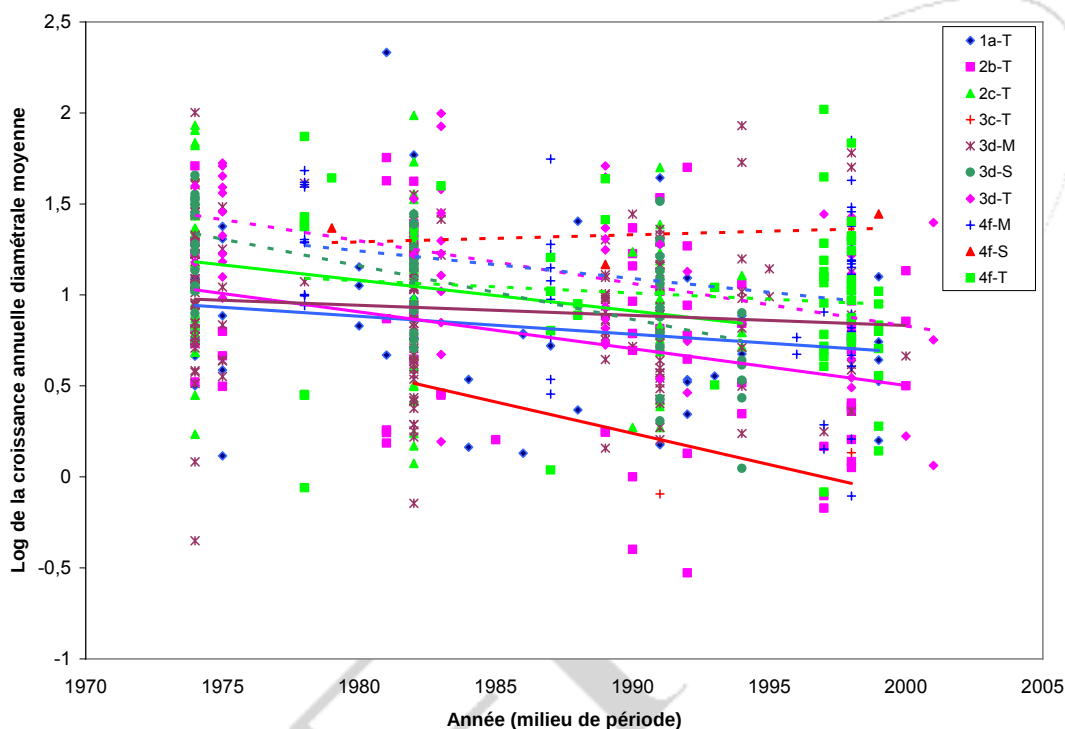


Figure 14. Évolution du log de l'accroissement moyen en DHP de l'érable à sucre dans une même parcelle entre 1970 et 2003 par sous-région écologique

On dispose de 1060 observations (265 parcelles x 4 périodes). Tout comme pour l'analyse par arbre, on exclut de ce nombre les observations des sous-régions 3c-T et 4f-S, ce qui laisse 1052 observations. On « perd » aussi 462 observations en raison des données manquantes pour la croissance annuelle. Donc, les analyses ont porté sur 591 observations. On pondère les résultats en tenant compte du nombre d'érables à sucre par parcelle. Ainsi, une parcelle qui contient peu d'érables à sucre contribuera moins à l'analyse qu'une parcelle qui en contient beaucoup. L'ajustement du modèle de régression avec les facteurs « Région » (Sous-région écologique), « Année » et l'interaction entre les deux variables explicatives donne les résultats présentés au tableau 17.

Tableau 17. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance moyenne des érables à sucre par parcelle, par sous-région écologique et par année

	Résultats d'ANOVA			
	NDL (num)	NDL (dénom)	F	Pr > F
Région	7	320	6,46	< 0,0001
Année	1	320	112,74	< 0,0001
Année * Région	7	320	3,40	0,0016

L'interaction « Année * Région » est significative ($p = 0,0016$), ce qui signifie que la relation entre la croissance et l'année n'est pas la même dans toutes les sous-régions écologiques et les pentes des relations des huit sous-régions écologiques sont significativement différentes entre elles. D'ailleurs, on peut voir cette interaction à la figure 14 puisque certaines droites se croisent. C'est le facteur « Année » qui explique le plus de variance ($F = 112,74$). Les estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les huit sous-régions écologiques sont présentées au tableau 18.

Tableau 18. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les érables à sucre pris par parcelle par sous-région écologique

Effet	Région	Estimé des paramètres				
		Estimé	Erreur type	NDL	T	Pr > t
Ordonnée à l'origine	1a-T	0,8957	0,09930	320	9,02	< 0,0001
	2b-T	0,7893	0,10010	320	7,88	< 0,0001
	2c-T	1,2180	0,07093	320	17,17	< 0,0001
	3d-M	1,0845	0,05701	320	19,02	< 0,0001
	3d-S	1,2923	0,09493	320	13,61	< 0,0001
	3d-T	1,4781	0,10790	320	13,69	< 0,0001
	4f-M	1,5718	0,12210	320	12,88	< 0,0001
	4f-T	1,1788	0,13230	320	8,91	< 0,0001
Pente des régressions	1a-T	-0,00559	0,004584	320	-1,22	0,2238
	2b-T	-0,00815	0,004633	320	-1,76	0,0794
	2c-T	-0,01979	0,003868	320	-5,12	< 0,0001
	3d-M	-0,01391	0,002898	320	-4,80	< 0,0001
	3d-S	-0,02606	0,004642	320	-5,61	< 0,0001
	3d-T	-0,02527	0,004449	320	-5,68	< 0,0001
	4f-M	-0,02622	0,005035	320	-5,21	< 0,0001
	4f-T	-0,00987	0,005367	320	-1,84	0,0669

Les ordonnées à l'origine des droites de régression sont toutes significativement différentes de 0 ($\text{Pr} > |t| < 0,0001$) pour les huit sous-régions, ce qui signifie que la croissance annuelle n'était pas nulle au début de la période d'acquisition des données. La pente des droites de régression est négative et elles sont significativement différentes de 0 pour cinq des huit sous-régions écologiques à l'étude ($\text{Pr} > |t| < 0,0001$). Pour deux sous-régions, 2b-T et 4f-T, ces pentes sont à la limite d'être significative, ($\text{Pr} > |t| = 0,0794$ et $0,0669$ respectivement), tandis que pour la sous-région 1a-T, cette pente n'est pas significative ($\text{Pr} > |t| = 0,2238$). De façon globale, on peut dire que la croissance annuelle en DHP de l'érable à sucre diminue dans le temps, et ce, pour les huit sous-régions écologiques, lorsque les données sont examinées au niveau des parcelles plutôt qu'au niveau des arbres individuels.

Nous nous sommes ensuite demandés si d'autres variables que l'année pourraient expliquer les diminutions de croissance observées. Dans notre étude exploratoire, nous avons donc ajouté les variables « DHPM » (DHP moyen de tous les arbres d'une même parcelle au début de la période, « STT » (surface terrière de tous les arbres d'une même parcelle au milieu de la période ramenée en m^2/ha) et « DENSM » (Densité numérique moyenne de la parcelle au cours de la période). Ces trois variables pouvaient être calculées à partir de nos données et elles sont toutes reconnues pour influencer la croissance diamétrale individuelle. La densité numérique est le moyen que nous avons retenu pour exprimer la densité moyenne qui n'est pas calculable avec les valeurs alphabétiques (A, B, C et D). Nous avons attribué les valeurs numériques médianes pour chaque classe de densité : 90 à la valeur « A », 70 à la valeur « B », 50 à la valeur « C », 32 à la valeur « D » et 12 à une valeur de densité inférieure à 25% de couverture, donc sans inscription dans les relevés d'inventaire.

