

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES**

PAR

**ANNIE PLOURDE
B. Sc. en biologie**

**DÉVELOPPEMENT ET CROISSANCE DE *THUJA OCCIDENTALIS* L. AYANT
LA FORME ARCHITECTURALE « COUCHÉE AU SOL », FJORD DU
SAGUENAY, QUÉBEC**

DÉCEMBRE 1999



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-48314-2

Canada

RÉSUMÉ

Les arbres se développent généralement selon des patrons architecturaux plus ou moins spécifiques pour chaque espèce. Il arrive que des défauts architecturaux soient observés sur les tiges. Ces formes influencent le développement structural des arbres et elles peuvent avoir un impact économique selon l'espèce touchée. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les caractéristiques temporelles et spatiales de la croissance chez des *Thuja occidentalis* L. ayant la forme architecturale « couchée au sol ». Les arbres échantillonnés devaient avoir deux caractéristiques pour être sélectionnés : 1) le tronc devait être couché au sol sur une distance d'au moins un mètre ; 2) la cime devait être redressée. Les arbres étudiés présentaient une courbure au niveau du tronc. Le site d'étude se trouvait à proximité de l'anse au Gros ruisseau, sur la rive sud du fjord du Saguenay, au Québec. La méthode utilisée est une analyse de tige détaillée, basée sur la méthode dendrochronologique et sur une observation des caractéristiques structurales des cernes de croissance. Les caractéristiques étudiées étaient : la croissance apicale, les cernes absents, le bois de réaction, l'excentricité et la forme de la tige en relation avec les caractéristiques des microsites. Les résultats obtenus ont permis d'émettre une hypothèse afin d'expliquer la formation de la forme architecturale rampante, chez les arbres étudiés. Cette forme serait causée par un rabatement de la cime jusqu'au sol, à intervalles réguliers, par une accumulation trop importante de neige dans la cime. Les échantillons seraient en mesure de se redresser lorsqu'un obstacle physique élimine l'effet du poids de la neige. La forme des tiges, le bois de réaction et les caractéristiques des microsites des cinq arbres étudiés ont le plus contribué à émettre cette hypothèse. Les autres variables étudiées ont surtout fourni des indices permettant de confirmer l'hypothèse proposée.

REMERCIEMENTS

Cette recherche n'aurait pu être possible sans la participation de plusieurs personnes que je tiens à remercier. Cornélia Krause, ma directrice (aide technique et morale) ; Hubert Morin, mon co-directeur (idées toujours bienvenues). La disponibilité de mes deux directeurs est pour beaucoup dans la réussite de cette maîtrise. Un merci spécial au Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale pour le soutien financier et le matériel. Merci également à Jacques Bertrand, directeur du parc du Saguenay (permission d'échantillonner). J'en profite pour remercier aussi Bertrand Bouchard, garde-parc (pour ta patience, ta disponibilité et ta connaissance du fjord). Il y a aussi mes aides de terrain : Ann Bouchard, Germain Savard, Pierre-Yves Plourde, Isabelle Simard et Samuel Chênevert : j'espère que votre tour en zodiak vous a plu. Thanks to Douglas W. Larson, Uta Matthes-Sears and all the people in your lab, for your help to find out the method I need for this research and for your good advices, always welcome.

Pour ce qui est de l'appui moral, je ne voudrais pas passer sous silence la gang : Isabelle Simard (et Louis), Nathalie Fantin, Caroline Girard, Boris Dufour, Mélanie Gaudrault, Claude Pelletier et Francois Gionest : longue vie à la bière et au bénédictine ! Enfin, je tiens à remercier, plus particulièrement que les autres, Francois Gionest, toi qui m'a permis d'étudier mes échantillons en utilisant la scie et la sableuse de si belle manière, merci beaucoup (aussi et surtout) pour ton appui moral, qui m'a aidé à passer à travers les moments difficiles.



TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
CHAPITRE I INTRODUCTION	1
CHAPITRE II REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
2.1 LE <i>THUJA OCCIDENTALIS</i> L.....	6
2.2 L'ARCHITECTURE DES ARBRES	8
2.2.1 L'INFLUENCE DU SITE SUR LA FORME ARCHITECTURALE ET LA CROISSANCE.....	10
2.2.2 L'INFLUENCE DE LA NEIGE SUR LA FORME ARCHITECTURALE ...	12
2.3 LES CARACTÉRISTIQUES DE LA CROISSANCE DES ARBRES.....	14
2.3.1 LA CROISSANCE RADIALE	14
2.3.2 LA CROISSANCE APICALE	15
2.3.3 LE BOIS DE RÉACTION	17
2.3.4 LES CERNES ABSENTS	18
2.3.6 L'EXCENTRICITÉ.....	19
CHAPITRE III CARACTÉRISATION DE L'AIRE D'ÉTUDE.....	21
3.1 LE CHOIX DU SITE	22
3.2 LA CARACTÉRISATION DU SITE.....	23
CHAPITRE IV MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	27
4.1 LA FORME ARCHITECTURALE.....	28

4.1.1 LA DESCRIPTION.....	28
4.1.2 LA COMPARAISON AVEC LES AUTRES ESPÈCES.....	28
4.2 L'ÉCHANTILLONNAGE	29
4.2.1 LE CHOIX DES ARBRES.....	29
4.2.2 LA PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS.....	29
4.2.3 LA RECONSTRUCTION DES ARBRES	31
4.3 L'ANALYSE.....	32
4.3.1 LA CROISSANCE EN LARGEUR	32
4.3.1.1 Les mesures.....	32
4.3.1.2 L'interdatation.....	34
4.3.2 LA CROISSANCE APICALE	34
4.3.3 LES CERNES INCOMPLETS.....	35
4.3.4 LE BOIS DE RÉACTION	35
4.3.5 LES RAYONS EXCENTRIQUES.....	36
4.3.6 LES CERNES EXCENTRIQUES.....	37
CHAPITRE V RÉSULTATS.....	39
5.1 LA CARACTÉRISATION DU SITE.....	40
5.2 L'ARCHITECTURE DES TIGES.....	43
5.3 LA CROISSANCE RADIALE.....	46
5.3.1 L'ÂGE MINIMUM	46
5.3.2 LA CROISSANCE RADIALE MOYENNE	47
5.3.3 LES COURBES DE CROISSANCE RADIALE	48
5.4 LA CROISSANCE APICALE	50
5.5 LE BOIS DE RÉACTION	53
5.6 LES CERNES INCOMPLETS OU ABSENTS	57
5.7 L'EXCENTRICITÉ DES SECTIONS.....	59
5.8 L'EXCENTRICITÉ DES CERNES	62
CHAPITRE VI DISCUSSION.....	66

6.1 UNE HYPOTHÈSE EXPLIQUANT LA FORME ARCHITECTURALE	
« COUCHÉE AU SOL »	67
6.2 LA CONFIRMATION DE L'HYPOTHÈSE	69
6.2.1 LA FORME ARCHITECTURALE	69
6.2.1.1 Les arbres redressés : THO 1, THO 4 et THO 5	69
6.2.1.2 Les arbres non-redressés : THO 2 et THO 3	70
6.2.2 LE BOIS DE RÉACTION ET L'EXCENTRICITÉ DES SECTIONS	71
6.2.3 LES CARACTÉRISTIQUES DU SITE ET DE LA VÉGÉTATION	72
6.3 LES AUTRES FACTEURS	74
6.3.1 LA CROISSANCE RADIALE	74
6.3.2 LES CERNES ABSENTS OU INCOMPLETS.....	75
6.3.3 L'EXCENTRICITÉ DES CERNES DE CROISSANCE.....	76
6.4 LES CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES ARBRES ANALYSÉS	76
6.4.1 THO 1	76
6.4.2 THO 2	77
6.4.3 THO 3	78
6.4.4 THO 4	78
6.4.5 THO 5	79
CHAPITRE VII CONCLUSION	80
CHAPITRE VIII RÉFÉRENCES	84
ANNEXE I Programme SAS utilisé pour déterminer l'excentricité de la largeur des cernes de croissance des arbres étudiés	95
ANNEXE II Excentricité des cernes de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections représentatives des échantillons THO 3, THO 4 et THO 5.....	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 Description générale du site d'étude et des microsites spécifiques de chaque thuya étudié	40
Tableau 5.2 Description de la végétation arbustive et arborescente de l'aire d'étude, pour les trois quadrats de 25 m ² (arbres et arbustes de plus de 30 cm de tige dressée).....	41
Tableau 5.3 Caractéristiques de la végétation herbacée et des plantules de moins de 30 centimètres de tige, par pourcentage de recouvrement, pour les trois quadrats de 1 m ²	42
Tableau 5.4 Description de la formes architecturale des tiges des conifères échantillonnés dans les quadrats de 25 m ² (incluant tous les échantillons de plus de 30 centimètres de tige)	43
Tableau 5.5 Âge minimum des échantillons à l'étude et emplacement sur la tige (en mètre) de la section la plus âgée.....	47
Tableau 5.6 Données concernant la croissance radiale des thuyas étudiés	48

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Localisation du site étudié.....	25
Figure 3.2 Distribution des thuyas échantillonnés à l'anse au Gros ruisseau et des quadrats utilisés pour caractériser le site d'étude.....	26
Figure 4.1 Schéma représentant la forme architecturale « couchée au sol ».....	28
Figure 4.2 Schéma de la coupe des sections des arbres étudiés (avant et après la courbure). Parties droites des troncs : sections à tous les 50 centimètres ; partie courbe des troncs : sections à tous les 2 centimètres.	30
Figure 4.3 Détermination des coordonnées X et Y des sections des arbres à l'étude pour établir les schémas des formes architecturales spécifiques à chaque thuya étudié.....	31
Figure 4.4 Emplacement des rayons (A) sur la partie de tronc couchée au sol et (B) après la courbure.....	33
Figure 4.5 Exemple de détermination de l'emplacement du rayon excentrique (rayon le plus long) sur la surface d'une section (pour cette section : 116°).....	36
Figure 4.6 Exemple du calcul de l'excentricité pour un cerne de croissance.....	38
Figure 5.1 Représentation schématique de la forme architecturale des cinq thuyas échantillonnés et des caractéristiques spécifiques des microsites pour chacun....	44
Figure 5.2 Courbes de croissance radiale moyennes, par arbre, des cinq échantillons étudiés, échantillonnés à l'anse au Gros ruisseau, sur les rives du fjord du Saguenay (tous les rayons mesurés sont inclus dans les moyennes).....	49
Figure 5.3 Croissance apicale extrapolée et cernes de bois de réaction pour différentes sections des tiges thuyas étudiés.	51

