

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1 Données météorologiques

Les deux sites à l'étude sont caractérisés par des conditions climatiques plutôt défavorables, typiques de la forêt boréale, avec une température annuelle froide et une courte période de végétation. Au cours des années 2004, 2005 et 2006, les $T_{moy.}$ annuelles ont été respectivement de 1.0 °C, 2.3 °C et 3.3 °C et les précipitations totales annuelles ont été respectivement de 1423 mm, 822 mm et 707 mm (figure 5). Au cours de l'année, la température de l'air augmente à partir des mois d'avril et de mai et commence à diminuer à partir de la fin du mois d'août. Durant les années 2004, 2005 et 2006, les $T_{moy.}$ des mois d'avril et de mai, qui correspondent à la période où il y a l'initiation de l'activité cambiale, ont été respectivement de 3.30 °C, 4.76 °C et 6.20 °C. Au cours des trois années d'étude, la $T_{moy.}$ annuelle a donc été de 2.20 °C et les précipitations totales annuelles ont été de 984 mm. À quelques reprises, il y avait présence de neige au sol lors des premiers jours d'échantillonnages.

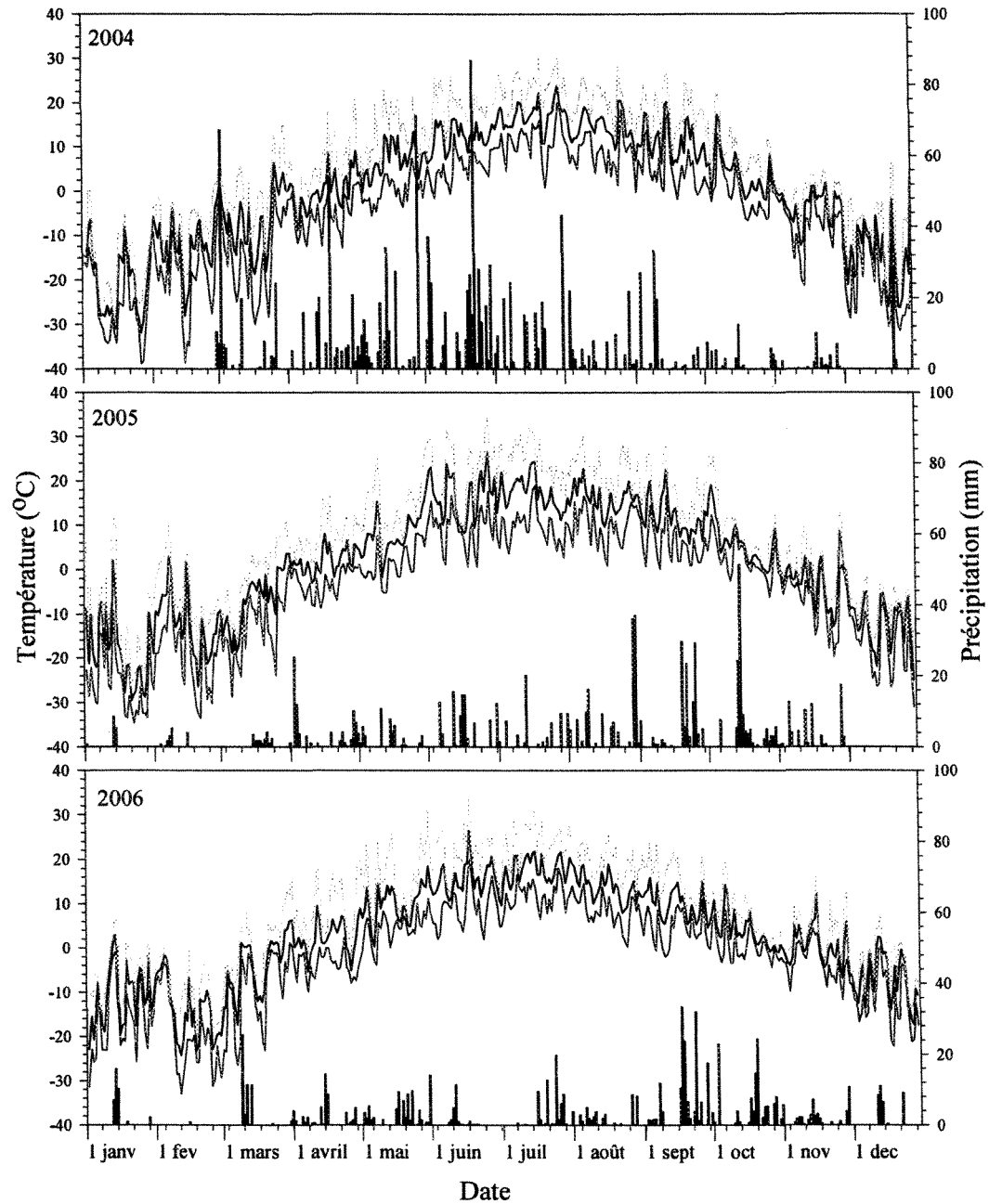


Figure 5 : Tmin. (courbe grise foncée), Tmoy. (courbe noire), Tmax. (courbe grise pâle) et précipitation (barres verticales) enregistrées à la station d'enseignement et de recherche du lac Simoncouche au cours des années 2004 à 2006.

3.2 Nombre de trachéides totales du xylème

Dans le but d'effectuer une comparaison de l'activité cambiale et de la xylogénèse entre les tiges et les racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana*, une caractérisation générale a été réalisée afin de décrire en détail le développement de la production du xylème par le cambium vasculaire. Le nombre de trachéides produites par le cambium vasculaire des racines a été significativement plus élevé que celui des tiges ($P= 0.0007$, tableau 3) (figure 6). De même, le nombre moyen de trachéides par cerne est plus élevé chez *Abies balsamea* comparativement à ce qui est retrouvé chez *Picea mariana* ($P= 0.0124$, tableau 3). Chez *Abies balsamea*, le nombre de trachéides par cerne au niveau des racines se situe à environ 50 cellules tandis que, dans les tiges, le nombre se situe à environ 43 cellules. Chez *Picea mariana*, le nombre moyen de trachéides par cerne au niveau des racines se situe à environ 47 cellules tandis que, dans les tiges, le nombre se situe à environ 24 cellules. Aucune différence significative n'a été observée dans le nombre de trachéides produites dans les cernes des deux espèces entre les trois années consécutives d'échantillonnage. Néanmoins, les résultats démontrent que l'écart type est beaucoup plus élevé au niveau du nombre de trachéides dans les cernes du système racinaire versus ceux de la tige.

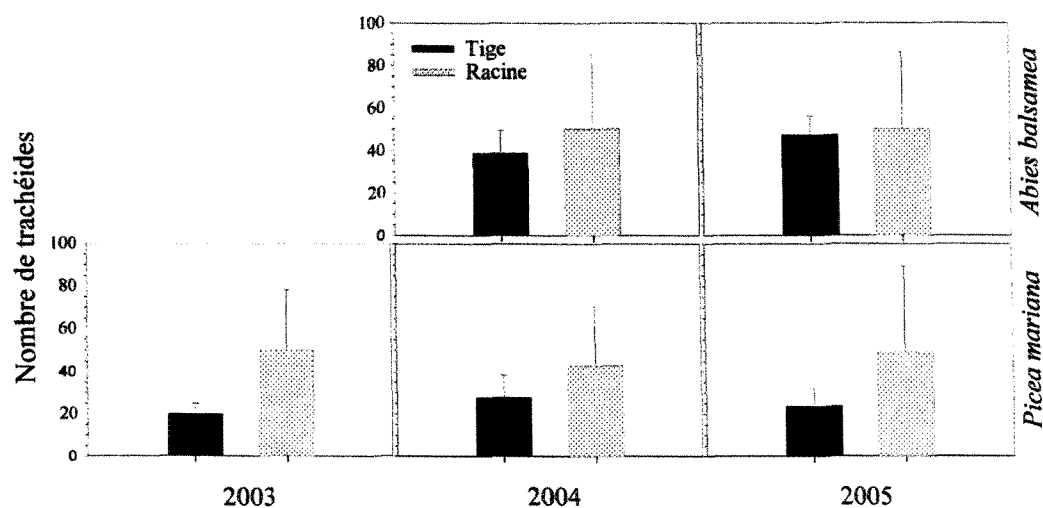


Figure 6 : Nombre de trachéides totales dans le xylème des tiges et des racines chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* en 2003, 2004 et 2005. Les barres verticales représentent l'écart type.