Les figures 15 à 17 présentent la relation entre la log-croissance et les autres facteurs à considérer dans le modèle, soit le DHP initial moyen d'une parcelle, la surface terrière initiale totale d'une parcelle et la densité moyenne pour la période dans une parcelle pour chaque sous-région écologique. À la figure 15,

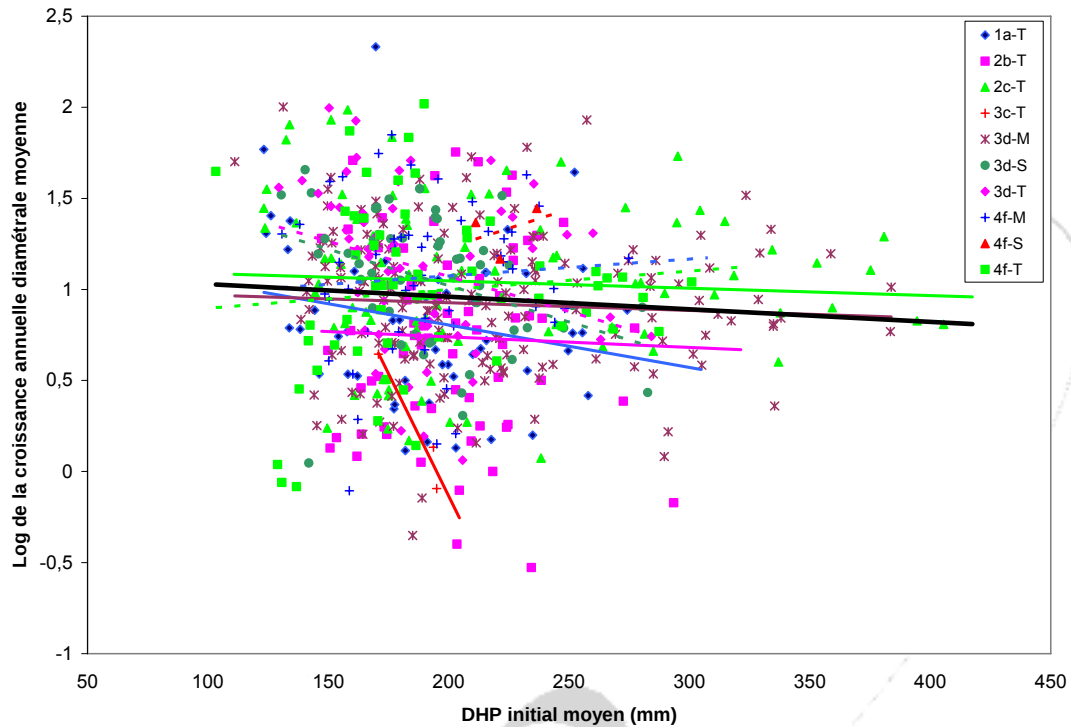


Figure 15. Log de l'accroissement moyen en DHP de l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction du DHP initial moyen dans la parcelle par sous-région écologique

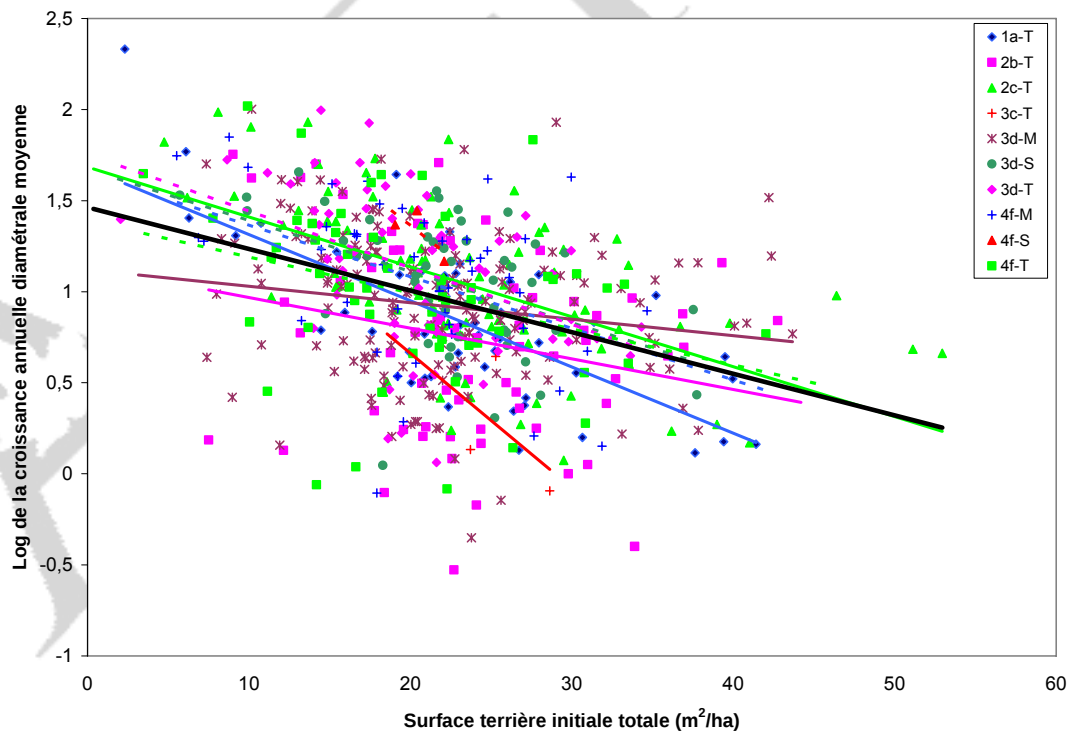


Figure 16. Log de l'accroissement moyen en DHP de l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de la surface terrière totale dans la parcelle par sous-région écologique

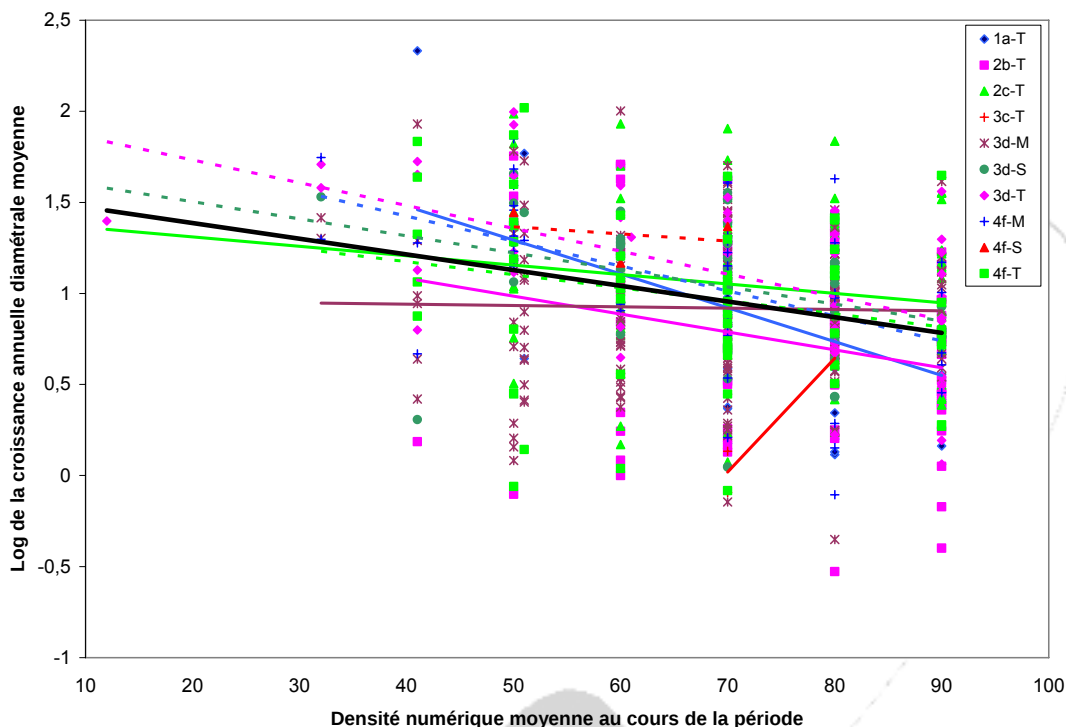


Figure 17. Log de l'accroissement moyen en DHP de l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de la densité moyenne dans la parcelle par sous-région écologique

on remarque pour l'ensemble des régions que le DHP initial moyen ne semble pas être en relation importante avec la log-croissance, sauf peut-être une relation négative pour les régions 1a-T, 3d-S et 3d-T. Le DHP initial moyen dans les parcelles ne semble donc pas avoir d'influence sur la croissance diamétrale moyenne.

Pour ce qui est de la surface terrière initiale totale, le graphique présenté à la figure 16 montre une relation négative avec la log-croissance. Cette observation va dans le sens de ce qui est généralement admis dans la littérature à l'effet que la croissance diamétrale diminue à mesure que la surface terrière augmente.

Enfin à la figure 17, on note une relation négative entre la log-croissance et la densité moyenne pour la période. Ici encore, la littérature rapporte régulièrement que la croissance diamétrale diminue à mesure que la densité augmente.

Sur les figures 15 à 17, les sous-régions 3c-T et 4f-S ne doivent pas être considérées, car vu leur nombre restreint d'observations, elles ne sont présentées qu'à titre indicatif. Aussi, sur ces trois figures, les lignes noires en trait épais représentent les droites de régression pour l'ensemble des sous-régions. C'est l'analyse de variance plus poussée présentée ci-après qui a permis de confondre toutes les sous-régions écologiques sous une seule droite de régression.

Pour vérifier les tendances décelées aux figures 15 à 17, nous avons ajouté au modèle précédent les autres variables qui pourraient expliquer la croissance des érables à sucre, soit le DHP initial moyen de toutes les tiges de la parcelle (DHPM), la surface terrière initiale totale (STT) et la densité moyenne de la parcelle (DENSM). Cette fois encore tous les facteurs du modèle sont significatifs.