Figure 5.4 Emplacement du bois de réaction par rapport à la surface des sections, ramené dans un plan pour trois des échantillons étudiés (n = nombre de détection total par arbre).	56
Figure 5.5 Croissance apicale extrapolée et cernes incomplets ou absents pour toutes les sections étudiées des cinq arbres analysés.	58
Figure 5.6 Excentricité des sections à des intervalles de 50 centimètres (et de 25 centimètres lorsque ces sections intermédiaires étaient étudiées) pour les cinq arbres analysés.	60
Figure 5.7 Excentricité des cernes de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections sélectionnées de l'échantillon THO 1.	63
Figure 5.8 Excentricité des cernes de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections sélectionnées de l'échantillon THO 2.	65
Figure 6.1 Renversements successifs de la cime des thuyas par l'accumulation de neige, jusqu'à ce que les arbres parviennent à se stabiliser.....	68

CHAPITRE I
INTRODUCTION

La dendrochronologie est une science qui permet d'étudier la croissance et le développement des arbres et de comprendre ce qu'ils ont vécu dans le passé, tant sur le plan de l'écologie en général qu'au niveau du climat. Il est aussi possible de dater des événements qui influencent la croissance des arbres comme des changements climatiques, le nombre et la fréquence des épidémies d'insectes, des feux de forêt, des chablis, etc. Il est aussi possible, avec cette méthode, d'établir des relations architecturales (par exemple, forme versus croissance).

Dans l'est du Canada, le thuya (*Thuja occidentalis* L.) est reconnu pour sa longévité (Larson et Kelly 1991 ; Archambault et Bergeron 1992b ; Kelly *et al* 1992). Il a été possible de démontrer, à partir de différentes observations, que cet arbre adopte des formes architecturales variées selon le milieu où il se développe. Dans des milieux ouverts, de basses terres et ayant un humus épais offrant un ancrage stable, les thuyas vont développer une architecture régulière (tronc droit et conique, cime symétrique), la croissance radiale sera importante et les arbres atteindront des âges excédant rarement 250 à 300 ans (Larson et Kelly 1991 ; Kelly *et al.* 1992 ; Briand *et al.* 1993). Le thuya peut aussi se développer sur des parois rocheuses et abruptes, où l'humus est quasi absent et où les anfractuosités présentes dans la roche sont les seuls supports disponibles. Dans ce type de milieu, les thuyas vont adopter des formes architecturales rabougries, ils vont présenter des troncs tordus, des tiges multiples et des bandes d'écorces (dues à la

mortalité cambiale) (Briand *et al.* 1991 ; Larson et Kelly 1991 ; Kelly *et al.* 1992 ; Briand *et al.* 1993).

La variété des formes architecturales des thuyas dépend des sites où ils se développent et il est reconnu que les thuyas ayant une architecture distordue et une croissance faible présentent une grande longévité (Larson et Kelly 1991 ; Kelly *et al.* 1992 ; Larson *et al.* 1993). Il devient important de bien comprendre comment ces arbres de forme irrégulière se développent. Cela permettrait de saisir comment les événements qui ont provoqué ces formes ont influencé leur croissance. Une meilleure compréhension de cette croissance permettrait de consolider le potentiel dendrochronologique (écologique ou climatique) de cette espèce.

Les rives du fjord du Saguenay, au Québec, abritent une forêt de *Thuja occidentalis* L. présentant au moins une forme architecturale irrégulière. Cette forme a une influence directe sur le développement des cernes de croissance. Une meilleure compréhension de cette influence permettrait d'améliorer l'interprétation dendroécologique de cette espèce et d'étendre les conclusions à d'autres espèces plus commerciales. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les caractéristiques spatiales et temporelles de la croissance chez des thuyas ayant la forme architecturale « couchée au sol ».

Les objectifs spécifiques sont :

- 1) Étudier la croissance de chaque thuya échantillonné au niveau de :
 - a) la largeur des cernes de croissance ;
 - b) la croissance en longueur (en hauteur) ;
 - c) l'infrastructure des cernes de croissance.
- 2) Déterminer les relations entre les paramètres de la croissance, leurs localisations dans l'arbre et les caractéristiques spécifiques des microsites de chaque échantillon.

CHAPITRE II
REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 LE *THUJA OCCIDENTALIS* L.

Le genre *Thuja* comporte six espèces, dont quatre se retrouvent en Asie et deux en Amérique du Nord (*Thuja plicata* Donn ex D. Don dans l'ouest et *Thuja occidentalis* L. dans l'est) (Martineau 1985 ; Farrar 1995). Le thuya occidental, aussi appelé cèdre blanc de l'est, se retrouve dans toutes les provinces de l'est du Canada (à l'exception de Terre-Neuve) et il est réparti des États-Unis jusqu'à 50° 15' de latitude Nord. Il atteint une importance commerciale dans le sud de l'Ontario et du Québec et dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick (Martineau 1985). Ses feuilles en forme d'écaille d'un vert jaunâtre dégagent une odeur caractéristique. Les cônes, très petits, s'ouvrent en automne pour laisser échapper des petites graines ailées. L'écorce mince est séparée en lanières verticales étroites par des fissures peu profondes. Le bois est clair, mou, léger et durable. Le thuya occidental est un arbre de petite taille, mesurant de 15 à 16 mètres et atteignant un diamètre de 30 à 50 centimètres (McElhanney 1935 ; Guillemette 1982 ; Farrar 1995). Le bois de cette espèce réagit peu aux variations d'humidité et il est utilisé lorsqu'une bonne résistance à la pourriture est nécessaire (piquets, clôtures, poteaux, revêtements d'extérieur, etc.). L'odeur qui s'en dégage a un effet répulsif sur les insectes et il est utilisé dans des penderies ou des coffres à vêtements (Guillemette 1982 ; Martineau 1985 ; Farrar 1995).

Les thuyas qui se développent dans des milieux ouverts ont une couronne longue, étroite, dense, conique et une apparence bien définie. Les branches présentent

une courbe descendante puis l'extrémité remonte graduellement. La section transversale du tronc est souvent de forme irrégulière. Le tronc devient rapidement effilé, il est souvent incliné puis courbé vers le haut. Les thuyas occidentaux se développant en forêt sont caractérisés par un tronc visible à travers la couronne irrégulière. Des bouts de branches mortes sont aussi visibles sur la partie basse du tronc. Le système racinaire est de type superficiel et il est réparti largement autour de l'arbre (Farrar 1995).

Le thuya est présent dans les milieux humides tels que les marécages, les tourbières ou les bords de rivières. Il se retrouve aussi sur des pentes fortement inclinées et sur des sols secs et peu profonds, comme des affleurement rocheux, des parois ou des dunes (Fernald 1919 ; Curtis 1944, 1946 ; Blanchet 1982 ; Martineau 1985 ; Matthes-Sears et Larson 1991 ; Farrar 1995). Il se développe en petits peuplements purs, mais le plus souvent, il est mélangé avec d'autres espèces comme le pin blanc (*Pinus strobus* L.) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) (Farrar 1995).

Le thuya peut atteindre plusieurs centaines d'années et il est caractérisé par une croissance lente. De petits thuyas rabougris de plus de 900 ans ont été découverts sur l'escarpement du Niagara (Ontario) et au lac Duparquet (Québec) (Larson 1990 ; Larson et Kelly 1991 ; Archambault et Bergeron 1992a ; 1992b ; Kelly *et al.* 1992 ; Briand *et al.* 1993 ; Farrar 1995). Les thuyas occidentaux se

développant sur des parois abruptes présentent une croissance limitée par les facteurs externes et des distorsions morphologiques typiques. Les séries de largeurs de cernes ne semblent cependant pas affectées par ces formes architecturales inhabituelles (Kelly *et al.* 1994). D'autres études ont confirmé que l'apparence des thuyas est souvent rabougrie avec une mortalité apicale fréquente, un feuillage épars, un tronc érodé par le vent et une forte mortalité cambiale conduisant à une croissance par bandes d'écorce (particulièrement chez les très vieux spécimens) (Archambault et Bergeron 1992b ; Larson *et al.* 1993).

2.2 L'ARCHITECTURE DES ARBRES

Plusieurs conifères se développant sous des conditions défavorables (souvent des genres *Pinus*, *Cupressus* et *Juniperus*), montrent régulièrement des distorsions morphologiques, des mortalités fréquentes de l'apex dominant et une asymétrie de la croissance radiale de la tige (Larson *et al.* 1993). Le patron de croissance qui détermine les phases successives de développement des arbres est appelé « modèle architectural » (Hallé *et al.* 1978). Le modèle architectural correspond à la stratégie de croissance (par exemple l'angle d'insertion des branches par rapport au tronc) qui définit comment les plantes élaborent leur architecture résultante (Barthélémy *et al.* 1989). La tige des arbres semble se développer pour égaliser le stress moyen ressenti à la surface du tronc. La distribution du stress n'étant pas constante dans le temps, la forme de la tige constitue une réponse à ces changements (Morgan et Cannell 1994).

L'observation montre que des espèces se développant conformément à un même modèle architectural (décrit par Hallé et Oldeman 1970) peuvent présenter d'importantes différences de structure. Chaque espèce, voire chaque génotype, possède une organisation qui lui est propre et qui se manifeste à la fois par le nombre, la nature et la forme des catégories d'organes qui la composent et par les rapports qui s'établissent entre ces catégories, conformément à la stratégie de croissance de l'espèce (Colin *et al.* 1993). Édelin (1977) a introduit la notion d'unité architecturale pour désigner cette expression spécifique du modèle architectural.

L'architecture des plantes dépend de la nature et de l'arrangement de chacune de ses parties. C'est aussi l'expression d'un équilibre entre les processus de croissance de la plante (facteurs endogènes) et les contraintes exercées par l'environnement (facteurs exogènes). Le but de l'analyse de l'architecture est d'identifier ces processus endogènes par une multitude d'observations (Barthélémy *et al.* 1989). Par contre, les réactions internes des arbres, par rapport à une architecture spécifique modelée par un environnement particulier, sont peu étudiées.