Tableau 3 : Analyse de variance multi facteurs (ANOVA, $P= 0,05$) pour le nombre de trachéides totales dans le xylème des tiges et des racines (parties) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* (espèces) en 2003, 2004 et 2005 (années).

Source	dl	Variance	F	P
Modèle	9	1367,54	2,79	0,0053
Erreur	120	490,56		
Source	dl	Variance	F	P
Espèce	1	3158,54	6,44	0,0124
Partie	1	5946,96	12,12	0,0007
Espèce*Partie	1	1136,19	2,32	0,1307
Année	2	85,51	0,17	0,8402
Espèce*Année	1	67,64	0,14	0,7110
Partie*Année	2	103,24	0,21	0,8105
Espèce*Partie*Année	1	610,97	1,25	0,2667

3.3 Zone cambiale

Un patron similaire du nombre de cellules dans la zone cambiale est observable de 2004 à 2006 au niveau des tiges et des racines chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* (figure 7). Dans les périodes de dormance, caractérisées par l'absence de division cellulaire (durant l'automne jusqu'au début du printemps), le cambium vasculaire des deux espèces et des deux parties se limite à 4 ou 5 cellules inactives (voir la ligne horizontale pointillée de la figure 7). De façon générale, l'activité cambiale est relativement faible au début de la saison de végétation (vers la fin mai) mais s'accélère rapidement. À ce moment, il commence à y avoir plus de divisions cellulaires périclinales et de production de nouvelles cellules dans le xylème et le phloème par le cambium vasculaire. En forte période de production de cellules (optimum du mois de juin jusqu'à la mi-juillet), il est possible d'observer en moyenne 7 à 9 cellules au niveau de la zone cambiale. Avant même le début de l'apparition de trachéides en élargissement radial dans le xylème (zone grise de la figure 7), il y a déjà une augmentation du nombre de cellules dans la zone cambiale. Dans la plupart des cas, le nombre de cellules dans la zone cambiale lors des premiers jours d'échantillonnage est déjà plus élevé que le seuil minimum retrouvé en période de dormance. Par exemple, chez les racines d'*Abies balsamea* en 2005 et en 2006, on retrouve environ 6 ou 7 cellules dans la zone cambiale durant les premiers jours du mois de mai. Après la mi-juillet, le nombre de cellules dans la zone cambiale diminue jusqu'à l'obtention d'un seuil correspondant à environ 5 cellules chez le sapin baumier et entre 4 et 5 cellules chez l'épinette noire. À partir de ce moment, le cambium vasculaire est en dormance et le

nombre de cellules présentes demeurera constant jusqu'à l'éveil cambial du printemps suivant. Dans les racines, le patron semble beaucoup plus variable que dans les tiges.

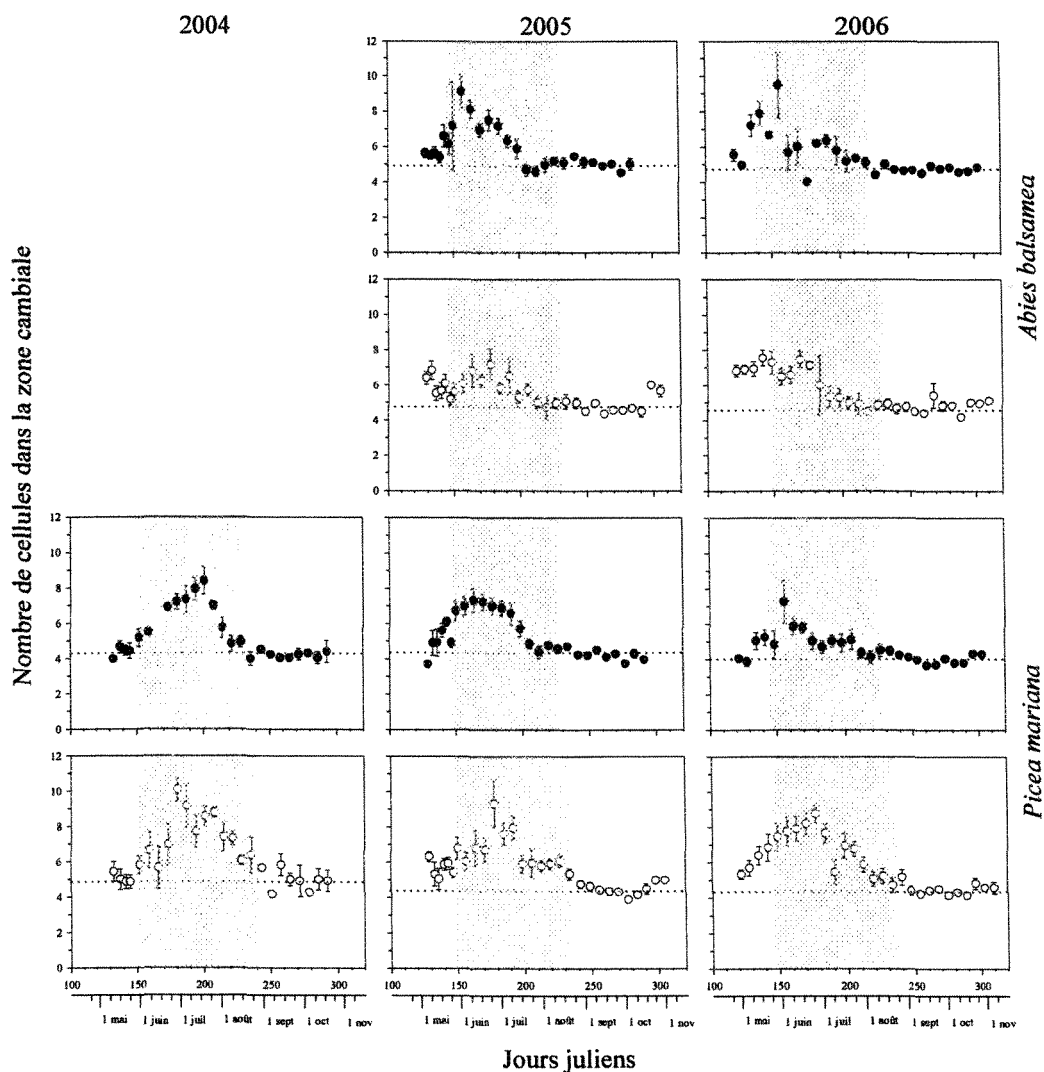


Figure 7 : Nombre de cellules observées dans la zone cambiale des tiges (●) et des racines (○) d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006. Les barres verticales représentent l'erreur type, tandis que les lignes horizontales pointillées correspondent au nombre de cellules dans la zone cambiale en période de dormance. La période où il y a production et élargissement radial de trachéides dans le xylème est marquée en gris.

3.4 Xylogénèse

3.4.1 Trachéïdes en élargissement radial

Le nombre de trachéïdes classifiées en phase d'élargissement radial dans le xylème au niveau des tiges et des racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* au cours des années 2004 à 2006 présente des patrons en forme de "cloche" (figure 8). La production de trachéïdes du xylème débute simultanément entre les tiges et les racines à la fin du mois de mai. Dans les deux parties, cette phase de la xylogénèse se poursuit jusqu'à la fin du mois d'août mais se prolonge d'environ 10 jours chez les racines. La période optimale de production de trachéïdes, au niveau des tiges, survient au cours du mois de juin et se poursuit jusqu'à la mi-juillet. Durant cette période, il est possible d'observer en moyenne 3 ou 4 cellules en cours d'élargissement radial dans le cerne des tiges en formation avec un nombre maximal de 5 cellules à la fin juin chez *Picea mariana* en 2004 et 2005. Après cette période, la division cellulaire au sein du cambium vasculaire commence à ralentir et le nombre de trachéïdes produites diminue de façon graduelle. Pour les racines, la période de l'année où l'on retrouve le nombre le plus élevé de trachéïdes en phase d'élargissement radial survient durant tout le mois de juillet. Tout comme au niveau des tiges, il est possible d'observer un nombre maximal de 3 ou 4 cellules dans cette phase de la xylogénèse. Dans les racines, il y a toutefois présence de trachéïdes en élargissement radial plus tardivement dans la saison de végétation comparativement aux tiges : la production de cellules s'y prolonge jusqu'au mois de septembre.