Enfin, nous avons ajouté au modèle les interactions entre « Région » et les variables « DHPM », « STT » et « DENSM » une à la fois. Aucune de ces interactions n'est ressortie significative au seuil de 5%, même si les figures 15 à 17 laissaient croire qu'il aurait pu y en avoir puisque certaines droites se croisent. Donc, le modèle retenu est celui avec les variables « Région », « Année », « Année * Région », « DHPM », « STT » et « DENSM » et on obtient les résultats présentés au tableau 19.

Tableau 19. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance moyenne des érables à sucre par parcelle pour les cinq paramètres étudiés

	Résultats d'ANOVA			
	NDL (num)	NDL (dénom)	F	Pr > F
Région	7	317	5,79	< 0,0001
Année	1	317	64,19	< 0,0001
Année * Région	7	317	4,31	< 0,0001
DHPM	1	317	7,35	0,0071
STT	1	317	56,91	< 0,0001
DENSM	1	317	14,24	0,0002

Tous les effets simples sont très significatifs. Il est intéressant de voir que, même en ajoutant les facteurs « DHPM », « STT » et « DENSM », l'effet de l'année demeure très significatif. De même, la relation entre l'année et la croissance ne semble pas être affectée par la relation qui existe aussi entre la surface terrière et l'année, tel qu'observé à la figure 18. La surface terrière totale semble augmenter dans les parcelles au fil du temps, alors que la croissance diamétrale de l'érable à sucre diminue, mais ces observations sommaires n'ont pas été soumises à une analyse statistique plus poussée puisque ce n'était pas le but de ce travail.

Ce sont surtout les facteurs « Année » et « Surface terrière » qui expliquent la croissance des érables à sucre (Année : $F = 64,19$, $NDL = (1, 317)$, $p < 0,0001$; STT : $F = 56,91$, $NDL = (1, 317)$, $p < 0,0001$). Les facteurs « Région », « DHPM » ET « DENSM » expliquent aussi la croissance des érables à sucre, mais moins que les deux variables précitées. La relation entre l'année et la croissance des érables n'est pas la même pour toutes les régions écologiques puisque le terme d'interaction « Année * Région » est significatif ($p < 0,0001$). Les estimations des paramètres sont présentées au tableau 20.

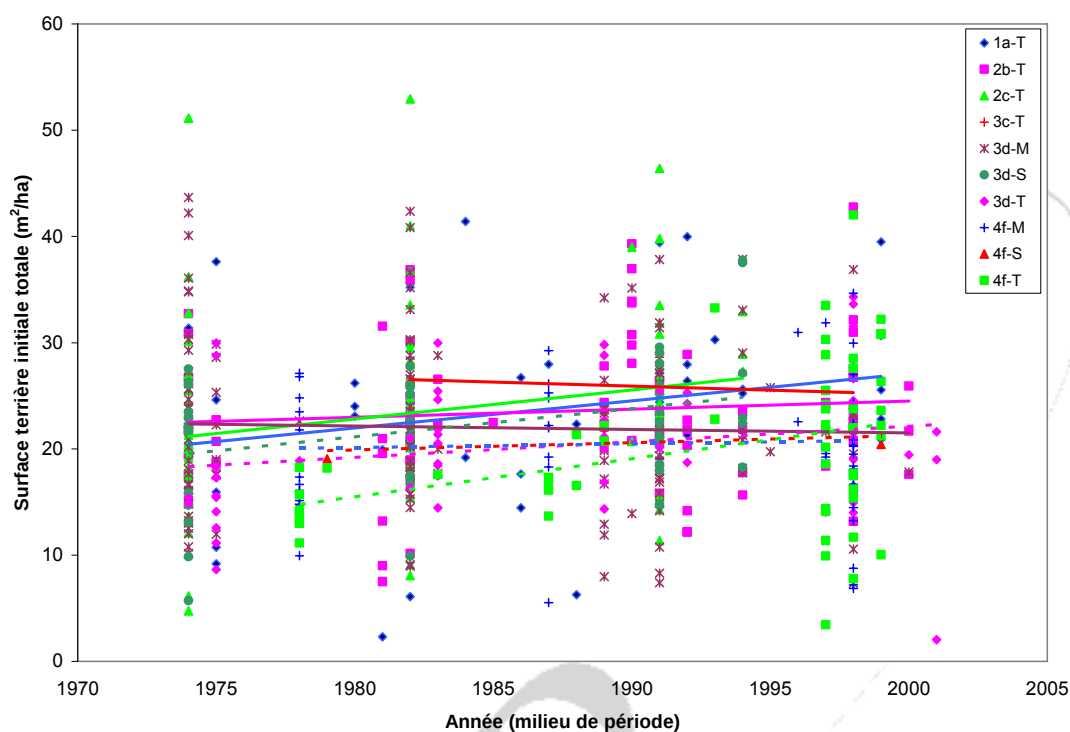


Figure 18. Évolution de la surface terrière des parcelles entre 1970 et 2003 par sous-région écologique

Tableau 20. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les érables à sucre pris par parcelle dans les huit sous-régions écologiques et estimation des pentes de régression moyennes pour le DHP moyen, la surface terrière totale et la densité moyenne des parcelles

		Estimé des paramètres					
Effet	Région	Estimé	Erreur type	NDL	T	Pr >	t
Ordonnée à l'origine	1a-T	1,4611	0,1460	317	10,00	< 0,0001	
	2b-T	1,3783	0,1458	317	9,45	< 0,0001	
	2c-T	1,7673	0,1342	317	13,17	< 0,0001	
	3d-M	1,6234	0,1272	317	12,76	< 0,0001	
	3d-S	1,8154	0,1371	317	13,25	< 0,0001	
	3d-T	1,9913	0,1442	317	13,81	< 0,0001	
	4f-M	2,0026	0,1457	317	13,74	< 0,0001	
	4f-T	1,5472	0,1541	317	10,04	< 0,0001	
Pente des régressions	1a-T	-0,00046	0,004211	317	-0,11	0,9124	
	2b-T	-0,00605	0,004255	317	-1,42	0,1559	
	2c-T	-0,01498	0,003629	317	-4,13	< 0,0001	
	3d-M	-0,01338	0,002650	317	-5,05	< 0,0001	
	3d-S	-0,02115	0,004283	317	-4,94	< 0,0001	
	3d-T	-0,02271	0,004075	317	-5,57	< 0,0001	
	4f-M	-0,02140	0,004691	317	-4,56	< 0,0001	
	4f-T	-0,00167	0,004970	317	-0,34	0,7369	
DHPM	Toutes	0,00133	0,000489	317	2,71	0,0071	
STT	Toutes	-0,02243	0,002973	317	-7,54	< 0,0001	
DNSM	Toutes	-0,00474	0,001255	317	-3,77	0,0002	

Les ordonnées à l'origine des droites de régression sont toutes significativement différentes de 0 ($Pr > |t| < 0,0001$ pour les huit sous-régions), ce qui signifie que la croissance annuelle moyenne n'était pas nulle au début de la période d'acquisition des données. La pente des droites de régression est négative et elles sont significativement différentes de 0 pour cinq des huit sous-régions écologiques à l'étude ($Pr > |t| < 0,0001$). Pour trois sous-régions, 1a-T, 2b-T et 4f-T, ces pentes ne sont pas significativement différentes de 0, ($Pr > |t| > 0,05$). Donc, on ne peut pas affirmer que la croissance soit négative dans ces trois sous-régions.

La relation entre la log-croissance des érables à sucre et le DHP initial moyen de la parcelle ne semblait pas claire comme présentée à la figure 15. L'analyse de régression révèle cependant que cette relation est positive (estimé = 0,00133) et significativement différentes de 0 ($Pr > |t| = 0,0071$), c'est-à-dire que plus le DHP est grand, plus la croissance est grande. Cette relation est la même pour les huit sous-régions écologiques puisque le terme d'interaction « Région * DHPM » n'est pas significatif, d'où la droite noire en trait épais généralisant l'ensemble des données. Tel que suggéré par la figure 16, la log-croissance diminue avec la surface terrière initiale totale (estimé = -0,02243) et cette décroissance est significativement différentes de 0 ($Pr > |t| < 0,0001$). Elle est la même pour les huit sous-régions écologiques, puisque le terme d'interaction « Région * STT » n'est pas significatif (droite noire épaisse). Enfin, l'analyse révèle que la log-croissance des érables à sucre diminue avec la densité moyenne pour la période (estimé = -0,00474) tel que suggéré par la figure 17. Cette relation est significativement différentes de 0 ($Pr > |t| = 0,0002$) et est la même pour les huit sous-régions écologiques puisque le terme d'interaction « Région * DENSM » n'est pas significativement différentes de 0 (droite noire épaisse).