2.2.1 L'INFLUENCE DU SITE SUR LA FORME ARCHITECTURALE ET LA CROISSANCE

La forme de la tige des arbres est variable, comme l'atteste le grand nombre de modèles architecturaux décrits par Hallé et Oldeman (1970). Quoique plusieurs facteurs environnementaux peuvent affecter la croissance de la tige et sa forme, les changements dans la taille et la distribution des parties vertes de la cime sont plus vraisemblablement reliés à une variation de la tige (Larson 1963 ; Schweingruber 1988 ; Osawa 1993 ; Barthélémy 1997). Plusieurs expériences ont démontré que plusieurs facteurs influencent fortement la forme de la tige d'un arbre. Ces facteurs sont le balancement des tiges ; l'élagage des branches ; la taille, le poids et la vigueur de la couronne ; la dessiccation des feuilles et divers stress mécaniques (par exemple le couvert de neige, le vent et les éboulis qui peuvent provoquer l'érosion des troncs et des apex) (Schweingruber 1988 ; Lavoie et Payette 1991 ; Osawa 1993).

L'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) présente une grande plasticité phénotypique en réponse aux changements de l'environnement (Bégin et Fillion 1991). Les formes de croissance observées chez l'épinette noire sont dues principalement aux rigueurs hivernales (Lavoie et Payette 1991). D'autres espèces d'arbres se développant sur des parois ou des pentes abruptes ont certaines caractéristiques en commun avec ces épinettes. Elles tendent à être petites, déformées morphologiquement, à avoir des taux de croissance faibles et à

atteindre des grands âges (Beasley et Klemmedson 1973 ; Schweingruber 1988 ; Kloetzli 1991 ; Swetnam et Brown 1992 ; Matthes-Sears et Larson 1995).

Cette caractéristique est aussi notée pour les thuyas de l'escarpement du Niagara (Ontario) et du lac Duparquet (Québec) (Briand *et al.* 1991 ; 1993 ; Archambault et Bergeron 1992a ; 1992b ; Kelly *et al.* 1992 ; Larson *et al.* 1993). Sur les parois, les thuyas apparaissent sévèrement déformés, alors que ceux se développant dans des marécages ont peu ou pas de défauts de forme (Briand *et al.* 1991). Ces différences s'expliqueraient par l'existence d'écotypes particuliers et stables pour chaque milieu (Habeck 1958 ; Musselman *et al.* 1975 ; Briand *et al.* 1991).

La forme de la tige des arbres influence la qualité du bois produit et malgré l'importance économique de ce facteur, il a été peu étudié dans les recherches pour améliorer la productivité forestière. Cela est dû au fait que ce caractère est complexe par la grande diversité des défauts qu'il recouvre et que certains de ces défauts sont difficilement définissables et quantifiables. La recherche de critères indirects d'évaluation de la forme est une voie d'étude possible, en particulier au niveau des paramètres de croissance et de branchaison (Pâques et Contrain 1993).

2.2.2 L'INFLUENCE DE LA NEIGE SUR LA FORME ARCHITECTURALE

Plusieurs facteurs influencent la croissance des arbres à intervalles réguliers (saisons) ou de manière continue (climat, caractéristiques des sites). Lorsque des événements climatiques épisodiques se produisent, leur influence sur la croissance des arbres peut être décelée par différentes analyses. Parmi ces événements épisodiques, il y a, par exemple, les tempêtes de vents ou de verglas et l'accumulation record de neige (Morin et Payette 1986 ; Travis et Meentemeyer 1991 ; Homma 1997 ; Fridman et Valinger 1998).

Les dommages causés aux arbres par un haut couvert de neige représentent un problème significatif dans les régions tempérées froides et en zones montagneuses. Le couvert de neige peut fortement affecter la végétation et la distribution des plantes dans ces régions (Dolukhanov 1978 ; Stevens et Fox 1991 ; Peltola 1997 ; Fridman et Valinger 1998). La position géographique, les caractéristiques du peuplement et des arbres, la pente, le type de sol, la température et les conditions climatiques influencent l'importance et les risques de dommages causés par la neige. La sévérité de ces dommages dépend aussi de la réponse des espèces touchées (Sakai 1976 ; Dolukhanov 1978 ; Fanta 1981 ; Homma 1997) et de la quantité de neige accumulée (Peltola 1997 ; Fridman et Valinger 1998). Une accumulation de 60 centimètres est suffisante pour provoquer un risque très élevé de dommages aux arbres (Solantie 1994). Dans la région du

Saguenay, l'accumulation annuelle moyenne est au moins cinq fois plus importante (3,50 mètres par an en moyenne) (Anonyme 1942-1983).

Des dommages causés par la neige peuvent se produire quand un stress de pliure (courbure ou inclinaison) est créé au niveau de la tige, soit lorsque l'accumulation de neige est déplacée d'un côté (dû à la présence d'une courbe ou d'une inclinaison du tronc) (Brunig 1973 ; Worrell 1979 ; Petty et Worrell 1981). Plusieurs types de dommages peuvent être observés dans des conditions de neige abondante : défoliation ; inclinaison ou courbure du tronc ; bris de la cime, des racines ou des branches ; tiges multiples ; arbres de taille réduite. Un des dommages les plus importants concerne les troncs qui rampent. Il a été montré qu'une force de courbure faible peut causer le rampage chez des tiges jeunes ou de faible diamètre. Ainsi, des arbres qui sont ramenés régulièrement au sol par la neige auraient tendance à garder cette position (Worrell 1979).

Certaines des détériorations causées par l'accumulation de neige peuvent provoquer la mort ou des dommages permanents au niveau des mécanismes de croissance (Morin et Payette 1986 ; Timmel 1986 ; Travis et Meentemeyer 1991 ; Homma 1997 ; Fridman et Valinger 1998). Par contre, l'accumulation de la neige serait une cause peu probable d'une mortalité importante de la partie aérienne des thuyas, car ces derniers sont en mesure de s'adapter aux conditions qu'ils subissent (Larson *et al.* 1993).

2.3 LES CARACTÉRISTIQUES DE LA CROISSANCE DES ARBRES

La croissance des arbres peut être étudiée à divers niveaux. La croissance radiale est un de ces facteurs (c'est probablement le plus communément étudié). Par contre, il existe d'autres caractéristiques qui peuvent aussi fournir des informations importantes sur des événements qui influencent la croissance. Ces caractéristiques sont la croissance apicale, la formation de bois de réaction, les cernes incomplets ou absents et l'excentricité des sections ou des cernes (Schweingruber 1988). Des changements (réduction ou augmentation, présence ou absence, etc.) dans l'une ou l'autre de ces caractéristiques peuvent être datés et des événements qui sont susceptibles de provoquer ces changements peuvent y être associés (Eis 1986 ; Schweingruber 1988).

2.3.1 LA CROISSANCE RADIALE

La croissance radiale des arbres permet de fournir des informations sur les conditions de croissance que les arbres ont subi pour des périodes données. À l'intérieur de l'environnement général, la réponse de la croissance des arbres est contrôlée par des conditions environnementales locales. La croissance des arbres semble répondre principalement aux conditions d'humidité et de disponibilité des nutriments. Normalement, un peuplement forestier répond de manière similaire aux facteurs environnementaux régionaux affectant la croissance radiale et en hauteur (comme le climat) (Eis 1986 ; Schweingruber 1988). De plus, chaque changement des conditions environnementales est reflété d'une manière ou d'une

autre dans la structure des cernes de croissance. Les changements rapides des caractéristiques des cernes sur un certain nombre d'années peuvent résulter d'un déplacement de la position spatiale de l'arbre ; des conditions de températures, de lumière ou d'eau ; de dommages à la cime, aux racines et au tronc ou encore de changements chimiques dans l'environnement. Ces changements affectent le nombre et la taille des cellules et l'épaisseur des parois cellulaires (Schweingruber 1988).

Le thuya occidental atteint son diamètre et sa taille les plus grands dans les sites secs (Benthley et Smith 1962 ; Caulkins 1967). Au Maine et au Québec, le volume de croissance des thuyas est plus rapide dans les sols bien drainés que dans les sols humides (Curtis 1944 ; 1946 ; Blanchet 1982). D'un autre côté, le taux de croissance radiale le plus bas rapporté a été enregistré sur des arbres provenant de parois sèches du sud de l'Ontario. Certains des arbres échantillonnés à l'escarpement du Niagara (Ontario) présentent des taux de croissance inférieurs à 0,1 millimètre par année (Larson 1990 ; Larson et Kelly 1991 ; Matthes-Sears et Larson 1991 ; Kelly *et al.* 1992 ; Briand *et al.* 1993).

2.3.2 LA CROISSANCE APICALE

La croissance apicale des conifères comprend quatre patrons qui ont été définis par Mitchell (1965). Un de ces patrons correspond aux espèces qui n'ont pas de bourgeon apical et qui profitent d'une longue période de croissance. Par contre, la

longueur de la saison de croissance ne correspond pas nécessairement à une croissance en longueur plus importante. Bien que quelques espèces de conifères appartenant à ce groupe montrent d'excellents taux de croissance (*Cupressocyparis leylandii*, *Cupressus macrocarpa* et *C. lusitanica*), ce n'est pas le cas de plusieurs autres genres (*Thuja sp*, *Juniperus sp*, *Libocedrus sp*) (Mitchell 1965).

La famille des Cupressaceae fait partie de ce groupe. L'allongement de leur tige est donc un processus continu. La croissance est lente au printemps mais elle se poursuit régulièrement sur une longue période, si les conditions sont favorables. Le taux de croissance est fortement influencé par les conditions du milieu et l'allongement peut diminuer ou s'arrêter quand les conditions sont limitantes (température froide, sécheresse estivale, luminosité). Des variations intra- et interspécifiques peuvent également exister au niveau de la reprise de croissance printanière ainsi que dans la durée du repos hivernal (Harry 1987 ; Teissier Du Cros 1999).

Comme les autres Cupressaceae, le thuya occidental est caractérisé par l'absence de débourrage au printemps, puisqu'il n'y a pas de bourgeon terminal. La croissance apicale de cette espèce est marquée par des changements dans le rythme de la croissance, qui sont provoqués par l'environnement direct (comme les conditions particulières de microsites, telles que l'ombre, la pente, la compétition,

etc.). En automne, la pousse en longueur cesse, elle arrive à maturité le printemps suivant et la croissance reprend (Lanner 1965 ; Harry 1987).