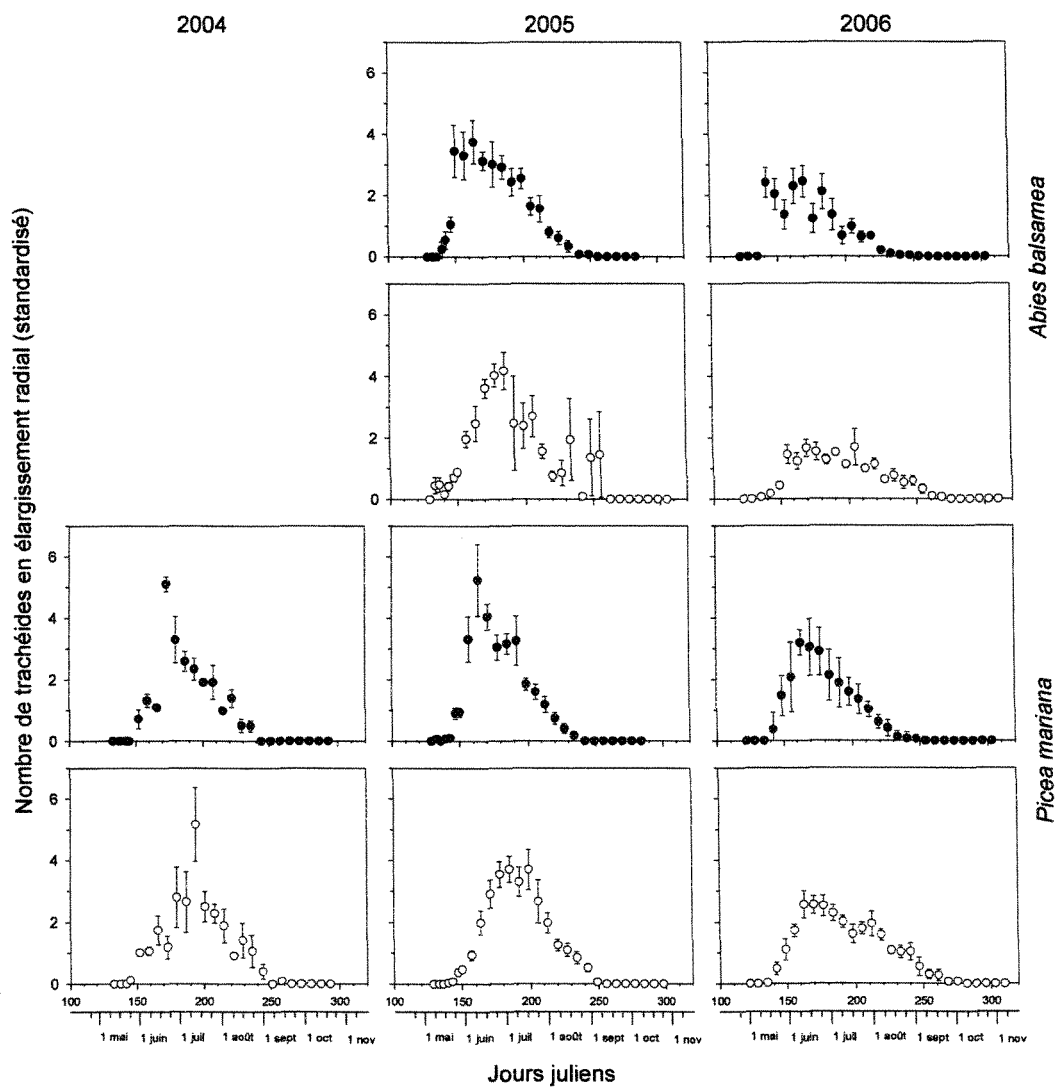


Figure 8 : Nombre de trachéides observées en élargissement radial (standardisé) dans les tiges (●) et les racines (○) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006. Les barres verticales représentent l'erreur type.

Le début, la fin (figure 9A) et la durée (figure 9B) moyens de la production de trachéides du xylème des tiges et des racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* ont été analysés au cours des saisons de végétation 2004, 2005 et 2006. Le début de la production de trachéides du xylème, qui correspond à la terminaison de la période de dormance, a débuté en même temps entre les tiges et les racines ($P= 0.1117$, tableau 4), entre *Abies balsamea* et *Picea mariana* ($P= 0.0721$, tableau 4) et au cours des saisons de végétation 2004, 2005 et 2006 ($P= 0.1436$, tableau 4). Cependant, il est possible de détecter un effet en ce qui concerne l'interaction espèce-partie-année dans le modèle lors de l'analyse de variance multi facteurs ($P= 0.0260$, tableau 4). Dans tous les cas, l'élargissement radial des cellules a débuté à la fin du mois de mai (du 19 au 31 mai) au cours des trois saisons de végétation. L'erreur type et l'écart type (valeurs non présentées) sont généralement plus variables au niveau des racines comparativement aux tiges. La fin de la production de trachéides au niveau du xylème s'est produit plus tardivement dans les racines comparativement aux tiges ($P= 0.0031$, tableau 4). Cependant, on observe aucune différence significative entre *Abies balsamea* et *Picea mariana*, de même qu'entre les années 2004 à 2006. Le cambium vasculaire des tiges débute sa dormance entre le 8 et le 21 août tandis que le cambium vasculaire des racines débute sa dormance entre le 18 et le 29 août chez les deux espèces. Ces résultats mettent en évidence une différence moyenne d'environ 10 jours entre les deux parties pour ce qui concerne l'arrêt de la production de cellules trachéides dans le xylème. La durée moyenne de la production de trachéides par le cambium vasculaire au niveau des tiges a été d'environ 82 jours et celle des racines a été d'environ 88 jours ($P= 0.0888$, tableau 4) (figure 9B).

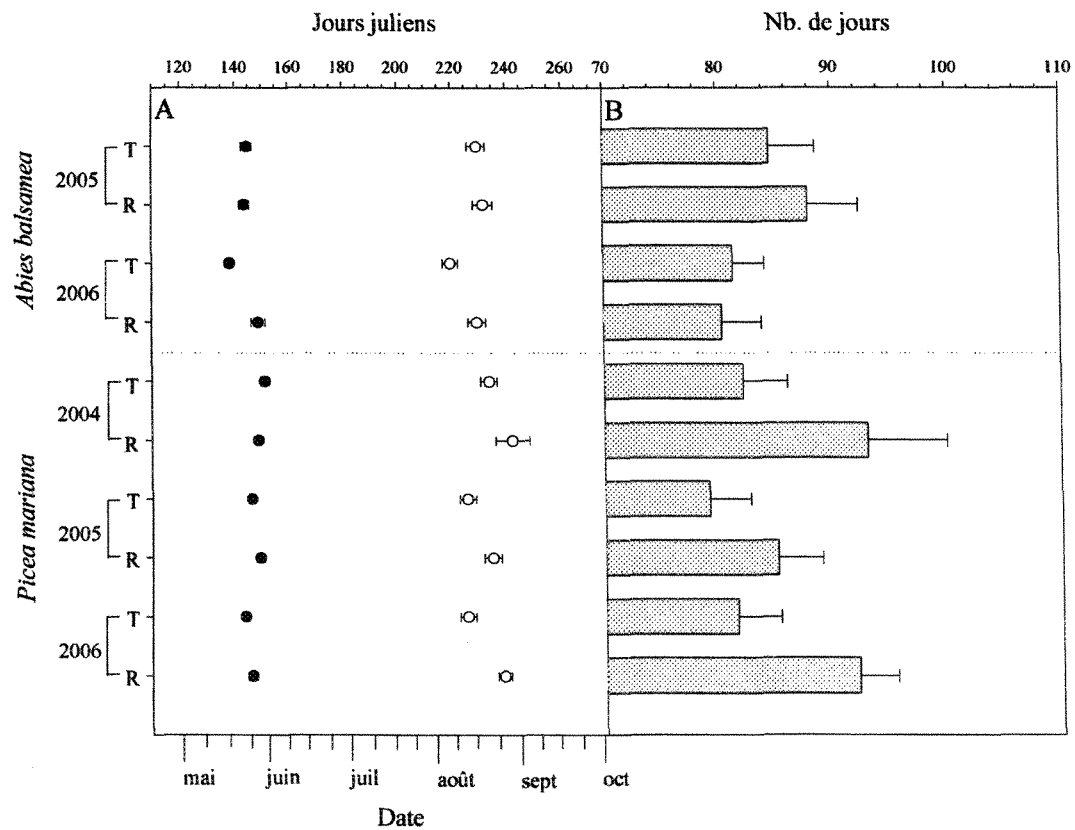


Figure 9 : A - Début (●), fin (○) et B - durée de l'élargissement radial des trachéides d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana*. Les barres horizontales représentent l'erreur type. T = tige et R = racine.