3.3.2 Analyse sur les autres essences que l'érable à sucre

Puisque nous avons l'information à notre disposition, à titre de complément aux analyses sur la croissance des érables à sucre, nous avons aussi analysé la croissance de toutes les autres essences confondues. Dans un premier temps, nous avons examiné les données au niveau des arbres individuels, puis ensuite ce fut au niveau des parcelles. À l'instar des données au sujet de l'érable à sucre, nous avons utilisé le logarithme de la croissance annuelle comme variable dépendante.

3.3.2.1 Analyse sur les arbres

Nous avons fait les analyses de régression à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS avec l'arbre comme facteur aléatoire puisque nous avons mesuré chacun d'eux à plusieurs périodes. Dans un premier temps, nous avons examiné la croissance annuelle de chaque arbre comme variable dépendante et les variables explicatives étaient la sous-région écologique (Région) et l'année au milieu de la période (Année 1 = 1974, Année 2 = 1975, ..., Année 28 = 2001). Nous avons utilisé le logarithme de la variable dépendante pour les mêmes raisons que celles exposées à la section 3.3.1.1.

La figure 19 présente le log de la croissance annuelle de tous les arbres autres que l'érable à sucre en fonction de l'année de milieu de la période d'inventaire pour neuf des dix sous-régions écologiques (aucune tendance possible pour la sous-région 3c-T qui n'a qu'un seul arbre). Il semble que les autres essences se comportent différemment de l'érable à sucre, puisqu'on note plutôt une croissance qu'une décroissance dans le temps dans les sous-régions 1a-T, 2b-T, 3d-S et 4f-M. Pour l'érable à sucre, seulement la sous-région 4f-S affichait une augmentation de croissance. Ce graphique est exploratoire et c'est l'analyse de régression qui permettra de déterminer si cette décroissance est statistiquement significative.

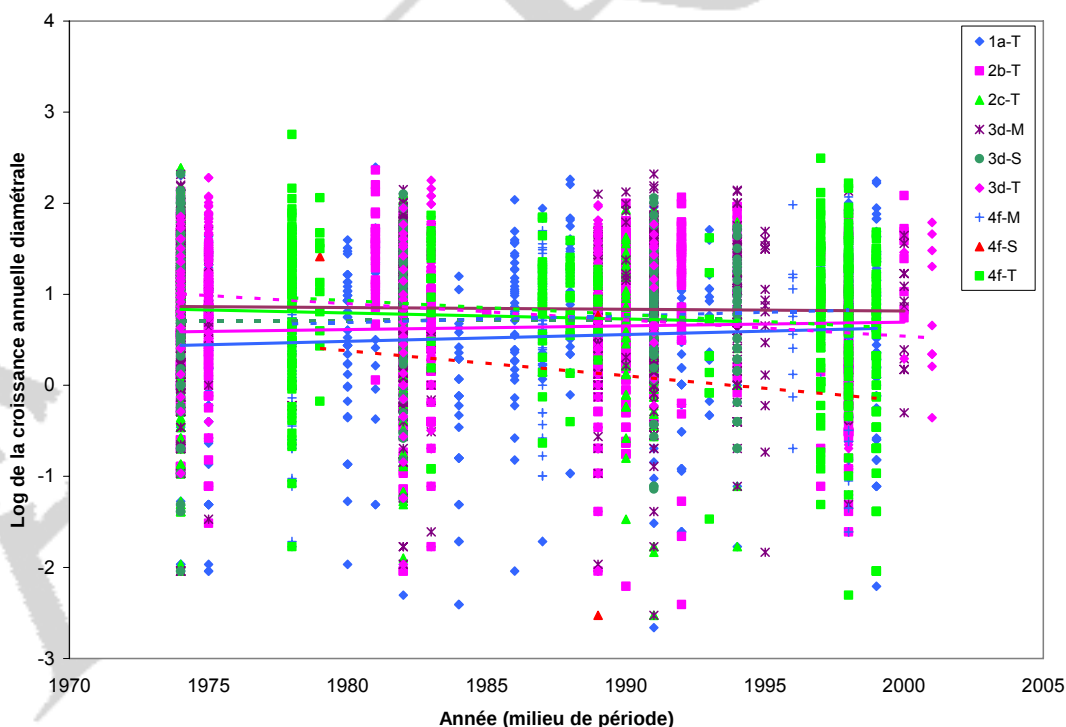


Figure 19. Évolution du log de l'accroissement en DHP des autres essences que l'érable à sucre entre 1970 et 2003 par sous-région écologique

On dispose de 15 068 observations (3767 arbres x 4 périodes). De ce nombre, on exclut les observations des régions 3c-T et 4f-S, parce qu'elles ne contiennent que 1 et 3 arbres respectivement. Il reste donc 15 052 observations utilisables. On « perd » aussi 10 644 observations en raison de données de croissance annuelle manquantes. Donc, les analyses ont porté sur 4408 observations. L'ajustement du modèle de régression avec les facteurs « Région » (Sous-région écologique), « Année » et l'interaction entre les deux variables explicatives donne les résultats présentés au tableau 21.

Tableau 21. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance des arbres d'autres essences que l'érable à sucre pris individuellement par sous-région écologique et par année

Résultats d'ANOVA				
	NDL (num)	NDL (dénom)	F	Pr > F
Région	7	1909	8,18	< 0,0001
Année	1	1909	103,88	< 0,0001
Année * Région	7	1909	9,07	< 0,0001

L'interaction « Année * Région » est significative ($p < 0,0001$), ce qui signifie que la relation entre la croissance et l'année n'est pas la même dans toutes les sous-régions écologiques et les pentes des relations des huit sous-régions écologiques sont significativement différentes entre elles. D'ailleurs, on peut voir cette interaction à la figure 19 puisque certaines droites se croisent. C'est le facteur « Année » qui explique le plus de variance ($F = 103,88$). Les estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les huit sous-régions écologiques sont présentées au tableau 22.

Tableau 22. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les arbres d'autres essences que l'érable à sucre pris individuellement par sous-région écologique

		Estimé des paramètres				
Effet	Région	Estimé	Erreur type	NDL	T	Pr > t
Ordonnée à l'origine	1a-T	0,5879	0,05796	1909	10,14	< 0,0001
	2b-T	0,6948	0,05658	1909	12,28	< 0,0001
	2c-T	0,8820	0,04646	1909	18,98	< 0,0001
	3d-M	0,9375	0,04528	1909	20,70	< 0,0001
	3d-S	0,7470	0,08223	1909	9,08	< 0,0001
	3d-T	1,0948	0,06018	1909	18,19	< 0,0001
	4f-M	0,8281	0,08405	1909	9,85	< 0,0001
	4f-T	1,1170	0,10160	1909	11,00	< 0,0001
Pente des régressions	1a-T	-0,00333	0,002715	1909	-1,23	0,2206
	2b-T	-0,00257	0,002675	1909	-0,96	0,3367
	2c-T	-0,01877	0,002776	1909	-6,76	< 0,0001
	3d-M	-0,01065	0,002419	1909	-4,40	< 0,0001
	3d-S	-0,01051	0,004828	1909	-2,18	0,0297
	3d-T	-0,02727	0,002920	1909	-9,34	< 0,0001
	4f-M	-0,00530	0,003967	1909	-1,34	0,1815
	4f-T	-0,02127	0,004468	1909	-4,76	< 0,0001

Les ordonnées à l'origine des droites de régression sont toutes significativement différentes de 0 ($Pr > |t| < 0,0001$) pour les huit sous-régions, ce qui signifie que la croissance annuelle n'était pas nulle au début de la période d'acquisition des données. La pente des droites de régression est négative et elles sont significativement différentes de 0 pour cinq des huit sous-régions écologiques à l'étude ($Pr > |t| \leq 0,0297$), ce qui signifie que la croissance annuelle en DHP des autres essences que l'érable à

sucré diminue significativement dans le temps pour ces sous-régions écologiques. Pour les trois autres sous-régions (1a-T, 2b-T et 4f-M), les pentes sont négatives, mais pas significativement différentes de 0.

Ces résultats ne sont pas consistants avec la figure 19 où certaines droites semblent avoir une pente positive. On peut expliquer cette situation par le fait que les courbes que l'on retrouve sur ce graphique sont estimées sans tenir compte du facteur aléatoire « arbre ». En effet, les paramètres sont estimés en supposant que toutes les observations sont indépendantes. Par contre, lors de l'ajustement du modèle de régression avec la procédure MIXED, on ajuste une courbe pour chaque arbre et ensuite la moyenne de ces courbes est estimée. Dans notre ensemble de données, où il y a plusieurs arbres qui n'ont que des valeurs aux premières périodes, on peut introduire un biais dans nos estimations en ne tenant pas compte du facteur « arbre ». Par exemple, on pourrait penser que les données manquantes dans les dernières périodes proviennent des arbres qui avaient un faible taux de croissance à la première période et donc expliquer pourquoi le taux de croissance semble augmenter.