2.3.3 LE BOIS DE RÉACTION

Plusieurs types structuraux de bois peuvent être observés lors de l'étude anatomique du bois des arbres. Ces différents types de bois présentent des structures cellulaires caractéristiques et chacun correspond à une fonction particulière. Le bois de réaction est un de ces types structuraux et il est impliqué dans la réorientation des tiges (Scurfield et Wardop 1962). La localisation théorique du bois de réaction chez les angiospermes et les gymnospermes est très différente. Chez les angiospermes, le bois de réaction est généralement situé sur la face supérieure d'une tige inclinée (bois de tension) et chez les gymnospermes, sur la face inférieure (bois de compression) (Low 1964 ; Westing 1965 ; 1968 ; Timell 1986 ; Loup *et al.* 1991). Le bois de compression est typiquement associé à une croissance excentrique (Low 1964).

Pendant longtemps, la gravité était reconnue comme étant le stimulus qui provoquait la formation de bois de réaction. Il est maintenant admis que la gravité n'est pas la cause première de la formation de ce type de bois, qui peut être produit en l'absence de stimulus gravitationnel ou en opposition directe avec ce stimulus (Timell 1986 ; Loup *et al.* 1991). Les autres stimuli qui peuvent induire la formation de bois de compression sont : des mouvements mécaniques du milieu

(glissement, avalanche, etc.) ; le substrat ; la lumière ; la pression sur l'écorce ; des stress de compression et de tension ; etc. (Timmel 1986 ; Schweingruber 1988).

2.3.4 LES CERNES ABSENTS

Les cernes qui sont absents ou incomplets sont une autre caractéristique de la croissance pouvant fournir des indices sur les conditions que les arbres ont subies dans le passé. Les cernes de croissance sont absents ou incomplets surtout lorsque les conditions du milieu sont défavorables. Les facteurs suivants peuvent entraîner la formation de tels cernes : de fortes suppressions, une croissance radiale très faible, de fortes perturbations affectant directement les arbres (défoliation, conditions climatiques, manque de lumière, mortalité cambiale, pollution, etc.) (Hartig 1871 ; Rubner 1910 ; Antevs 1925 ; Athari 1981 ; Wätzig et Fischer 1987). Les cernes qui sont incomplets ou absents ont une incidence normalement plus importante à la base du tronc qu'à la cime (Rubner 1910 ; Antevs 1925 ; Athari 1981 ; Nogler 1981 ; Wätzig et Fischer 1987 ; Takaoka 1993). Il est aussi possible que certains arbres cessent complètement de former des cernes avant de mourir, ou que ces cernes soient quasi impossibles à distinguer, parce qu'ils sont formés par une ou deux cellules seulement (Reukema 1959 ; Nogler 1981). Il a été démontré que, pour les arbres présentant une croissance radiale très lente, l'incidence (ou la quantité) de cernes incomplets (ou absents) est importante. Ainsi, plus la croissance d'un arbre est lente, plus le nombre de cernes incomplets sera élevé (Kelly *et al.* 1992 ; Larson *et al.* 1993).

2.3.6 L'EXCENTRICITÉ

L'excentricité permet de déterminer dans quel sens un stimulus externe a influencé la croissance des arbres et elle peut être considérée à trois niveaux, soit au niveau du tronc, des sections et des cernes. Quand un arbre est plié sous la force d'un facteur externe (vent, neige), il subit un stress maximum dans la partie extérieure de sa tige. Le cambium produit alors du nouveau bois dans le but d'égaliser la distribution du stress le long de la surface externe de la tige. La croissance cambiale est plus importante dans les régions de haut stress que dans les secteurs de stress réduit (Morgan et Cannell 1994). La largeur des cernes de croissance ne sera pas égale tout autour d'une section. L'excentricité des cernes peut fournir des indices quant à des événements qui auraient pu influencer la croissance des arbres (Schweingruber 1988). Si l'excentricité des cernes se produit sur plusieurs années (par exemple, s'il y a beaucoup de bois de réaction), cela peut conduire à l'excentricité des sections. Ces dernières présenteront alors un rayon plus long dans une direction précise de la surface. Enfin, cela peut découler sur le troisième niveau, soit sur la forme architecturale du tronc (courbure, pliure, torsion, sinuosité, tronc ovale, etc.) (Schweingruber 1988).

Tous ces facteurs pris en considération font en sorte que la croissance concentrique des arbres est plutôt l'exception en milieu naturel. Cela est dû au fait que les branches, le feuillage et les racines ne sont pas répartis uniformément autour du tronc et que les facteurs externes influencent inégalement la croissance

des arbres. Lorsque la croissance est excentrique (plus grande d'un côté), elle est normalement compensée par une réduction du côté opposé. Dans les cas extrêmes, aucune cellule ne sera développée d'un côté par rapport à l'autre. L'excentricité est causée par l'influence unilatérale de un ou plusieurs facteurs (lumière, chaleur, vent dominant, pression (comme la neige), torsion, changements subits dans l'environnement, blessures, etc.) (Antevs 1925).

CHAPITRE III
CARACTÉRISATION DE L'AIRE D'ÉTUDE

3.1 LE CHOIX DU SITE

Pour la présente étude, des caractéristiques précises ont été fixées pour le choix du site afin d'en arriver à choisir des thuyas ayant une forme architecturale déterminée et spécifique. Le site choisi devait avoir une pente abrupte et une abondance de thuyas occidentaux présentant la forme architecturale désirée (forme « couchée au sol », définie dans la section 4.1.1). Le fjord du Saguenay a été ciblé au départ pour deux raisons :

- 1) d'une longueur d'environ 100 kilomètres, le fjord présente des berges qui sont majoritairement très abruptes ou très inclinées ;
- 2) des études préliminaires (données non publiées) ont démontré que le thuya est présent en abondance sur les berges du fjord.

Plusieurs des sites visités présentant ces deux critères se trouvaient à l'intérieur du parc du Saguenay, qui est un parc québécois régi par le règlement sur les parcs (Gouvernement du Québec 1994). Ce règlement limite à 10 % le prélèvement d'échantillons pour la recherche dans les zones de conservation extrême. L'abondance de thuyas sur le site choisi était donc importante. Une permission a été obtenue pour réaliser un échantillonnage dans ce parc.

Plusieurs sites répartis sur les deux rives du fjord du Saguenay ont été visités afin de déterminer leur potentiel. Les caractéristiques physiques des différents lieux visités correspondaient aux critères fixés. La forme architecturale « couchée au

sol » a été observée dans plusieurs de ces emplacements. Par contre, le site qui a été retenu présentait une grande abondance de tige ayant le défaut de forme recherchée. Ce site est localisé près de l'anse au Gros ruisseau (rive sud du fjord) (70°24'40" O ; 48°20'30" N) (figure 3.1). L'accès à l'aire d'étude se faisait par bateau.

3.2 LA CARACTÉRISATION DU SITE

Pour caractériser l'aire d'étude, le pourcentage de la pente a été noté à six endroits différents sur le site et à l'emplacement des cinq thuyas échantillonnés, dans le sens de leur tronc (parallèle ou transversale à la pente principale). Ces onze mesures de pente ont été prises à l'aide d'un clinomètre. Les épaisseurs d'humus et de sol minéral ont été notées, à l'aide d'une règle, aux mêmes endroits que pour le pourcentage de la pente.

Lors de la caractérisation du site, les arbres sélectionnés ont été situés les uns par rapport aux autres (figure 3.2). La détermination de la végétation arborescente et arbustive du site a été réalisée dans trois quadrats de 25 m² répartis sur le site (figure 3.2). Les trois quadrats étaient représentatifs de la végétation observée et le nombre de chaque espèce d'arbres et d'arbustes et leur position spatiale (couché ou debout) ont été notés. Les caractéristiques de la végétation herbacée ont été déterminées dans trois quadrats de 1 m², situés à côté des grands

quadrats (figure 3.2). Le pourcentage de recouvrement de chaque espèce était noté, tel que décrit par Saucier (1994).