Tableau 4 : Analyse de variance multi facteurs (ANOVA, $P= 0,05$) pour le début, la fin et la durée moyens de l'observation de trachéides du xylème classifiées en élargissement radial dans les tiges et les racines (parties) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* (espèces) en 2004, 2005 et 2006 (années).

Source	dl	Variance	F	P
Début				
Modèle	9	143,69	3,07	0,0025
Erreur	114	46,81		
Fin				
Modèle	9	430,85	2,94	0,0036
Erreur	114	146,48		
Durée				
Modèle	9	262,67	1,19	0,3107
Erreur	114	221,50		
Source	dl	Variance	F	P
Début				
Espèce	1	154,25	3,29	0,0721
Partie	1	120,32	2,57	0,1117
Espèce*Partie	1	23,81	0,51	0,4772
Année	2	92,42	1,97	0,1436
Espèce*Année	1	22,58	0,48	0,4887
Partie*Année	2	130,87	2,80	0,0653
Espèce*Partie*Année	1	238,30	5,09	0,0260
Fin				
Espèce	1	283,52	1,94	0,1669
Partie	1	1333,48	9,10	0,0031
Espèce*Partie	1	169,57	1,16	0,2842
Année	2	244,43	1,67	0,1931
Espèce*Année	1	442,50	3,02	0,0849
Partie*Année	2	115,65	0,79	0,4565
Espèce*Partie*Année	1	17,22	0,12	0,7323
Durée				
Espèce	1	19,52	0,09	0,7671
Partie	1	652,68	2,95	0,0888
Espèce*Partie	1	320,47	1,45	0,2315
Année	2	41,89	0,19	0,8279
Espèce*Année	1	665,02	3,00	0,0858
Partie*Année	2	7,17	0,03	0,9681
Espèce*Partie*Année	1	127,40	0,58	0,4498

3.4.2 Trachéides en formation des parois secondaires (lignification)

Les patrons du nombre de trachéides classifiées en formation des parois secondaires (ou lignification) au niveau des tiges et des racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana*, au cours des années 2004, 2005 et 2006, suivent une courbe en forme de "cloche" (figure 10). L'initiation de la lignification des trachéides du xylème débute en premier lieu dans les tiges. Au cours de la saison, le nombre de trachéides en lignification dans les tiges atteint un plateau à partir du mois de juillet. Ce plateau demeure constant durant près de deux mois. Pendant cette période, il est possible d'observer en moyenne 10 à 12 cellules en cours de lignification chez *Abies balsamea* et 6 à 8 cellules chez *Picea mariana* (figure 10). Par la suite, le nombre de cellules dans cette phase de xylogenèse commence à diminuer progressivement pour se terminer vers la fin du mois de septembre. Au niveau des racines, le patron du nombre de cellules en lignification est différent de celui des tiges. Après l'apparition des premières cellules lignifiées, la courbe du nombre de cellules augmente graduellement et progressivement au cours de la saison de végétation pour atteindre un maximum entre la fin du mois d'août et le début du mois de septembre. Chez *Abies balsamea*, le nombre maximal a été d'environ 8 à 10 cellules en 2005 et 10 à 12 cellules en 2006. Chez *Picea mariana*, le nombre maximal a été d'environ 5 à 6 cellules en 2004 et 2005 et d'environ 12 cellules en 2006. La fin de la lignification, correspondant à la dernière phase de la xylogenèse, a eu lieu entre la fin du mois de septembre et le début du mois d'octobre chez les racines. D'autre part, il y a une plus grande variabilité concernant le nombre de cellules en lignification au niveau du système racinaire en comparaison avec les tiges.

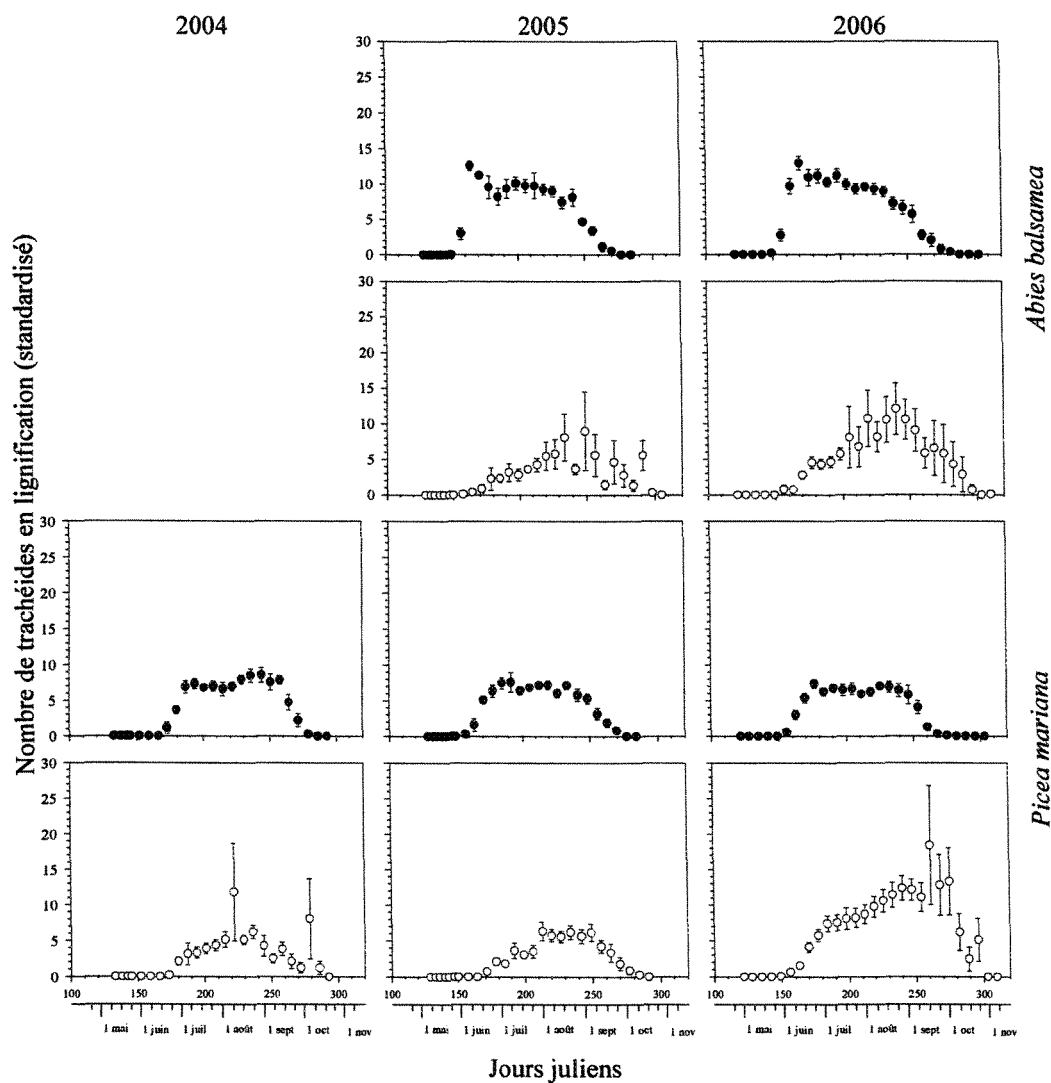


Figure 10 : Nombre de trachéides observées en lignification (standardisé) dans les tiges (●) et les racines (○) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006. Les barres verticales représentent l'erreur type.