Cette analyse ne tient pas compte des autres variables qui pourraient expliquer la croissance des érables à sucre, soit le DHP initial moyen, la surface terrière initiale et la densité. Puisque ces variables ont été mesurées au niveau de la parcelle et non de l'arbre, une analyse sur les parcelles a également été effectuée.

3.3.2.2 Analyse sur les parcelles

Nous avons ajusté les modèles de régression présentés à la section 3.3.1.2 pour que la variable dépendante soit « log_croiss_autres », ce qui représente la moyenne du logarithme de la croissance annuelle des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle. Les variables explicatives sont exactement les mêmes que celles utilisées à la section 3.3.1.2 et les mêmes raisons invoquées pour la transformation log s'appliquent encore ici.

La figure 20 présente le log de la croissance annuelle moyenne des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de l'année au milieu de la période d'inventaire pour neuf sous-régions écologiques. Bien que ce soit difficile à déceler visuellement, toutes les sous-régions, à l'exception de 4f-M, présentent des diminutions de croissance dans le temps. Cela diffère de la figure 19 où les diminutions de croissance étaient observées dans cinq des neuf sous-régions écologiques. Ce graphique est exploratoire et c'est l'analyse de régression qui suit permettra de déterminer si cette décroissance est statistiquement significative.

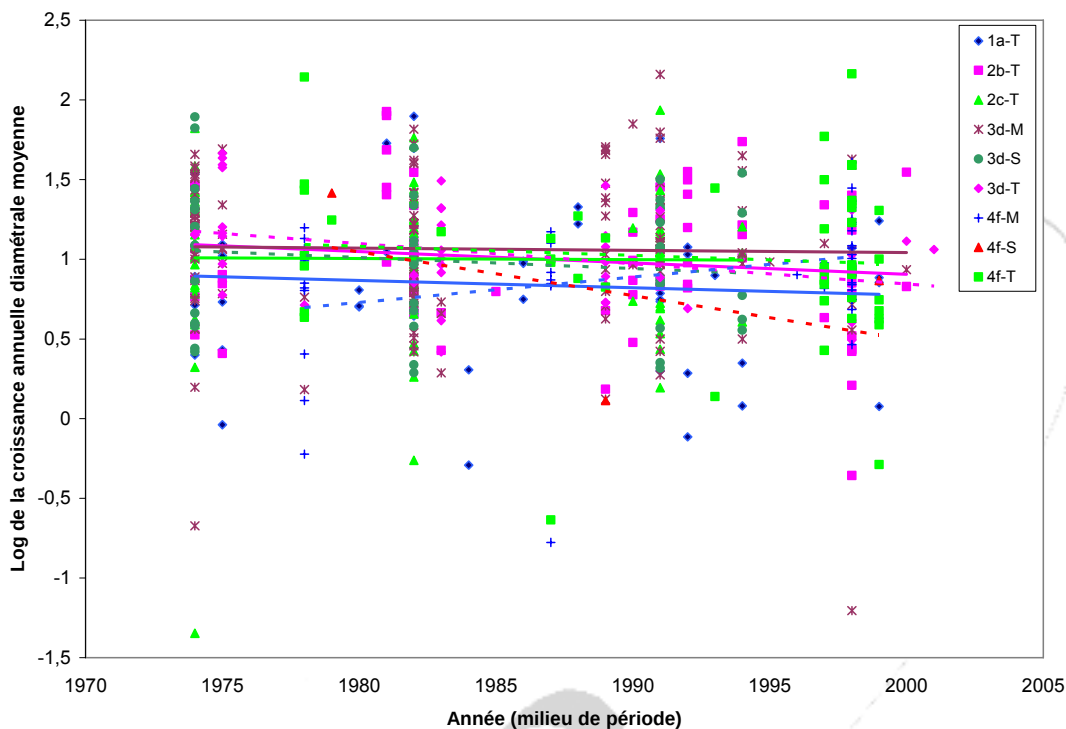


Figure 20. Évolution du log de l'accroissement moyen en DHP des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle entre 1970 et 2003 par sous-région écologique

Parmi les 265 parcelles, on en compte 254 qui contiennent d'autres essences que l'érable à sucre. On dispose de 1016 observations (254 parcelles x 4 périodes). Tout comme pour l'analyse par arbre, on exclut de ce nombre les observations de la sous-région 4f-S, ce qui laisse 1008 observations. On « perd » aussi 488 observations en raison des données manquantes pour la croissance annuelle. Donc, les analyses ont porté sur 520 observations. On pondère les résultats en tenant compte du nombre d'arbres autres que les érables à sucre par parcelle. Ainsi, une parcelle qui contient peu d'autres arbres contribuera moins à l'analyse qu'une parcelle qui en contient beaucoup. L'ajustement du modèle de régression avec les facteurs « Région » (Sous-région écologique), « Année » et l'interaction entre les deux variables explicatives donne les résultats présentés au tableau 23.

Tableau 23. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance moyenne des arbres d'autres essences que l'érable à sucre par parcelle, par sous-région écologique et par année

	Résultats d'ANOVA			
	NDL (num)	NDL (dénom)	F	Pr > F
Région	7	273	2,44	0,0191
Année	1	273	12,70	0,0004
Année * Région	7	273	2,30	0,0271

Les deux facteurs simples ainsi que l'interaction sont significatifs, mais moins que pour l'érable à sucre. L'interaction « Année * Région » est significative ($p = 0,0271$), ce qui signifie que la relation entre la croissance et l'année n'est pas la même dans toutes les sous-régions écologiques et les pentes des relations des huit sous-régions écologiques sont significativement différentes entre elles. D'ailleurs, on peut voir cette interaction à la figure 20 puisque certaines droites se croisent. C'est le facteur « Année »

qui explique le plus de variance ($F = 12,70$). Les estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les huit sous-régions écologiques sont présentées au tableau 24.

Tableau 24. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les arbres d'autres essences que l'érable à sucre pris par parcelle par sous-région écologique

Effet	Région	Estimé des paramètres				
		Estimé	Erreur type	NDL	T	Pr > t
Ordonnée à l'origine	1a-T	0,8160	0,08548	273	9,55	< 0,0001
	2b-T	0,9974	0,08450	273	11,80	< 0,0001
	2c-T	1,1442	0,06939	273	16,49	< 0,0001
	3d-M	1,1023	0,06042	273	18,24	< 0,0001
	3d-S	0,9760	0,10430	273	9,36	< 0,0001
	3d-T	1,2143	0,09163	273	13,25	< 0,0001
	4f-M	0,9374	0,11730	273	7,99	< 0,0001
	4f-T	1,2434	0,13390	273	9,28	< 0,0001
Pente des régressions	1a-T	0,00046	0,003525	273	0,13	0,8970
	2b-T	-0,00099	0,003686	273	-0,27	0,7876
	2c-T	-0,00961	0,003650	273	-2,63	0,0089
	3d-M	-0,00397	0,003114	273	-1,27	0,2035
	3d-S	-0,00353	0,006024	273	-0,59	0,5587
	3d-T	-0,01598	0,003765	273	-4,24	< 0,0001
	4f-M	0,00031	0,005011	273	0,06	0,9510
	4f-T	-0,01134	0,005701	273	-1,99	0,0477

Les ordonnées à l'origine des droites de régression sont toutes significativement différentes de 0 ($\text{Pr} > |t| < 0,0001$) pour les huit sous-régions, ce qui signifie que la croissance annuelle n'était pas nulle au début de la période d'acquisition des données. La pente des droites de régression est négative pour six des huit sous-régions écologiques, mais seulement trois parmi elles sont significativement différentes de 0 (2c-T, 3d-T et 4f-T). Les pentes des trois autres sous-régions (2b-T, 3d-M et 3d-S) ne sont pas significativement différentes de 0. Il y a aussi deux sous-régions où les pentes sont positives (1a-T et 4f-M), mais leurs estimés ne sont pas significatifs du tout ($\text{Pr} > |t| > 0,8970$). De façon globale, on peut dire que les tendances observées pour les autres essences ne se comparent pas à celles observées chez les érables à sucre lorsque les données sont examinées au niveau des parcelles plutôt qu'au niveau des arbres individuels. C'est peut-être ce qui explique que la croissance en surface terrière examinée pour tous les arbres dans les parcelles, présentée sommairement à la figure 18, augmente dans le temps.