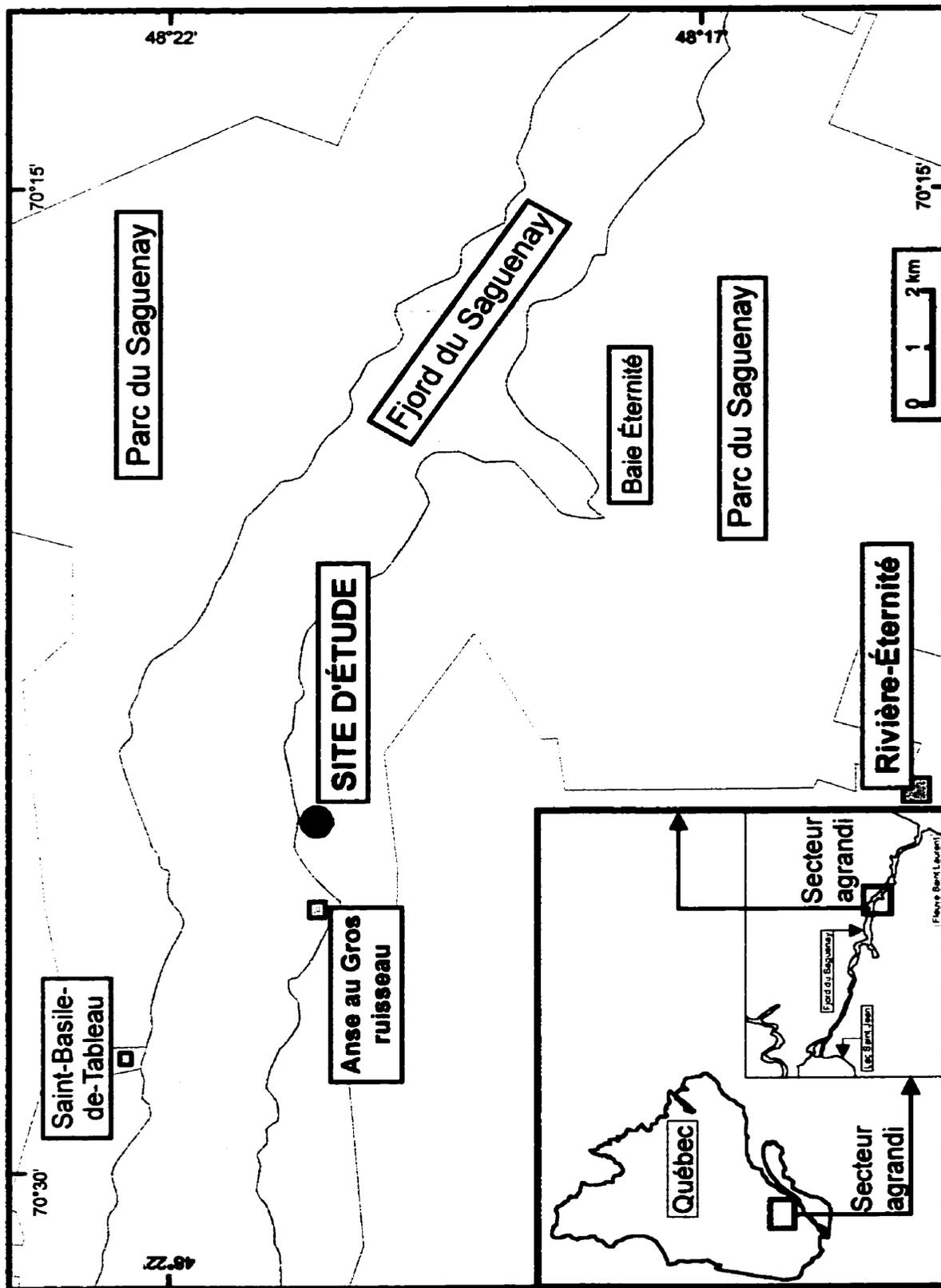


Figure 3-1 Localisation du site étudié.

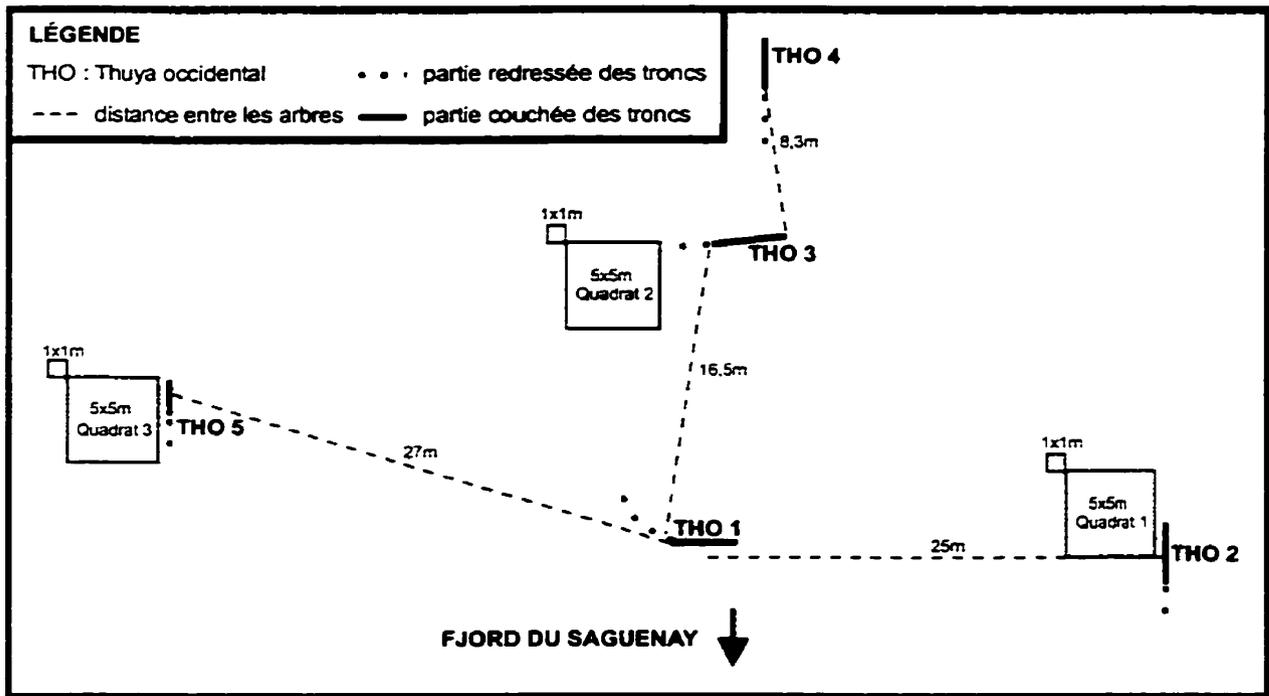


Figure 3.2 Distribution des thuyas échantillonnés à l'anse au Gros ruisseau et des quadrats utilisés pour caractériser le site d'étude.

CHAPITRE IV
MATÉRIEL ET MÉTHODES

4.1 LA FORME ARCHITECTURALE

4.1.1 LA DESCRIPTION

La forme architecturale retenue présentait deux caractéristiques précises qui déterminaient la forme « couchée au sol ». Les thuyas sélectionnés devaient avoir un tronc couché sur le sol sur une distance minimale de un mètre et la cime des arbres devait être redressée. Ces deux caractéristiques conduisaient à des arbres ayant une courbe au niveau du tronc (figure 4.1).

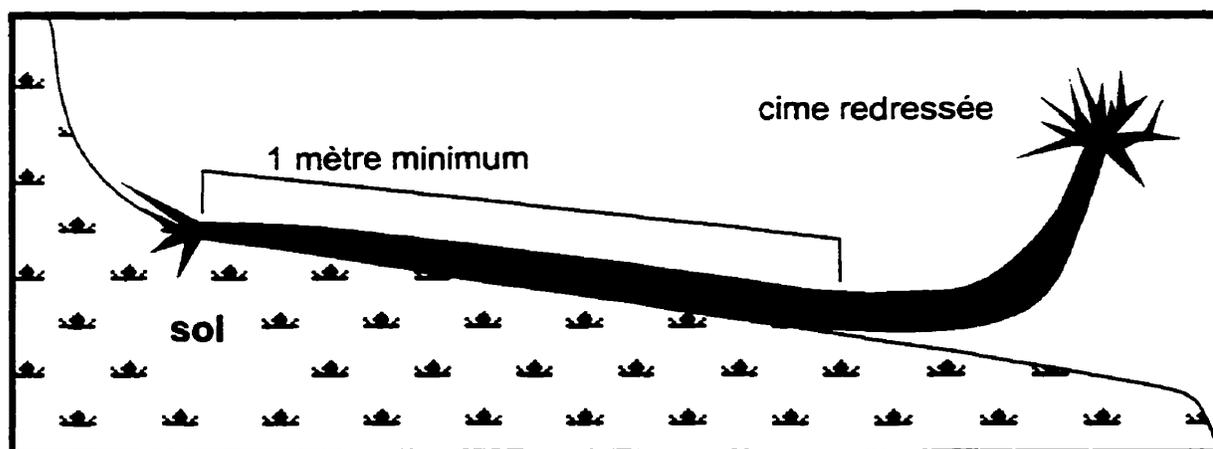


Figure 4.1 Schéma représentant la forme architecturale « couchée au sol ».

4.1.2 LA COMPARAISON AVEC LES AUTRES ESPÈCES

Une comparaison de la forme architecturale a été réalisée entre les différentes espèces d'arbre présentes sur le site et qui avaient plus de 30 centimètres de tige dressée. Les données ont été prélevées dans les trois quadrats de 25 m² (figure 3.2). Les arbres étaient séparés en deux catégories, soit ceux mesurant de 0,30 à 1,30 mètre de tige dressée (qui sont nommés « petits ») et ceux mesurant plus de 1,30 mètre de tige dressée (« grands »). Le nombre de tige de chaque espèce et

leur forme architecturale (debout ou couché) ont été notés. Pour être inclus dans la catégorie des arbres couchés, le tronc devait être étendu sur le sol sur une distance d'au moins un mètre.

4.2 L'ÉCHANTILLONNAGE

4.2.1 LE CHOIX DES ARBRES

Le site d'étude a été parcouru sur une superficie d'environ 1 800 m² afin de déterminer quels individus correspondaient le mieux aux caractéristiques fixées au départ (section 4.1.1). Cinq arbres de diamètre variant de 3,3 à 13,1 centimètres ont été sélectionnés. Les arbres échantillonnés étaient couchés au sol et leurs troncs étaient enterrés dans l'humus sur une longueur plus ou moins importante selon chaque arbre. Cet ensevelissement était dû à l'accumulation annuelle de litière sur les parties couchées des troncs. Pour être échantillonnés, les troncs des arbres ont été déterrés et les racines ont été coupées afin de faciliter la manipulation des tiges. Les arbres ont été récoltés sur toutes leurs longueurs. Les troncs ont été coupés en section de un mètre pour faciliter le transport du site jusqu'au laboratoire. Les racines et la plupart des branches ont été laissées sur les lieux (seules les branches de la cime ont été récoltées).