Le début, la fin (figure 11A) et la durée (figure 11B) moyens de l'observation de trachéides du xylème classifiées en phase de formation des parois secondaires des tiges et des racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* ont été analysés au cours des saisons de végétations 2004, 2005 et 2006. Bien qu'il n'y a pas eu de différences significatives dans le début de la formation des parois secondaires des premières trachéides entre *Abies balsamea* et *Picea mariana* ($P= 0.8119$, tableau 5), on observe des différences significatives entre les tiges et les racines ($P < 0.0001$, tableau 5) de même qu'entre les saisons de végétation 2004, 2005 et 2006 ($P= 0.0006$, tableau 5). Les racines débutent leur lignification plus tard que les tiges. Des différences significatives ont aussi été notées dans l'interaction espèce-partie ($P= 0.0290$, tableau 5) ainsi que dans l'interaction partie-année ($P= 0.0302$, tableau 5). Au niveau des tiges, le début moyen de cette phase de xylogénèse se situe vers le 7 juin, tandis que celui du système racinaire se situe plus tard, soit vers le 19 juin (figure 11A). Cependant, les premières cellules qui entrent en lignification apparaissent le 1^{er} juin dans les tiges et le 9 juin dans les racines. La variabilité entre les racines d'un individu et entre les individus est plus grande que chez la tige (non visible dans la figure 11A). La fin de la lignification des trachéides, a été similaire entre les tiges et les racines ($P= 0.1365$, tableau 5), entre *Abies balsamea* et *Picea mariana* ($P= 0.2377$, tableau 5) mais différente d'année en année ($P= 0.0023$, tableau 5). Des différences significatives ont aussi été notées dans l'interaction espèce-partie ($P= 0.0317$, tableau 5), ainsi que dans l'interaction parties et années ($P= 0.0339$, tableau 5). Au niveau des tiges, la période moyenne d'arrêt de cette phase de xylogénèse se situe vers le 26 septembre, tandis que celle du système racinaire se situe vers le 2 octobre. Aucune différence significative n'a été notée dans la durée de la

lignification des trachéides entre *Abies balsamea* et *Picea mariana* ($P= 0.4780$, tableau 5) ainsi qu'entre les tiges et les racines ($P= 0.0558$, tableau 5). Bien que la durée de la lignification semble avoir été similaire dans les tiges de *Picea mariana* au cours des trois années consécutives, celle-ci s'est avérée plus variable dans les racines (figure 11B). Chez le sapin baumier, la lignification a duré sensiblement le même temps dans les tiges au cours des deux années mais a été plus variable dans les racines. C'est durant la saison de végétation 2005, que la lignification a été la plus courte chez *Abies balsamea* et *Picea mariana*. La durée moyenne de la lignification des parois secondaires au niveau des tiges a été d'environ 111 jours, tandis que celle des racines a été d'environ 106 jours. Cependant, la durée de cette phase de xylogénèse n'a pas été similaire durant les années 2004, 2005 et 2006 ($P= 0.0009$, tableau 5) avec, respectivement, des valeurs d'environ 108 jours, 102 jours et 116 jours.

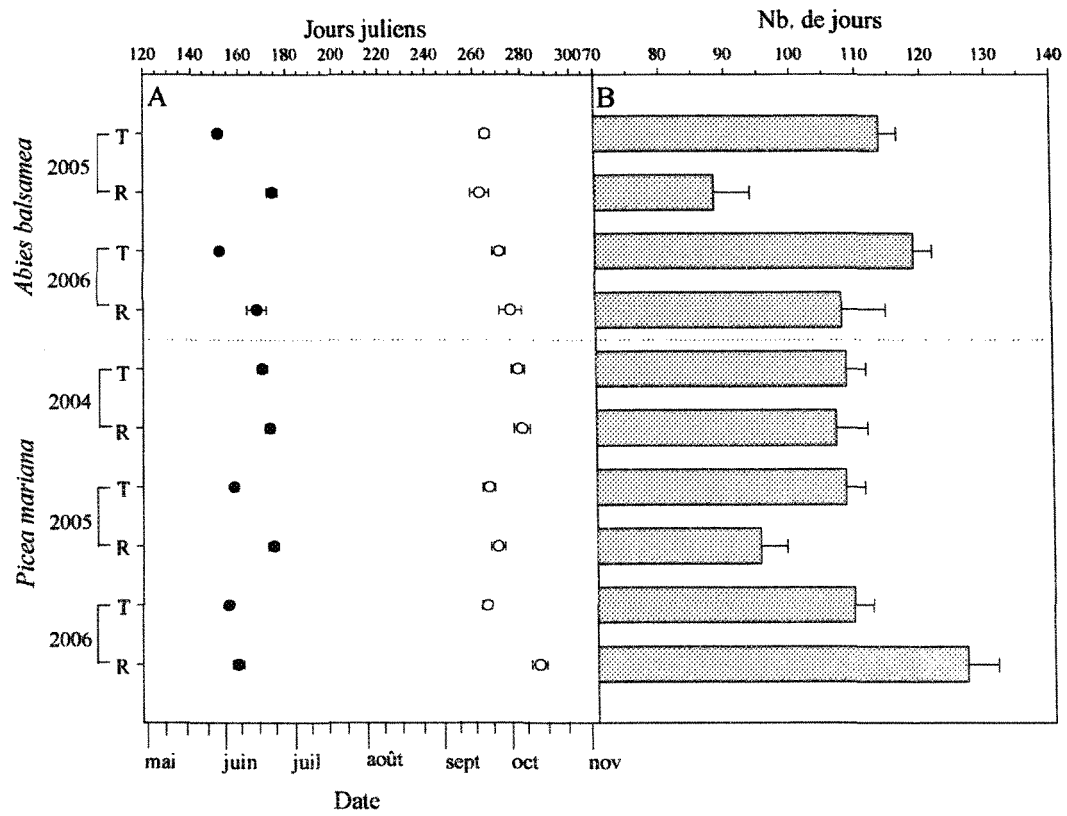


Figure 11 : A - Début (●), fin (○) et B – durée de la formation des parois secondaires des trachéides d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006. Les barres horizontales représentent l'erreur type. T = tige et R= racine.

Tableau 5 : Analyse de variance multi facteurs (ANOVA, $P= 0,05$) pour le début, la fin et la durée moyens de l'observation de trachéides du xylème en formation des parois secondaires dans les tiges et les racines (parties) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* (espèces) en 2004, 2005 et 2006 (années).

Source	dl	Variance	F	P
Début				
Modèle	9	1032,16	9,94	<0,0001
Erreur	114	103,80		
Fin				
Modèle	9	803,46	4,47	<0,0001
Erreur	114	179,75		
Durée				
Modèle	9	1981,37	5,52	<0,0001
Erreur	114	358,67		
Source	dl	Variance	F	P
Début				
Espèce	1	5,91	0,06	0,8119
Partie	1	3214,76	30,97	<0,0001
Espèce*Partie	1	507,52	4,89	0,0290
Année	2	823,98	7,94	0,0006
Espèce*Année	1	189,39	1,82	0,1794
Partie*Année	2	374,72	3,61	0,0302
Espèce*Partie*Année	1	50,98	0,49	0,4848
Fin				
Espèce	1	253,22	1,41	0,2377
Partie	1	404,15	2,25	0,1365
Espèce*Partie	1	850,07	4,73	0,0317
Année	2	1154,46	6,42	0,0023
Espèce*Année	1	9,16	0,05	0,8218
Partie*Année	2	626,66	3,49	0,0339
Espèce*Partie*Année	1	189,93	1,06	0,3062
Durée				
Espèce	1	181,79	0,51	0,4780
Partie	1	1339,21	3,73	0,0558
Espèce*Partie	1	2671,24	7,45	0,0074
Année	2	2676,63	7,46	0,0009
Espèce*Année	1	115,24	0,32	0,5719
Partie*Année	2	1644,81	4,59	0,0121
Espèce*Partie*Année	1	437,73	1,22	0,2716