Tout comme nous l'avons fait pour l'érable à sucre, nous nous sommes ensuite demandés si d'autres variables que l'année pourraient expliquer les diminutions de croissance observées. Dans notre étude exploratoire, nous avons donc ajouté les variables « DHPM » (DHP moyen de tous les arbres d'une même parcelle au début de la période, « STT » (surface terrière de tous les arbres d'une même parcelle au milieu de la période ramenée en m^2/ha) et « DENSM » (Densité numérique moyenne de la parcelle au cours de la période).

Les figures 21 à 23 présentent la relation entre la log-croissance et les autres facteurs à considérer dans le modèle, soit le DHP initial moyen d'une parcelle, la surface terrière initiale totale d'une parcelle et la densité moyenne pour la période dans une parcelle pour chaque sous-région écologique. À la figure 21, on note une relation positive entre le DHP initial moyen et la log-croissance pour l'ensemble des sous-régions, sauf les sous-régions 3d-S et 3d-T. Contrairement à l'érable à sucre, le DHP initial moyen des autres essences dans les parcelles semble donc avoir de l'influence sur la croissance diamétrale moyenne.

Pour ce qui est de la surface terrière initiale totale, le graphique présenté à la figure 22 montre une relation négative avec la log-croissance. Cette observation va dans le sens de ce qui est généralement admis dans la littérature à l'effet que la croissance diamétrale diminue à mesure que la surface terrière augmente et les tendances observées sont les mêmes que celles pour l'érable à sucre (Figure 16).

Enfin à la figure 23, on note une relation négative entre la log-croissance et la densité moyenne pour la période. Ici encore, la littérature rapporte régulièrement que la croissance diamétrale diminue à mesure que la densité augmente et les tendances observées sont les mêmes que celles pour l'érable à sucre (Figure 17).

Sur les figures 21 à 23, la sous-région 4f-S ne doit pas être considérée, car vu son nombre restreint d'observations, elle n'est présentée qu'à titre indicatif. Aussi, sur ces trois figures, les lignes noires en trait épais représentent les droites de régression pour l'ensemble des sous-régions. C'est l'analyse de variance plus poussée présentée ci-après qui a permis de confondre toutes les sous-régions écologiques sous une seule droite de régression.

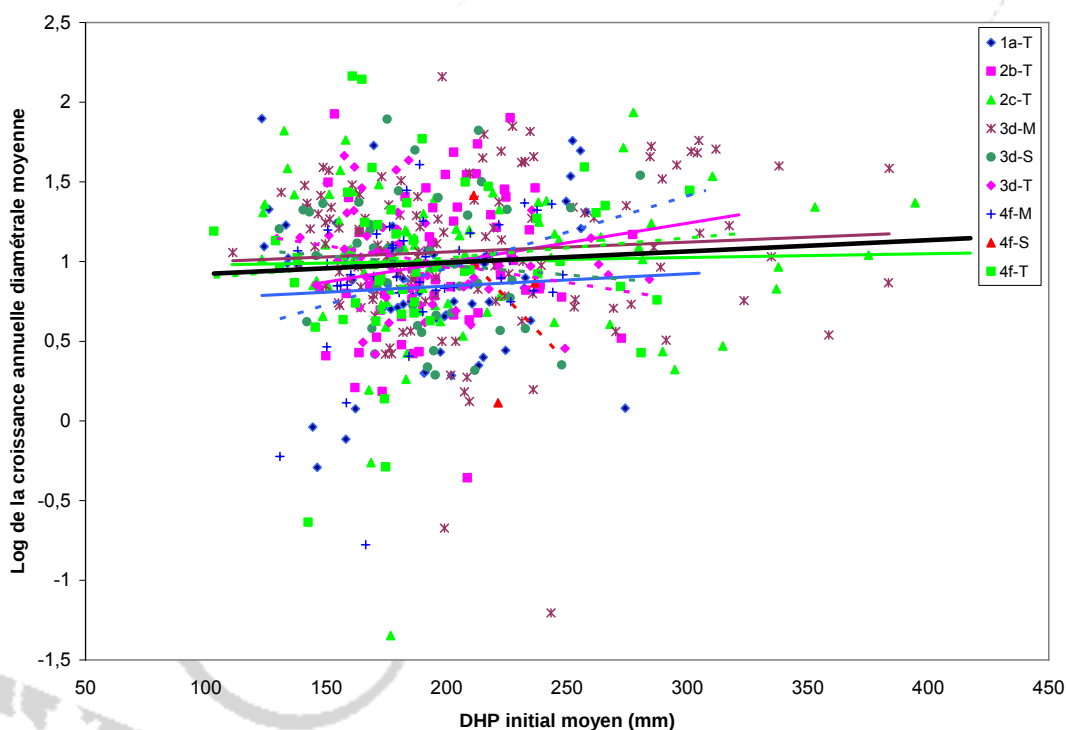


Figure 21. Log de l'accroissement moyen en DHP des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction du DHP initial moyen dans la parcelle par sous-région écologique

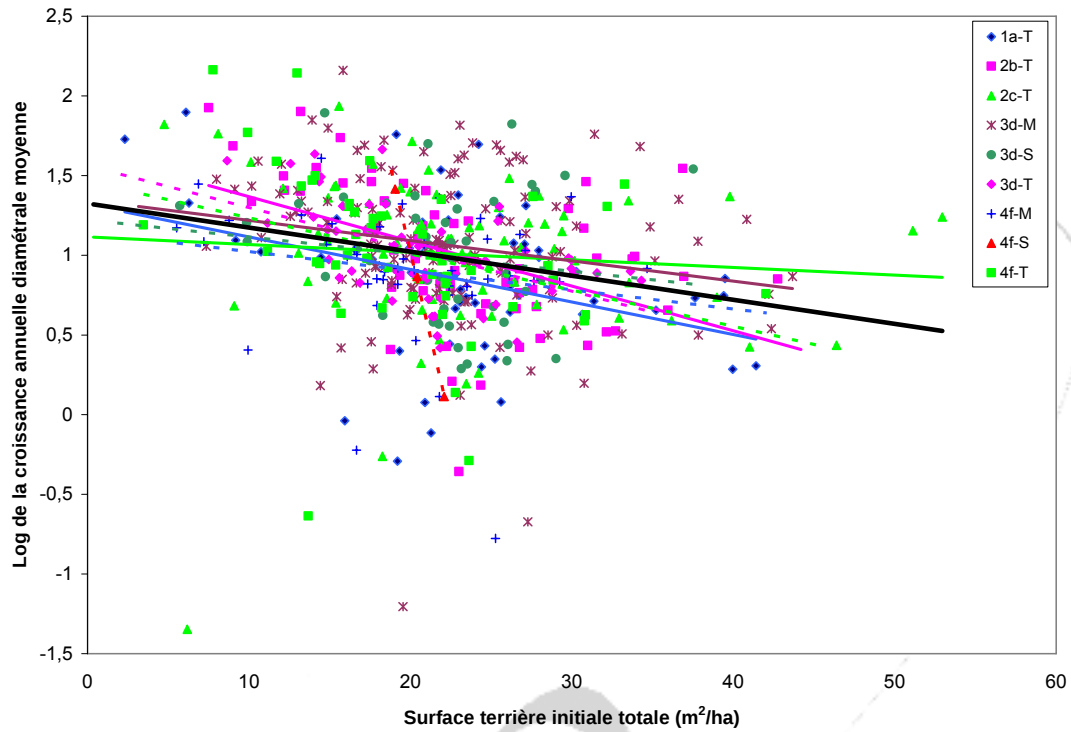


Figure 22. Log de l'accroissement moyen en DHP des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de la surface terrière totale dans la parcelle par sous-région écologique