4.2.2 LA PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Les arbres échantillonnés ont été séchés et des sections de deux centimètres d'épaisseur ont été coupées à tous les 50 centimètres (de zéro mètre jusqu'à la

cime) pour en faire une analyse de tige détaillée. Des sections supplémentaires ont été prélevées lorsqu'une étude plus détaillée était nécessaire (par exemple, tout au long des courbes) (figure 4.2). Les sections supplémentaires étaient toujours coupées par secteur de 25 centimètres de tige (en moyenne 12 sections par secteur). Une fois les sections coupées, elles ont été sablées avec du papier de grains de plus en plus fins (80, 220 et 400). Cette étape a permis de mettre en évidence les cernes de croissance. Les thuyas occidentaux produisent souvent

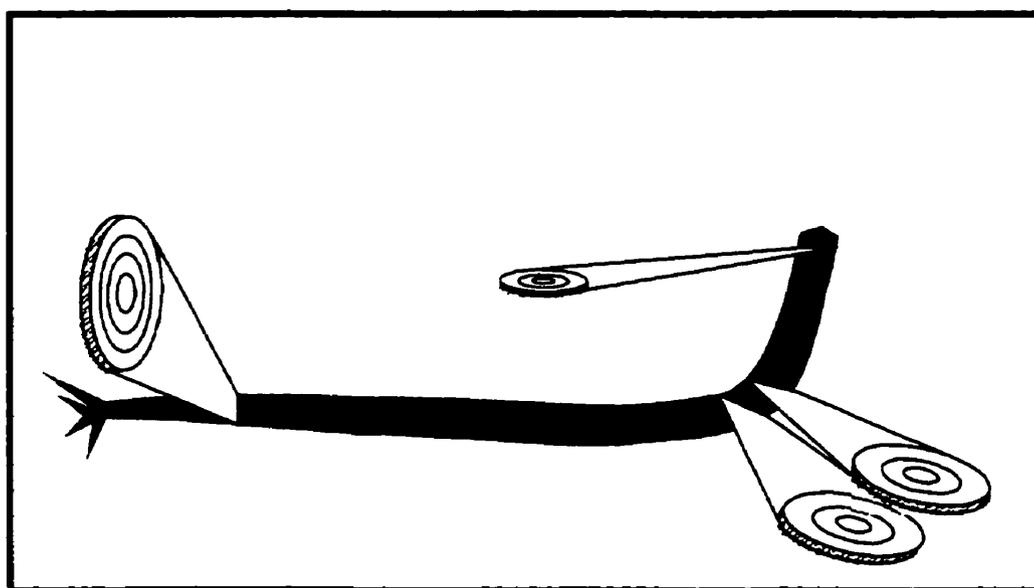


Figure 4.2 Schéma de la coupe des sections des arbres étudiés (avant et après la courbure). Parties droites des troncs : sections à tous les 50 centimètres ; partie courbe des troncs : sections à tous les 2 centimètres.

des cernes difficiles à distinguer. Ils peuvent être très minces ou le bois final peut être composé d'une ou deux cellules seulement. Le sablage ne permettait pas de bien voir ces cernes. Une autre méthode était alors utilisée pour faire ressortir les

caractéristiques de ces cernes. Ces secteurs difficiles étaient mouillés, coupés à l'aide de lames de rasoir et colorés à la craie.

4.2.3 LA RECONSTRUCTION DES ARBRES

Les arbres ont été reconstruits afin de déterminer la forme architecturale précise de chacun des arbres et l'emplacement exact des rayons à être mesurés. Les arbres étaient reconstruits sur le sol et deux lignes étaient tracées. L'une d'elle représentait le sol et permettait de déterminer la hauteur des sections à partir du sol (distance Y). L'autre ligne était dessinée perpendiculairement à la première à la distance zéro mètre de tronc et a permis de déterminer la distance des sections par rapport à la distance zéro mètre (distance X) (figure 4.3). La conjugaison de ces deux mesures a permis la schématisation de la forme architecturale spécifique de chaque arbre étudié.

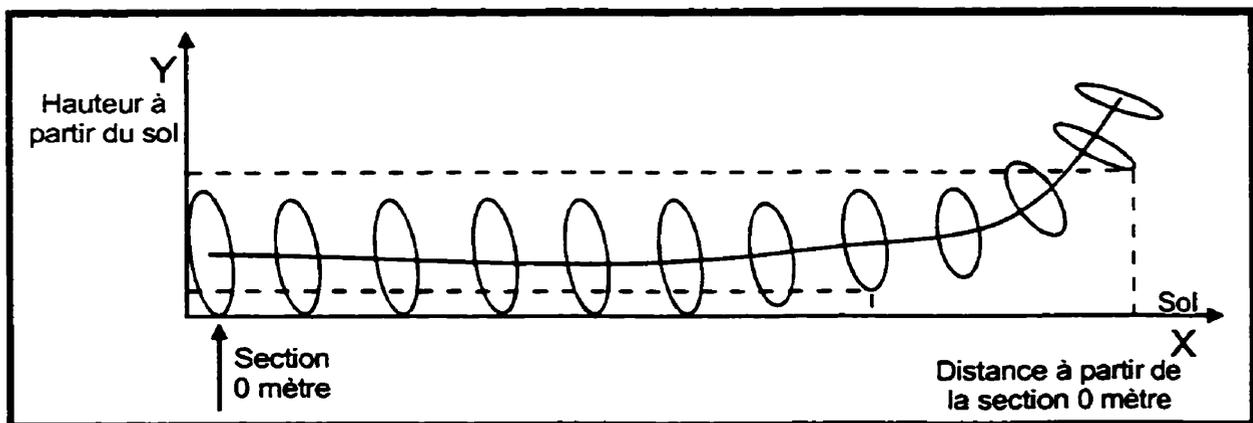


Figure 4.3 Détermination des coordonnées X et Y des sections des arbres à l'étude pour établir les schémas des formes architecturales spécifiques à chaque thuya étudié.

4.3 L'ANALYSE

Les sections ont toutes été analysées selon la même méthode. Quatre rayons perpendiculaires, passant par la moelle, étaient toujours situés aux mêmes endroits sur les sections. Pour les sections situées sur la partie du tronc parallèle au sol (lorsque le côté des sections correspondant aux racines est placé à l'opposé de l'observateur) le rayon 1 (R1) se trouvait vers le haut, le rayon 2 (R2) vers la droite, le rayon 3 (R3) vers le bas (donc vers le sol) et le rayon 4 (R4) vers la gauche (figure 4.4a). Après la courbure, les rayons conservaient leur position, c'est-à-dire que les rayons 2 et 4 restaient respectivement des côtés droit et gauche des sections. Le rayon 1 se retrouvait vers l'intérieur de la courbe et le rayon 3 vers l'extérieur de celle-ci (figure 4.4b). Les quartiers formés par ces quatre rayons perpendiculaires ont été nommés de la façon suivante : supérieur droit = quartier 1 (Q1) ; inférieur droit = quartier 2 (Q2) ; inférieur gauche = quartier 3 (Q3) et supérieur gauche = quartier 4 (Q4) (figure 4.4).

4.3.1 LA CROISSANCE EN LARGEUR

4.3.1.1 Les mesures

La préparation des sections de tronc des thuyas occidentaux a permis d'étudier différentes caractéristiques de la croissance. La partie décrite ici, expliquant la mesure des largeurs de cernes, réfère à la méthode décrite par Stokes et Smiley (1968). Le nombre de cernes a été compté sur chaque rayon, sous une loupe

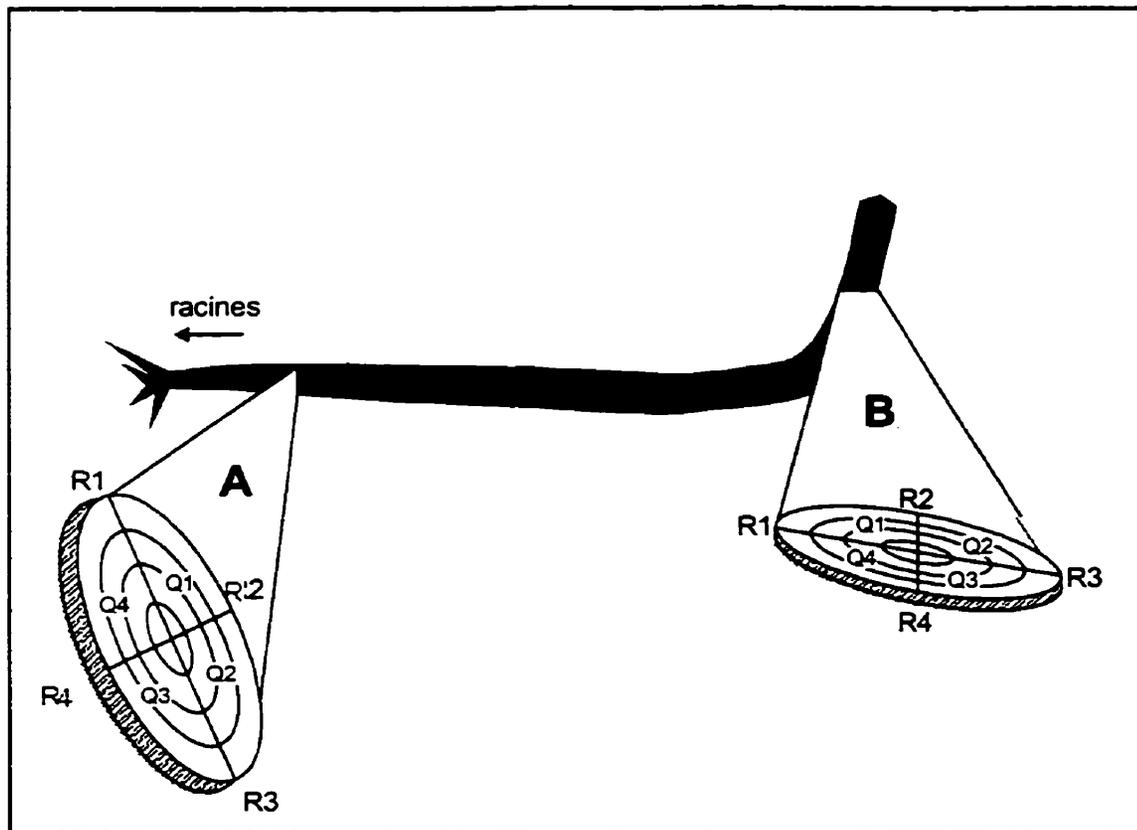


Figure 4.4 Emplacement des rayons (A) sur la partie de tronc couchée au sol et (B) après la courbure.

binoculaire de 400x maximum. S'il existait une différence d'âge entre les rayons d'une même section, les années problématiques (présentant des cernes incomplets par exemple) étaient déterminées et notées. La mesure de la largeur des cernes de croissance a été réalisée à l'aide d'une table dendrométrique de type Henson (précision de 0.01 millimètre). Les données étaient automatiquement transformées et enregistrées dans un ordinateur par le logiciel MacTrim.