3.4.3 Trachéides matures

Le nombre de trachéides matures dans le xylème au niveau des tiges et des racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* au cours des années 2004 à 2006 suit le patron d'une courbe sigmoïde (figure 12). Au niveau des tiges, il est possible d'observer les premières trachéides matures à la fin du mois de juin, tandis qu'au niveau des racines, la majeure partie des premières cellules matures apparaît au début du mois de juillet. Par la suite, le nombre de trachéides matures augmente jusqu'à l'atteinte d'un plateau au mois de septembre dans les tiges et au début du mois d'octobre dans les racines. Cependant, cette augmentation est plus lente et progressive dans les racines. Le nombre final de trachéides matures varie aussi entre les différents facteurs (espèces, parties et années). Dans les tiges, on observe un nombre maximal d'environ 40 cellules matures chez *Abies balsamea* (en 2005 et 2006) et d'environ 20 cellules matures chez *Picea mariana* (en 2004, 2005 et 2006). Dans les racines le nombre de cellules par cerne est beaucoup plus variable que dans les tiges. Chez *Abies balsamea*, le nombre maximal a été d'environ 40 à 50 cellules matures en 2005 et 2006 et chez *Picea mariana*, d'environ 40 cellules en 2004 et 2005 et d'environ 60 cellules en 2006. À partir de ce moment, toutes les trachéides du cerne ont complétées leur xylogénèse et possèdent leur paroi cellulaire finale.

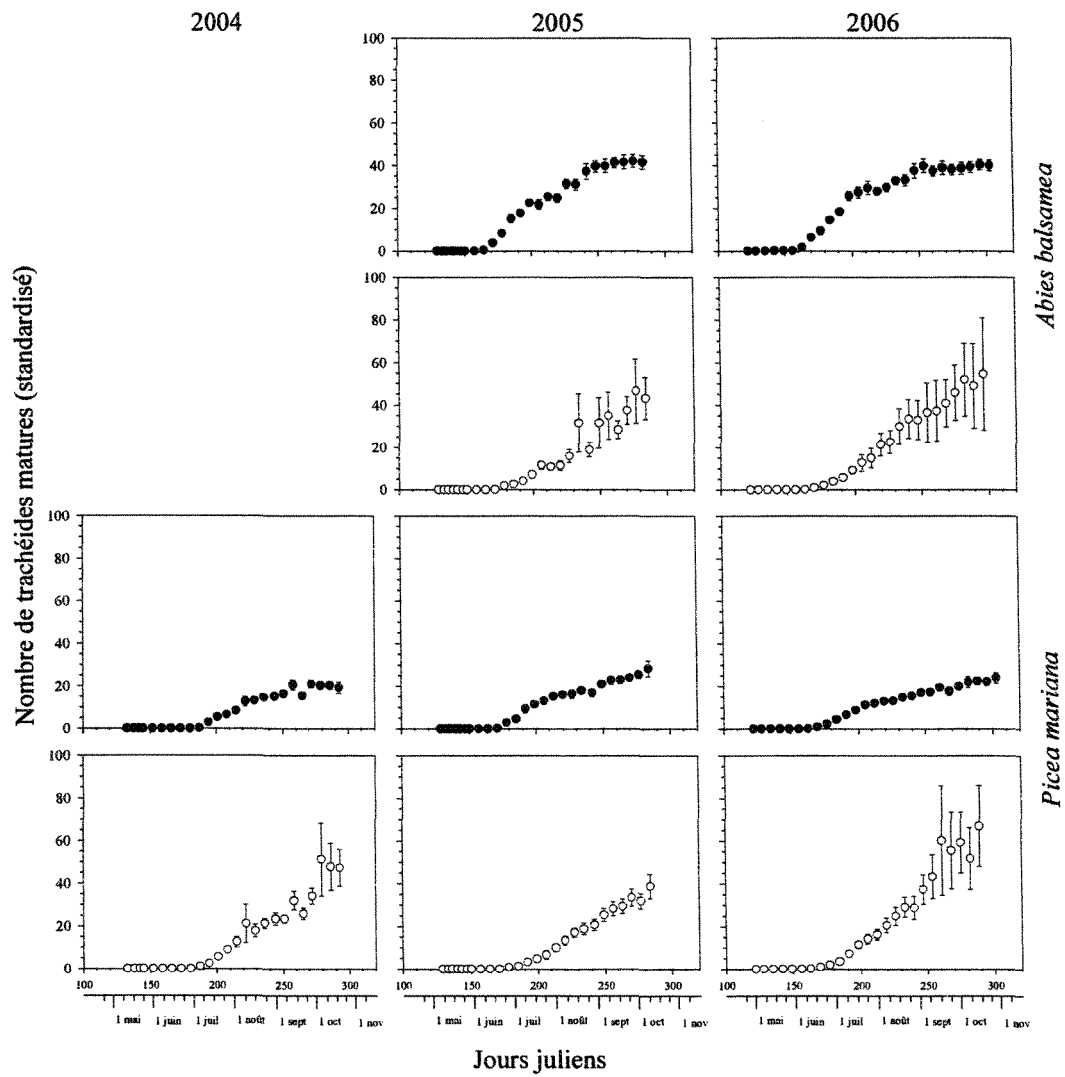


Figure 12 : Nombre de trachéides matures observées (standardisé) dans les tiges (●) et les racines (○) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006. Les barres verticales représentent l'erreur type.

3.4.4 Trachéides totales

Les patrons du nombre de trachéides totales du xylème au niveau des tiges et des racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* au cours des années 2004 à 2006 prennent la forme d'une courbe sigmoïde (figure 13). En général, l'activité cambiale est relativement faible au début (à la fin du mois de mai); s'accroît quelques semaines plus tard (croissance exponentielle au milieu de la saison de végétation) et diminue de façon graduelle à la fin de la période de croissance. Cependant, il y a une différence entre les tiges et les racines pendant la phase exponentielle qui survient à la mi-saison. Durant le mois de juin et ce, jusqu'à la mi-juillet, le nombre de trachéides augmente considérablement dans le xylème des tiges comparativement aux racines où le nombre de cellules augmente jusqu'à la fin du mois d'août. Par la suite, le nombre de trachéides produit diminue jusqu'à l'atteinte d'un plateau au début du mois d'août dans les tiges et à la fin du mois d'août dans les racines. Ce phénomène signifie que l'activité cambiale commence à ralentir et qu'il y a cessation dans la production de trachéides au sein du xylème. À la mi-juillet, près de 75 à 80% des trachéides du xylème des tiges sont déjà formées, comparativement à environ 50% des trachéides du xylème des racines. Après l'atteinte de ce plateau, le nombre de trachéides totales demeure relativement stable avec quelques variations (diminution ou augmentation) qui s'expliquent par la croissance hétérogène du cambium vasculaire au sein de la circonférence du tronc et des racines.