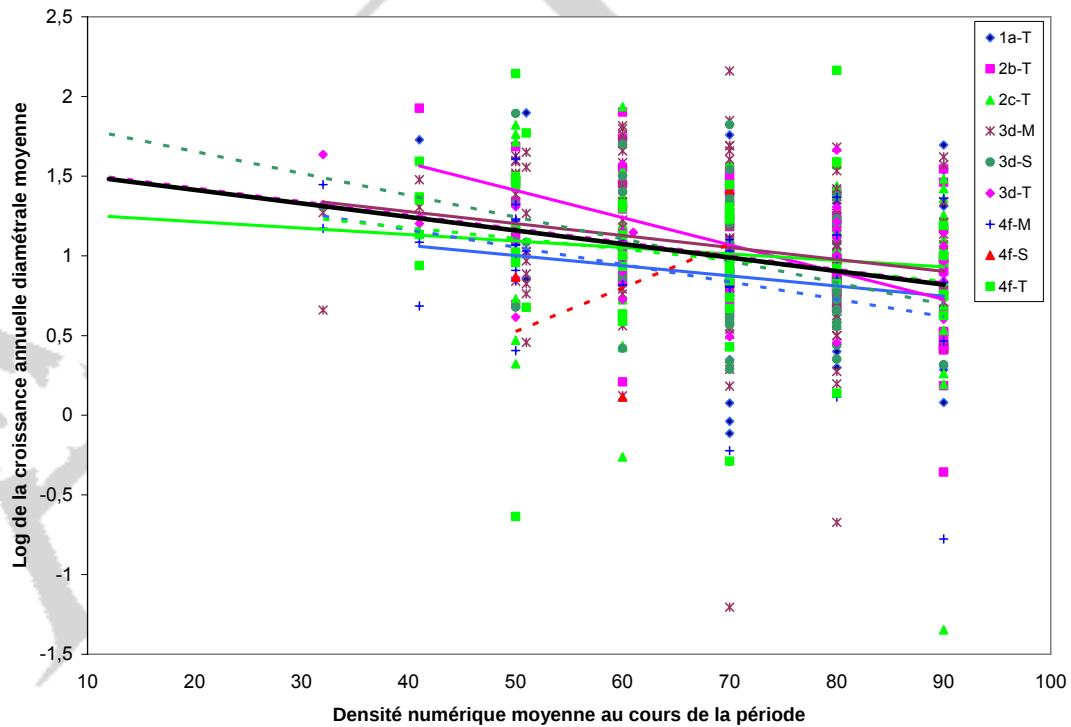


Figure 23. Log de l'accroissement moyen en DHP des autres essences que l'érable à sucre dans une même parcelle en fonction de la densité moyenne dans la parcelle par sous-région écologique

Pour vérifier les tendances décelées aux figures 21 à 23, nous avons ajouté au modèle précédent les autres variables qui pourraient expliquer la croissance des autres essences que l'érable à sucre, soit le DHP initial moyen de toutes les tiges de la parcelle (DHPM), la surface terrière initiale totale (STT) et la densité moyenne de la parcelle (DENSM). Contrairement à l'érable à sucre, ce ne sont pas tous les facteurs du modèle qui sont significatifs.

Enfin, nous avons ajouté au modèle les interactions entre « Région » et les variables « DHPM », « STT » et « DENSM » une à la fois. Aucune de ces interactions n'est ressortie significative au seuil de 5%, même si les figures 21 à 23 laissaient croire qu'il y aurait pu en avoir puisque certaines droites se croisent. Donc, le modèle retenu est celui avec les variables « Région », « Année », « Année * Région », « DHPM », « STT » et « DENSM » et on obtient les résultats présentés au tableau 25.

Tableau 25. Résultats de l'analyse de variance pour la croissance moyenne des arbres d'autres essences que l'érable à sucre par parcelle pour les cinq paramètres étudiés

	Résultats d'ANOVA			
	NDL (num)	NDL (dénom)	F	Pr > F
Région	7	270	2,13	0,0412
Année	1	270	1,60	0,2064
Année * Région	7	270	1,96	0,0613
DHPM	1	270	7,80	0,0056
STT	1	270	45,72	< 0,0001
DENSM	1	270	17,35	< 0,0001

Ici, contrairement à l'érable à sucre, le facteur « Région » est à la limite d'être non significatif ($p = 0,0412$), le facteur « Année » et l'interaction « Année * Région » ne sont plus significatifs, alors que les trois variables « DHPM », « STT » et « DENSM » sont significatives. Ce sont surtout les facteurs « STT » et « DENSM » (STT : $F = 45,72$, $NDL = (1, 270)$, $p < 0,0001$; DENSM : $F = 17,35$, $NDL = (1, 270)$, $p < 0,0001$) qui expliquent la croissance des autres essences. Le facteur « STT » était aussi important pour expliquer la décroissance de l'érable à sucre, mais ici il est prépondérant. On a observé à la figure 18 que la surface terrière dans les parcelles augmentait au cours du temps. On pourrait donc attribuer cette augmentation aux autres essences, puisqu'on observe une diminution de croissance pour l'érable à sucre. Les estimations des paramètres pour ce modèle sont présentées au tableau 26.

Tableau 26. Estimations des ordonnées à l'origine et des pentes de régression pour les arbres d'autres essences que l'érable à sucre pris par parcelle dans les huit sous-régions écologiques et estimation des pentes de régression moyennes pour le DHP moyen, la surface terrière totale et la densité moyenne des parcelles

Effet	Région	Estimé des paramètres				
		Estimé	Erreur type	NDL	T	Pr > t
Ordonnée à l'origine	1a-T	1,3243	0,1437	270	9,22	< 0,0001
	2b-T	1,5489	0,1464	270	10,58	< 0,0001
	2c-T	1,6580	0,1367	270	12,13	< 0,0001
	3d-M	1,5832	0,1349	270	11,74	< 0,0001
	3d-S	1,4810	0,1484	270	9,98	< 0,0001
	3d-T	1,6406	0,1375	270	11,93	< 0,0001
	4f-M	1,4231	0,1516	270	9,39	< 0,0001
	4f-T	1,5420	0,1614	270	9,55	< 0,0001
Pente des régressions	1a-T	0,00672	0,003403	270	1,98	0,0492
	2b-T	0,00078	0,003507	270	0,22	0,8233
	2c-T	-0,00531	0,003546	270	-1,50	0,1354
	3d-M	-0,00250	0,002910	270	-0,86	0,3916
	3d-S	-0,00186	0,005644	270	-0,33	0,7418
	3d-T	-0,00995	0,003634	270	-2,74	0,0066
	4f-M	-0,00152	0,004707	270	-0,32	0,7466
	4f-T	-0,00276	0,005368	270	-0,51	0,6080
DHPM	Toutes	0,00151	0,000541	270	2,79	0,0056
STT	Toutes	-0,02045	0,003025	270	-6,76	< 0,0001
DNSM	Toutes	-0,00519	0,001247	270	-4,17	< 0,0001

Les ordonnées à l'origine des droites de régression sont toutes significativement différentes de 0 ($Pr > |t| < 0,0001$ pour les huit sous-régions), ce qui signifie que la croissance annuelle moyenne n'était pas nulle au début de la période d'acquisition des données. La pente des droites de régression est négative pour six des huit sous-régions, mais seulement une parmi ces six est significativement différentes de 0 (sous-région 3d-T ($Pr > |t| = 0,0066$)). La pente des droites de régression des sous-régions 2c-T, 3d-M, 3d-S, 4f-M et 4f-T ne sont pas significativement différentes de 0, ($Pr > |t| > 0,10$). Donc, on ne peut pas affirmer que la croissance soit négative dans ces cinq sous-régions. Il y a aussi deux sous-régions où la des droites de régression est positive (1a-T et 2b-T) et celle de la sous-région 1a-T est significativement différente de 0 ($Pr > |t| = 0,0492$), alors que celle de la sous-région 2b-T n'est pas significativement différentes de 0 ($Pr > |t| = 0,8233$). Ces observations diffèrent de ce qui a été présenté pour l'érable à sucre, car ici la plupart des pentes ne sont pas significativement différentes de 0, alors qu'elles l'étaient pour l'érable à sucre.

La relation entre la log-croissance des autres arbres que l'érable à sucre et le DHP initial moyen de la parcelle (Figure 21) est positive (estimé = 0,00151) et significativement différentes de 0 ($Pr > |t| = 0,0056$), c'est-à-dire que plus le DHP est grand, plus la croissance est grande. Cette relation est la même pour les huit sous-régions écologiques puisque le terme d'interaction « Région * DHPM » n'est pas significatif, d'où la droite noire en trait épais généralisant l'ensemble des données. Cela va dans le même sens que pour l'érable à sucre (Tableau 20). Tel que suggéré par la figure 22, la log-croissance diminue avec la surface terrière initiale totale (estimé = -0,02045) et cette décroissance est significativement différentes de 0 ($Pr > |t| < 0,0001$). Elle est la même pour les huit sous-régions écologiques, puisque le terme d'interaction « Région * STT » n'est pas significatif (droite noire épaisse). Enfin, l'analyse révèle que la log-croissance des érables à sucre diminue avec la densité moyenne pour la période (estimé = -0,00519) tel que suggéré par la figure 23. Cette relation est significativement différentes de 0 ($Pr > |t| = 0,0001$) et est la même pour les huit sous-régions écologiques puisque le terme d'interaction « Région * DNSM » n'est pas significatif (droite noire épaisse).