4.3.1.2 L'interdatation

Les données mesurées sur chacun des rayons ont été reproduits graphiquement sur du papier mince. La superposition de ces graphiques sur une table lumineuse a permis l'interdatation des courbes de croissance (Stokes et Smiley 1968 ; Fritts 1976 ; Baillie 1982, 1995). L'interdatation consiste à faire correspondre les variations de fréquence annuelles et à long terme entre les courbes. La méthode d'interdatation est décrite par Stokes et Smiley (1968) et par Schweingruber (1988). L'interdatation s'est faite en deux étapes : 1) entre les quatre rayons d'une même section et 2) entre les différentes hauteurs de la tige d'un arbre. Cette procédure a permis d'établir des courbes de croissance moyennes pour chacun des arbres étudiés. Les données ont ensuite été vérifiées à l'aide du programme statistique de corrélation COFECHA (Holmes 1983). Ce programme permet de détecter les erreurs de mesure qui n'ont pas été trouvées lors de l'interdatation visuelle. Les erreurs trouvées par ce programme ont aussi été corrigées dans les fichiers de donnée.

4.3.2 LA CROISSANCE APICALE

Puisque les arbres à l'étude avaient une partie du tronc étendu sur le sol, la croissance en longueur ou en hauteur des tiges est appelée la croissance apicale. Les graphiques de la croissance apicale ont été établis à partir de deux informations notées à partir des sections : la distance sur le tronc à partir de la première section détectée (analysée ou non), en mètre, et l'année du début de la

formation de ces sections (lorsque la moelle était présente). Ces deux informations conjuguées ont permis d'extrapoler la croissance en longueur. Certaines sections situées près de la base étaient pourries, leur âge exact est donc inconnu. La croissance en longueur, pour ces parties de tronc, n'a pas été calculée.

4.3.3 LES CERNES INCOMPLETS

Les cernes incomplets ont été compilés à l'aide du logiciel COFECHA. Ce programme mentionne les années ayant des cernes absents, sur quelle section et sur quel rayon ces cernes sont positionnés. Les cernes incomplets avaient été détectés lors du décompte du nombre de cerne par rayon ou lors de l'interdatation.

4.3.4 LE BOIS DE RÉACTION

Le bois de réaction a été pris en note pour les sections à intervalle de 50 centimètres et de 25 centimètres, lorsque ces sections intermédiaires étaient présentes. Les critères utilisés pour considérer la présence du bois de réaction étaient : 1) le changement dans la couleur (épaisseur de la paroi cellulaire) ; 2) la dureté du bois (Timmel 1986) (déterminé lors de coupes avec des lames de rasoir) ; 3) le bois de réaction devait être présent sur environ la moitié ou plus de la largeur du cerne concerné. Les années présentant du bois de réaction et l'emplacement de cette caractéristique sur les sections (rayon ou quartier) étaient notés.

4.3.5 LES RAYONS EXCENTRIQUES

L'excentricité peut être déterminée pour la tige d'un arbre, pour une section ou pour chaque cerne. Cette partie de la méthode s'est attardée sur l'excentricité des sections. L'emplacement du rayon excentrique (ou rayon le plus long, équivalent au rayon ayant eu la meilleure croissance) diffère normalement de l'emplacement des quatre rayons mesurés (qui étaient situés à des endroits pré-définis). Pour déterminer l'emplacement du rayon excentrique, chaque section a été placée sur un cercle divisé en degré et l'emplacement (le degré) du rayon le plus long (ou excentrique) a pu être déterminé (figure 4.5).

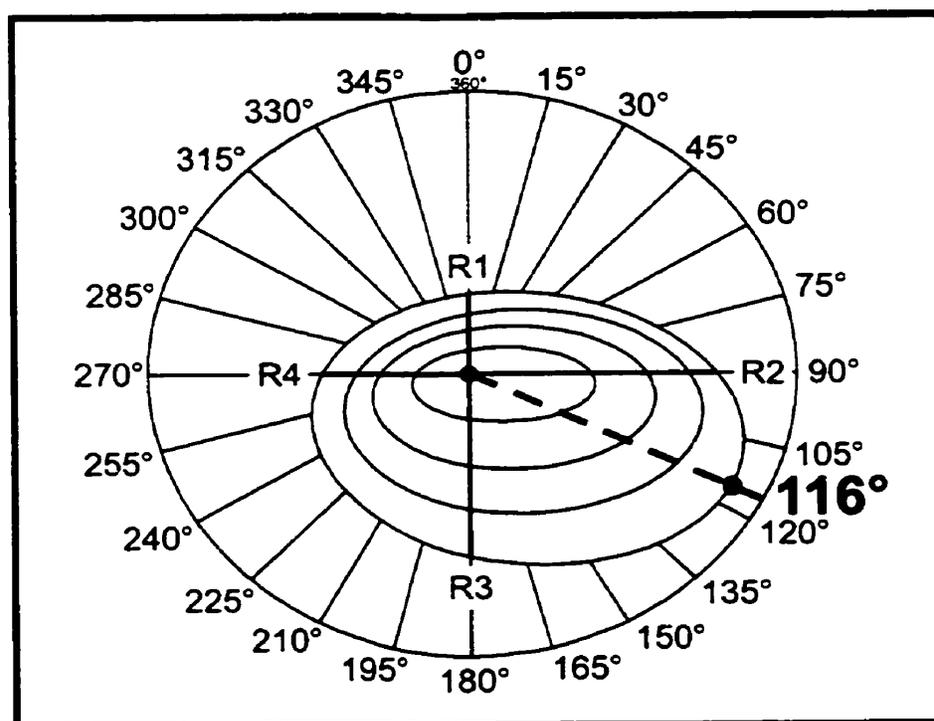


Figure 4.5 Exemple de détermination de l'emplacement du rayon excentrique (rayon le plus long) sur la surface d'une section (pour cette section : 116°).

4.3.6 LES CERNES EXCENTRIQUES

Les cernes de croissance n'ont pas une largeur égale tout autour d'une section. C'est la différence de cette largeur qui permet d'observer des cernes excentriques. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences dans la largeur d'un même cerne : bois de réaction, cernes discontinus, poussée de croissance, mortalité cambiale ou apicale, etc. Dans le cadre de cette étude, quatre largeurs de cerne étaient mesurées pour chaque année de croissance et pour chaque section. Les quatre valeurs obtenues par année n'étaient pas toutes égales. Un programme a été conçu (Logiciel SAS 1988) pour cette section et il est présenté dans l'annexe I. Les résultats obtenus sont expliqués ici :

- 1) la valeur la plus large pour chaque cerne mesuré ;
- 2) la moyenne des trois valeurs les moins larges pour chaque cerne ;
- 3) la valeur obtenue en 1 divisée par la valeur obtenue en 2, le tout multiplié par 100 (pourcentage), cerne par cerne.

Toutes ces informations ont été compilées pour les sections des arbres à des intervalles de 50 centimètres (et au 25 centimètres lorsque ces sections étaient étudiées). Le calcul de l'excentricité correspond aux valeurs obtenues à partir du calcul décrit au point 3 (exemple à la figure 4.6). Le calcul a été effectué pour toutes les années, mais pour mettre en évidence les différences d'excentricité, seules les valeurs de 200 % et plus ont été conservées et mises en graphique. Cette valeur indiquait que la largeur d'un cerne sur un rayon donné (R1, R2, R3 ou R4) et pour une année donnée était au moins deux fois plus large que la moyenne des trois autres valeurs mesurées, pour cette même année.

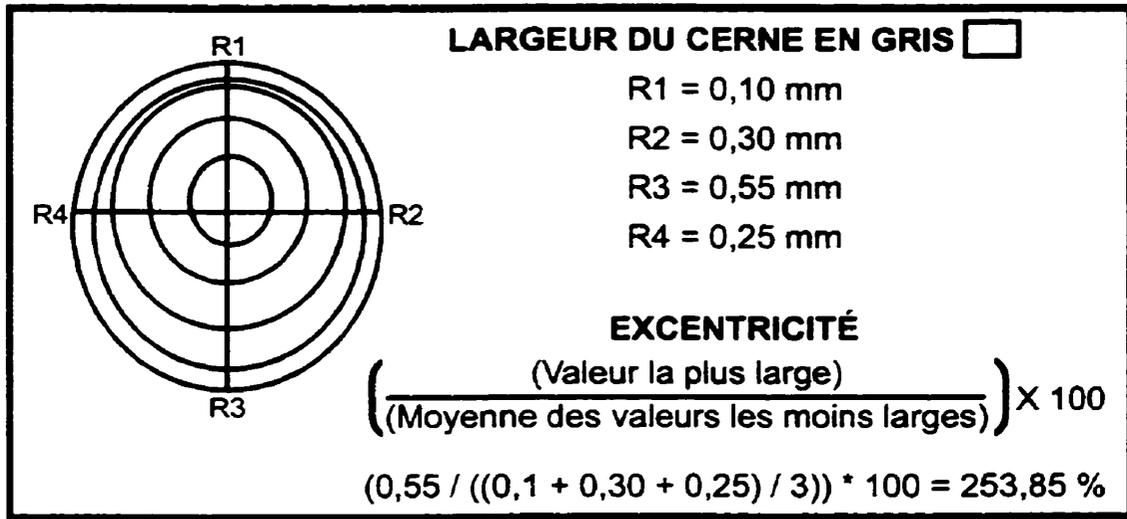


Figure 4.6 Exemple du calcul de l'excentricité pour un cerne de croissance.

CHAPITRE V
RÉSULTATS

5.1 LA CARACTÉRISATION DU SITE

La superficie du territoire couvert par les arbres échantillonnés est de 1800 m². Les caractéristiques générales du site sont une pente abrupte et un sol mince (tableau 5.1). Le pourcentage de la pente variait de 15 à 94 % dans les 11 emplacements de mesure, pour une moyenne de 49,9 %. La pente principale se dirigeait vers le fjord du Saguenay.

Tableau 5.1 Description générale du site d'étude et des microsites spécifiques de chaque thuya étudié

EMPLACEMENT	PENTE (%)	SOL (épaisseur, en cm)		ORIENTATION DU TRONC **
		HUMUS	MINÉRAL	
THO* 1	35	7	1	PERPENDICULAIRE
THO 2	43	25	3	PARALLÈLE
THO 3	37	7,5	2,5	PERPENDICULAIRE
THO 4	58	4	13	PARALLÈLE
THO 5	42	18	0	PARALLÈLE
1	72	13	1	
2	37	15,5	0	
3	94	17,5	1	
4	51	15	0	
5	15	12	3	
6	65	5	0	
MOYENNE	49,9	12,7	2,2	

* THO : *Thuja occidentalis* L.