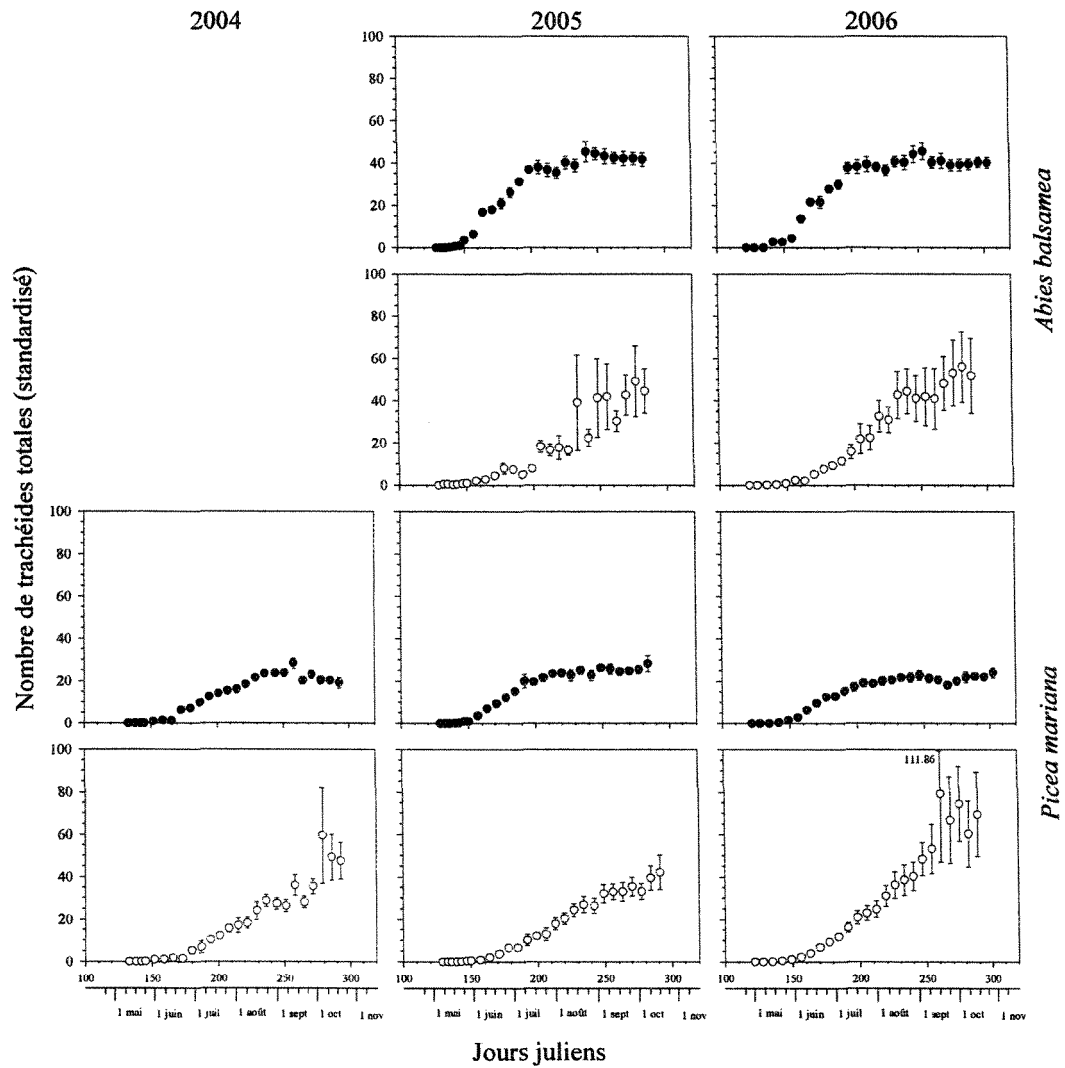


Figure 13 : Nombre de trachéides totales observées (standardisé) dans les tiges (●) et les racines (○) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006. Les barres verticales représentent l'erreur type.

3.5 Modélisation de la croissance du xylème.

Afin de caractériser l'activité cambiale et la xylogenèse, une modélisation de la production du xylème des tiges et des racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006 a été effectuée à partir de l'équation du modèle de Gompertz. Cette modélisation a comme objectif d'ajuster une régression non linéaire, à partir du nombre de trachéïdes totales du xylème (figure 14). Dans tous les cas, il a été possible d'obtenir des R^2 qui varient entre 0.90 et 0.99 (tableau 6), avec des valeurs généralement plus basses au niveau des racines. Les valeurs des paramètres A , β et κ moyens, qui caractérisent l'équation du modèle de Gompertz, ont été respectivement de 31, 9 et 5 pour les tiges, tandis que pour les racines, elles ont été de 50, 6 et 3. De plus, le point d'inflexion (t), qui correspond au point où la tangente croise la courbe et où le taux de production cellulaire est à son maximum, survient en moyenne plus tôt dans les tiges (jour julien 172 ou 21 juin) que dans les racines (jour julien 207 ou 26 juillet). La phase exponentielle survient plus hâtivement au niveau des tiges que des racines. Aussi, le taux de division et de production de trachéïdes dans le xylème a été beaucoup plus rapide dans les tiges (principalement au mois de juin jusqu'à la mi-juillet) que dans les racines où l'on retrouve une croissance constante tout au long de la saison végétative du mois de juin jusqu'au mois d'août. Le taux de division cellulaire et la dynamique de croissance intra annuelle par le cambium vasculaire ont donc été différents entre les deux parties de l'arbre. Dans les tiges des deux espèces, la majeure partie des trachéïdes est formée au cours des mois de juin et de juillet, tandis que dans les racines, la formation du xylème est plus marquée aux mois de juillet et d'août avec une production de cellules relativement

importante aux mois de juin et de septembre. De plus, il y a plus d'activité au sein du cambium vasculaire des racines que dans celui des tiges à la fin de la saison de croissance. La production des trachéides au mois d'août par le cambium vasculaire des racines est encore très élevée comparativement à celle des tiges qui est en pleine diminution.

Tableau 6 : Paramètres de l'équation du modèle de Gompertz (A , β et κ), R^2 et valeur de la période du point d'inflexion (t) pour la modélisation des tiges et des racines chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006.

Partie	Espèce	Année	Paramètre			R^2	t
			A	β	$\kappa (10^{-2})$		
Tige	<i>Abies balsamea</i>	2005	42,68	8,21	4,88	0,99	168,24
		2006	40,75	9,78	5,89	0,98	166,04
	<i>Picea mariana</i>	2004	22,76	8,78	4,78	0,96	183,68
		2005	25,59	8,74	5,12	0,99	170,70
		2006	21,65	8,46	5,03	0,98	168,19
		2006	69,64	6,22	3,00	0,94	207,33
Racine	<i>Abies balsamea</i>	2005	44,49	6,86	3,28	0,91	209,14
		2006	50,20	7,47	3,74	0,97	199,73
	<i>Picea mariana</i>	2004	46,50	5,77	2,71	0,90	212,92
		2005	39,01	6,13	3,01	0,98	203,65
		2006	69,64	6,22	3,00	0,94	207,33
		2006	69,64	6,22	3,00	0,94	207,33