4 CONCLUSION

Nous avons examiné les données de 265 parcelles échantillons permanentes du ministère des Ressources naturelles et la Faune du Québec, réparties dans dix sous-régions écologiques et couvrant la période de 1970 à 2003. Ces parcelles renfermaient des données utilisables de 3764 érables à sucre et 3739 arbres d'autres essences. La croissance diamétrale moyenne des érables à sucre depuis les trente dernières années dans les dix sous-régions écologiques étudiées varie de 1,58 à 3,73 mm par année. Ces valeurs minimale et maximale sont pour les sous-régions 3c-T et 4f-S respectivement. Toutefois, ces deux sous-régions étaient peu représentées dans notre base de données avec seulement 31 et 18 observations chacune. Si on s'intéresse plus particulièrement aux huit autres sous-régions suffisamment représentées, la croissance diamétrale moyenne varie de 1,93 à 3,12 mm par année. Ces valeurs minimale et maximale sont pour les sous régions 2b-T et 4f-M respectivement. Il n'a pas été possible de stratifier plus finement les résultats qu'au niveau des sous-régions écologiques, parce que les divers regroupements impliquant les dépôts et les classes de densité des peuplements auraient généré des ensembles trop petits pour être analysés statistiquement de façon adéquate.

Les simulations que nous avons faites ont démontré que les arbres de 20 cm de DHP pouvaient être complètement compartimentés après 25 à 30 ans d'exploitation et ces durées varient de 30 à 40 ans pour les arbres de 22 cm de DHP. Si les méthodes d'entaille réduisaient le diamètre et la profondeur des entailles, ces durées pourraient être allongées. Toutefois, nos simulations impliquaient un diamètre et une profondeur d'entaille de 7,9 et 63 mm respectivement. Cette profondeur d'entaille est actuellement recommandée avec le système de récolte sous vide par tubulure. On pourrait penser à entailler moins profondément, mais le problème du compartimentage complet surviendrait quelques années plus tard seulement.

On pourrait critiquer le modèle d'entaille présenté ici parce qu'il ne tient pas compte de la possibilité d'exploiter le tronc à diverses hauteurs. Toutefois, cette possibilité d'entailler plus haut ou plus bas que la méthode actuelle est réduite par la disposition du matériel de récolte (tubulure) qui est relativement fixe pour de longues période. De plus, il serait difficile d'entailler plus haut ou plus bas dans les arbres pour toutes sortes de raisons, comme l'épaisseur de neige au sol lors de l'entaille ou le besoin d'utiliser une échelle. Cela n'est pas réaliste sur une base opérationnelle. Advenant des changements technologiques qui permettraient d'entailler facilement plus haut ou plus bas, il ne faudrait pas négliger que notre modèle d'entaille n'a pas pris en compte les fusions possibles entre le bois compartimenté des nombreuses entailles au fil du temps. Donc, le problème pourrait être pire que ce que nous avons présenté. Comme la seule façon de contrebalancer le compartimentage est de stimuler la croissance diamétrale, il n'y a que des travaux sylvicoles qui pourraient y arriver.

Un examen supplémentaire des données utilisées dans ce projet nous a permis de mettre en évidence que la réduction de croissance des érables à sucre est une réalité et qu'elle se manifeste dans toutes les sous-régions écologiques étudiées depuis une trentaine d'années. Les analyses statistiques ont été assez cohérentes à ce sujet pour l'érable à sucre. Lorsque examiné au niveau des arbres, le facteur « Année » est toujours celui qui explique le plus la diminution de croissance de l'érable à sucre. Lorsque examiné au niveau des parcelles, le facteur « Année » est encore celui qui explique le plus de variance, mais d'autres facteurs viennent aussi expliquer la baisse de croissance de l'érable à sucre, comme la surface terrière totale, par exemple. Il s'en suit que les pentes des régressions de la croissance de l'érable à sucre dans le temps, bien que négatives pour toutes les régions, ne sont pas toujours significatives.

Les analyses statistiques sont moins cohérentes au sujet des essences compagnes de l'érable à sucre. Lorsque examiné au niveau des arbres, le facteur « Année » est encore celui qui explique le plus de variance. Par contre, bien que les pentes des relations de croissance soient négatives, plusieurs ne sont pas significatives. Lorsque examiné au niveau des parcelles, le facteur « Année » reste encore très significatif, mais les pentes des relations ne sont pas significatives. De plus, lorsqu'on ajoute au modèle des variables de parcelles, la surface terrière totale et la densité déclassent le facteur « Année » comme facteur majeur.

De façon générale, la diminution de croissance est plus accentuée pour l'érable à sucre que pour les autres essences, mais c'est dans la sous-région 1a-T que cette diminution est la moins prononcée. Puisque la surface terrière totale des parcelles augmente au fil du temps, il semble que cette augmentation profite plus aux essences compagnes qu'à l'érable à sucre.

Nous avons mené ce projet afin de calculer la quantité de bois sain qui pouvait être disponible dans les principales régions du Québec productrices de sirop d'érable. Ce projet est combiné avec un autre dans lequel nous faisons des manipulations expérimentales et le but des deux projets combinés est de vérifier si les normes actuelles d'entailage sont encore d'actualité. Ce deuxième projet est maintenant terminé et reprend la principale conclusion présentée ici, soit que la norme actuelle qui permet d'entailler des arbres de 20 cm au DHP est trop permissive et entraîne un compartimentage excessif qui limite la production à long terme. Nous référons le lecteur au rapport de l'autre volet de ce projet (Vers la formulation de nouvelles normes d'entailage pour conserver la production acéricole à long terme : Volet B : détermination du nombre d'entailles par arbre) pour une conclusion plus complète.

AFCEB

5 RÉFÉRENCES CITÉES

- ALLARD, G. B., BOUDREAULT, G. et RENAUD, J.-P. (1997). Modèle de simulation du rendement d'une entaille en fonction de différents paramètres physiques et physiologiques associés à l'entailage. *In* Les stress et la productivité de l'érable à sucre : De l'arbre au peuplement. Actes du colloque tenu à St-Hyacinthe les 11 et 12 novembre 1997. Centre Acer inc., éd. Pp.111-130.
- AUCLAIR, A. N. D. (2005). Patterns and general characteristics of severe forest dieback from 1950 to 1995 in the northeastern United States. *Can. J. For. Res.* 35 : 1342-1355.
- COMMISSION SUR L'AVENIR DE L'AGRICULTURE ET DE L'AGROALIMENTAIRE QUÉBÉCOIS. (2008). Agriculture et agroalimentaire québécois : assurer et bâtir l'avenir : rapport. 272 p.
- DUCHESNE, L., OUIMET, R. et HOULE, D. (2002). Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health, and soil nutrients. *J. Environ. Qual.* 31 : 1676–1683.
- DUCHESNE, L., OUIMET, R. et MORNEAU, C. (2003). Assessment of sugar maple health based on basal area growth pattern. *Can. J. For. Res.* 33 : 2074-2080.
- FÉDÉRATION DES PRODUCTEURS ACÉRIQUES DU QUÉBEC. (2005a). Dossier économique 2004.
- FÉDÉRATION DES PRODUCTEURS ACÉRIQUES DU QUÉBEC. (2005b). Dossier économique 2005.
- FÉDÉRATION DES PRODUCTEURS ACÉRIQUES DU QUÉBEC. (2006). Dossier économique 2006.
- FÉDÉRATION DES PRODUCTEURS ACÉRIQUES DU QUÉBEC. (2007). Dossier économique 2007.
- FÉDÉRATION DES PRODUCTEURS DE BOIS DU QUÉBEC ET MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC. (1995). Zones d'accroissement en diamètre par essence au Québec. 17 p + annexes.
- FORTIN, M., GRENIER, Y. et ALLARD, G. B. (2008). Modèle de simulation du rendement d'une entaille en fonction de différents paramètres physiques et physiologiques associés à l'entailage. Soumis pour publication dans la Revue canadienne de recherches forestières.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC. (1999). Manuel de mise en valeur des forêts privées. + Document d'annexes. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction des communications, ISBN 2-550-34699-8.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC. (2004). Règlement sur les permis de culture et d'exploitation d'érablière dans les forêts du domaine de l'État. *Gazette Officielle* 2, p. 3734.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC. (2006). Normes d'inventaire forestier – Parcelles-échantillons permanentes. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers.
- GRENIER, Y. (2008a). Compte-rendu de la réunion tenue à Québec le 16 janvier 2008 réunissant quelques chercheurs de la Direction de la recherche forestière et de la Direction de l'environnement et de la protection des forêts.
- GRENIER, Y. (2008b). Compte-rendu de la réunion tenue à Québec le 21 janvier 2008 réunissant quelques chercheurs de la Direction de la recherche forestière.
- HOUSTON, D.R., ALLEN, D.C. et LACHANCE, D. (1990). Aménagement de l'érablière : guide de protection de la santé des arbres. Forêts Canada, Rapport d'information LAU-X-92F.

LABRECQUE, P., NOLET, P. et LESAGE, G. (2006). Projet Sylviculture par objectifs 2005-2006. Rapport technique. MC Forêt inc., Labelle, 114 p.

SAUCIER, J.-P., BERGERON, J.-F., GRONDIN, P. et ROBITAILLE, A. (1998). Les régions écologiques du Québec méridional (3^e version). L'Aubelle, suppl. février-mars 1998. Pp. 1-12.