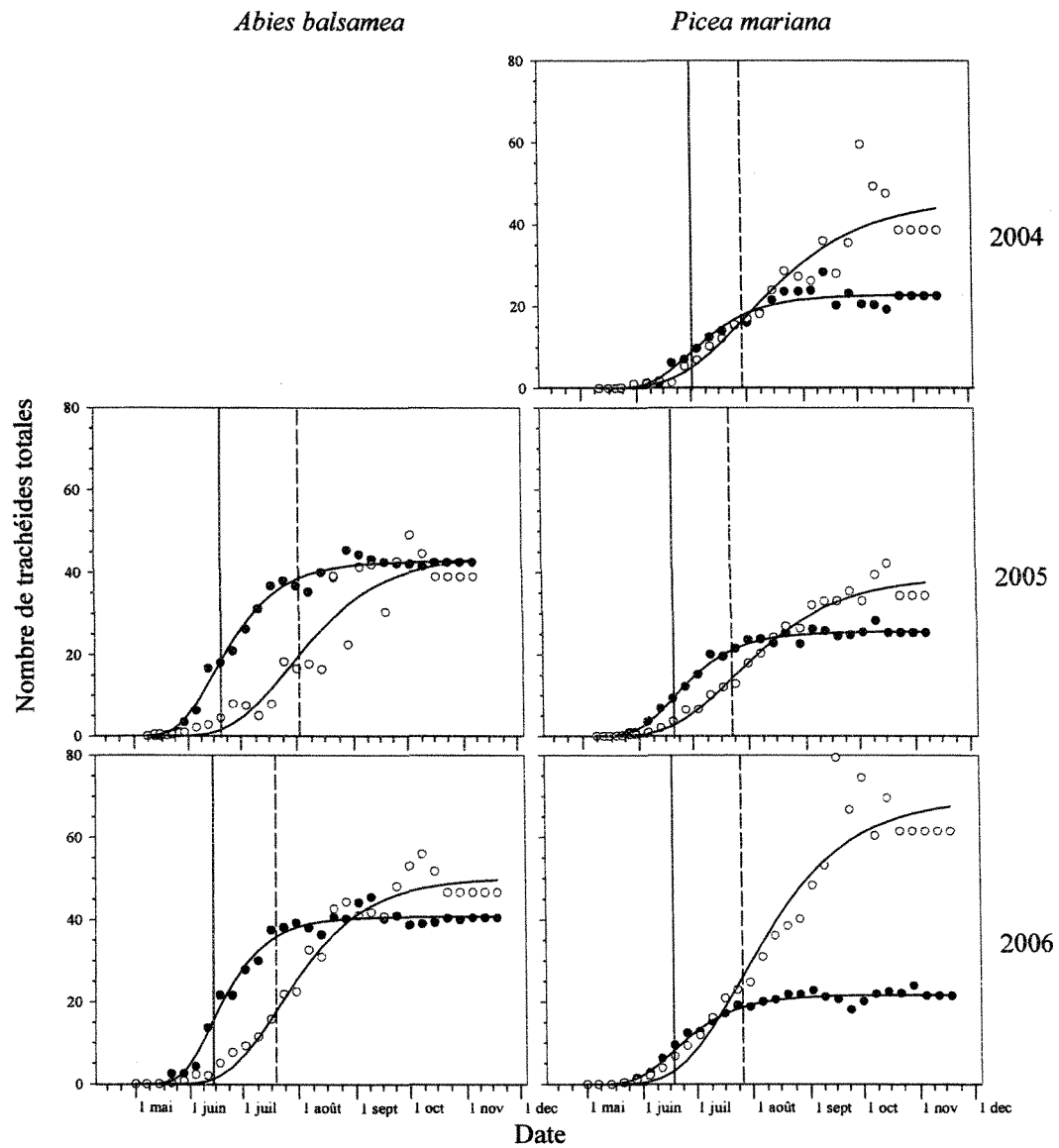


Figure 14 : Modélisation du nombre de trachéides totales du xylème des tiges (●) et des racines (○) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006 avec l'aide de l'équation de Gompertz. Les barres verticales représentent le point d'inflexion (t) des tiges (lignes unies) et des racines (lignes pointillées).

3.6 Seuils de température pour le début de la phase d'élargissement radial

Les seuils de température de l'air ($T_{min.}$, $T_{moy.}$ et $T_{max.}$) correspondant à 50% de probabilité de retrouver de la production de trachéides en élargissement radial dans le xylème ont été déterminés pour chaque partie (tiges ou racine), espèce (*Abies balsamea* ou *Picea mariana*) et année (2004, 2005 ou 2006) (figure 15). Les seuils de température moyens de l'air ont respectivement varié entre 2.2-5.6 °C ($T_{min.}$), 8.9-11.9 °C ($T_{moy.}$) et 15.3-17.8 °C ($T_{max.}$). Aucune différence significative n'a été notée dans les seuils de température ($T_{min.}$, $T_{moy.}$ et $T_{max.}$) de l'air entre les deux parties (tiges et racines) de même qu'entre les deux espèces (sapin baumier et épinette noire). Par contre, des différences ont été obtenues dans les seuils de température $T_{min.}$ ($P < 0.0001$, tableau 7), $T_{moy.}$ ($P < 0.0001$, tableau 7) et $T_{max.}$ ($P = 0.0065$, tableau 7) entre les années 2004, 2005 et 2006. Les seuils de température augmentent graduellement au cours des trois années d'échantillonnages (figure 15).

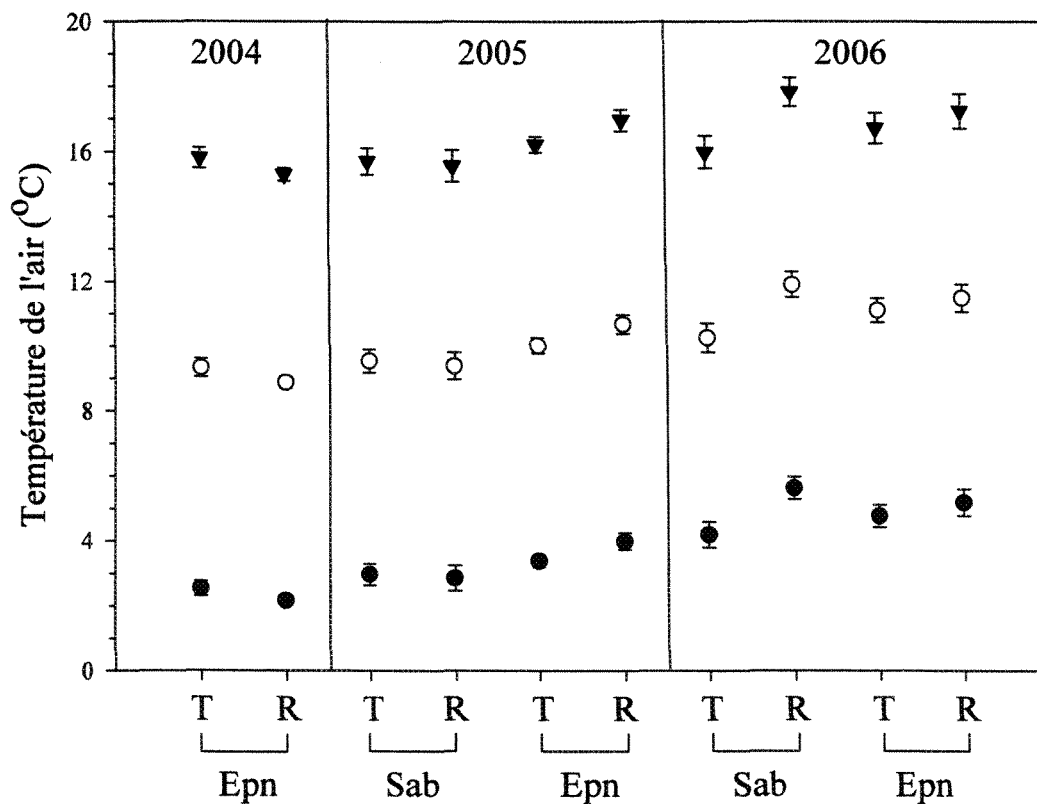


Figure 15 : Seuils de température de l'air T_{min} . (●), T_{moy} . (○) et T_{max} . (▼) correspondant à 50% de probabilité de retrouver des trachéides en élargissement radial dans le xylème des tiges et des racines d'*Abies balsamea* et de *Picea mariana* au cours des années 2004, 2005 et 2006. Les barres verticales représentent l'erreur type parmi les arbres. T = Tige, R = Racine, Sab = *Abies balsamea* et Epn = *Picea mariana*.

Tableau 7 : Analyse de variance multi facteurs (ANOVA, $P= 0,05$) pour les seuils de température de l'air T_{min} , T_{moy} , et T_{max} . correspondant avec 50% de probabilité de retrouver des trachéides en élargissement radial dans le xylème des tiges et des racines (parties) chez *Abies balsamea* et *Picea mariana* (espèces) en 2004, 2005 et 2006 (années).

Source	dl	Variance	F	P
Minimum				
Modèle	9	15,72	8,77	<0,0001
Erreur	114	1,79		
Moyen				
Modèle	9	12,18	5,66	<0,0001
Erreur	114	2,15		
Maximum				
Modèle	9	8,88	3,07	0,0025
Erreur	114	2,89		
Source	dl	Moyenne au carré	F	P
Minimum				
Espèce	1	4,49	2,50	0,1163
Partie	1	2,51	1,40	0,2388
Espèce*Partie	1	0,16	0,09	0,7660
Année	2	50,91	28,39	<0,0001
Espèce*Année	1	3,21	1,79	0,1834
Partie*Année	2	2,33	1,30	0,2761
Espèce*Partie*Année	1	4,89	2,73	0,1013
Moyen				
Espèce	1	7,76	3,61	0,0601
Partie	1	2,83	1,31	0,2541
Espèce*Partie	1	0,34	0,16	0,6917
Année	2	33,39	15,52	<0,0001
Espèce*Année	1	2,83	1,32	0,2535
Partie*Année	2	2,85	1,33	0,2696
Espèce*Partie*Année	1	6,91	3,21	0,0758
Maximum				
Espèce	1	6,96	2,40	0,1238
Partie	1	3,90	1,35	0,2480
Espèce*Partie	1	0,29	0,10	0,7539
Année	2	15,22	5,26	0,0065
Espèce*Année	1	5,05	1,74	0,1894
Partie*Année	2	3,88	1,34	0,2660
Espèce*Partie*Année	1	7,97	2,75	0,0999