** l'orientation est donnée par rapport au sens de la pente principale

Le sol variait d'une épaisseur de 5 à 28 centimètres et il était en moyenne de 14,9 centimètres d'épaisseur. L'humus composait de 4 à 25 centimètres de ce sol (12,7

centimètres en moyenne) alors que le sol minéral variait d'une épaisseur de 0 à 13 centimètres (2,2 centimètres en moyenne). Sous le sol meuble se trouvaient des amas de grosses pierres.

Une forêt à dominance de conifères couvre ce territoire, bien que quelques feuillus y soient présents (tableau 5.2). Tous les arbres et arbustes de plus de 30 centimètres de tige dressée et qui ont été observés dans les trois quadrats de 25m² sont considérés dans ce tableau. Les conifères représentaient 88,8 % des arbres, répartis de la façon suivante : sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) : 43,1 % ; thuya occidental : 38,4 % et épinette noire : 7,3 %. Les feuillus sont répartis entre cinq espèces et représentaient 11,2 % des arbres de ce peuplement.

Tableau 5.2 Description de la végétation arbustive et arborescente de l'aire d'étude, pour les trois quadrats de 25 m² (arbres et arbustes de plus de 30 cm de tige dressée)

GROUPE	ESPÈCE	NOMBRE	%
CONIFÈRES	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	65	43,1
	<i>Picea mariana</i> (Mill.) BSP	11	7,3
	<i>Thuja occidentalis</i> L.	58	38,4
TOTAL		134	88,8
FEUILLUS	<i>Acer spicatum</i> Lam.	7	4,6
	<i>Amelanchier</i> sp	2	1,3
	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	3	2,0
	<i>Ribes</i> sp	2	1,3
	<i>Sorbus americana</i> Marsh.	3	2,0
TOTAL		17	11,2

Plusieurs espèces de mousses et de fougères et quelques espèces d'herbacées étaient présentes dans le site et la litière était abondante (tableau 5.3). Quelques espèces ligneuses (arbres et arbustes de moins de 30 centimètres de tige dressée) étaient présentes dans cette couche comme l'érable à épis (*Acer spicatum*), le thuya occidental, le sapin baumier et l'épinette noire.

Tableau 5.3 Caractéristiques de la végétation herbacée et des plantules de moins de 30 centimètres de tige, par pourcentage de recouvrement, pour les trois quadrats de 1 m²

ESPÈCES	QUADRATS			COTES* (%)
	1	2	3	
<i>Abies balsamea</i> (< 30cm)	--	E	+	A = 81-100
<i>Acer spicatum</i> (< 30cm)	F	F	+	B = 61-80
<i>Aralia nudicaulis</i>	--	E	+	C = 41-60
Champignons (toutes espèces)	+	--	--	D = 26-40
<i>Dryopteris disjuncta</i>	--	D	--	E = 6-25
<i>Equisetum sp</i>	--	--	E	F = 1-5
<i>Hylocomium splendens</i>	C	A	C	+ = <1
Lichens (toutes espèces)	+	F	E	-- = absent
Litière	C	E	A	
<i>Picea mariana</i>	--	--	+	
<i>Ptilium sp</i>	--	--	E	
<i>Shagnum sp</i>	--	--	F	
<i>Thuja occidentalis</i> (< 30cm)	--	+	C	
<i>Trientalis borealis</i>	--	E	+	

* les cotes correspondent à celles décrites par Saucier (1994)

Dans les trois quadrats de 25 m², 58 thuyas occidentaux ont été observés, dont 72,41 % étaient couchés sur le sol sur une distance minimale de un mètre (tableau 5.4). Parmi toutes les autres espèces d'arbres présentes sur le site, seulement un sapin (1,54 %) et une épinette noire (9,09 %) présentaient la forme architecturale étudiée.

Tableau 5.4 Description de la formes architecturale des tiges des conifères échantillonnés dans les quadrats de 25 m² (incluant tous les échantillons de plus de 30 centimètres de tige)

ESPÈCES	FORME			
	DEBOUT		COUCHÉE	
	n	%	n	%
<i>Abies balsamea</i>	64	98,46	1	1,54
<i>Picea mariana</i>	10	90,91	1	9,09
<i>Thuja occidentalis</i>	16	27,59	42	72,41

5.2 L'ARCHITECTURE DES TIGES

L'échantillon THO 1 était couché au sol sur une longueur de 3,00 mètres et il avait une longueur totale de près de six mètres (figure 5.1). Le tronc suivait une pente transversale de 35 % (tableau 5.1). Cet arbre se retrouvait dans le vide après 3,00 mètres et la cime (partie dressée) était appuyée sur une roche (à partir de 4,50 mètres). Les sections ont été coupées à tous les deux centimètres de 2,00 mètres à 3,50 mètres.

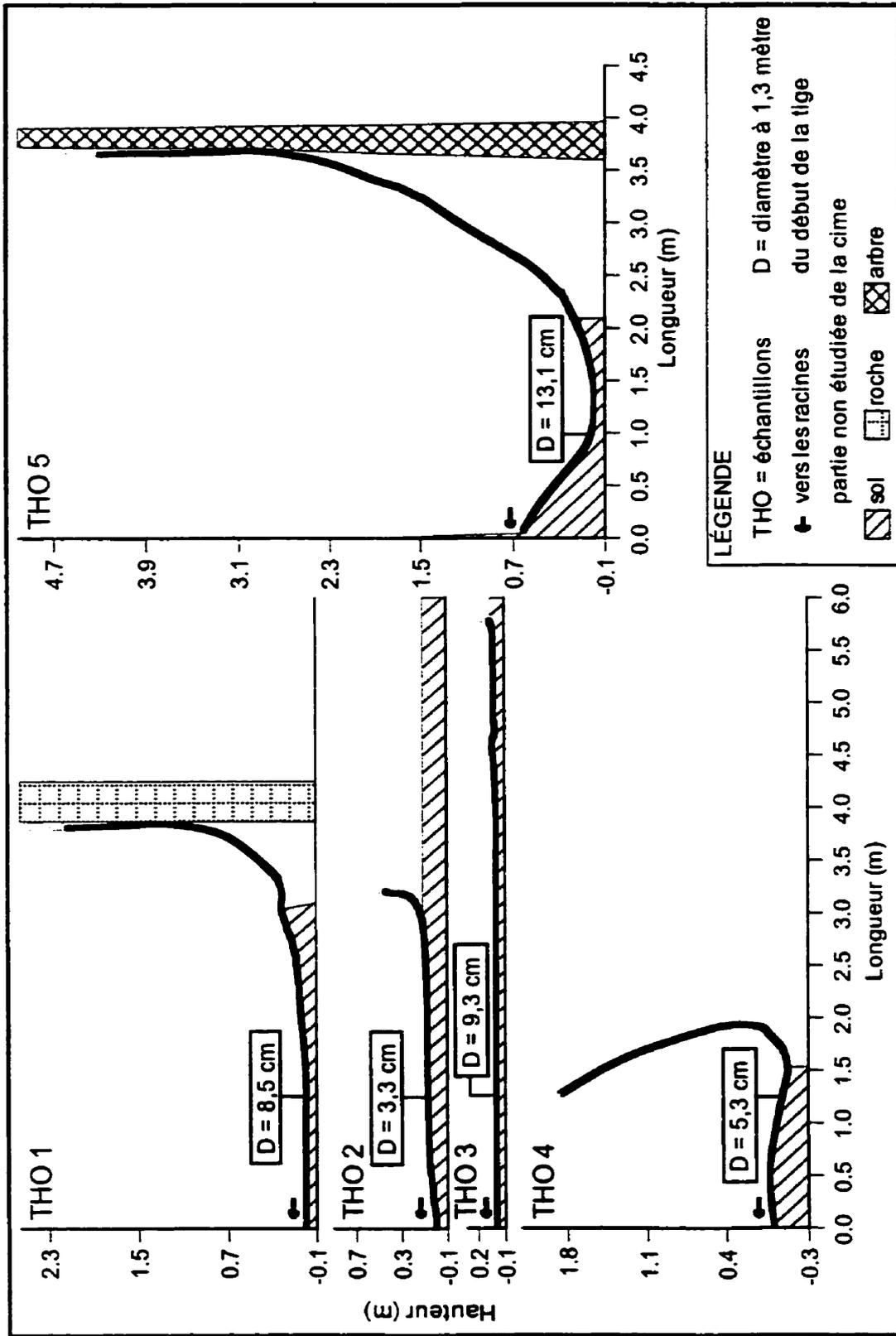


Figure 5.1 Représentation schématique de la forme architecturale des cinq thuyas échantillonnés et des caractéristiques spécifiques des microsites pour chacun. La pente n'est pas représentée.

L'échantillon THO 2 était couché au sol sur presque toute sa longueur, soit pendant 3,65 mètres, sur une pente de 43 % (figure 5.1 et tableau 5.1). Sa longueur totale est d'environ 4,25 mètres et les sections supplémentaires ont été prélevées aux deux centimètres de 0,00 à 1,00 mètre et de 3,00 à 3,85 mètres. Le sol sous cet arbre était continu et se poursuivait plus loin que la cime.

L'échantillon THO 3 était couché sur le sol sur 5,90 mètres et il avait une longueur totale de près de 6,25 mètres (figure 5.1). Le tronc était étendu sur une pente transversale de 37 % (tableau 5.1). Les sections ont été prélevées à tous les deux centimètres de 4,50 à 5,00 mètres et de 5,75 à 6,00 mètres. Le sol était continu sous cet arbre et des racines étaient cassées dans la partie supérieure du tronc. Un arbre mort était tombé perpendiculairement sur cet échantillon, proche de la courbure de la cime.

L'échantillon THO 4 avait 1,50 mètre de tronc sur le sol avant de se redresser, sur une pente de 58 % (figure 5.1 et tableau 5.1). Il mesurait environ 4,25 mètres et les sections ont été prélevées aux deux centimètres de 1,50 à 2,50 mètres. Le sol se terminait de façon abrupte à 1,50 mètre de tronc, l'arbre se retrouvait dans le vide sur 2,75 mètres de longueur.

L'échantillon THO 5 avait 2,25 mètres de tronc le long du sol, dans un secteur accidenté, avec une pente de 42 % (figure 5.1 et tableau 5.1). Les sections

supplémentaires ont été prélevées de 2,50 à 3,00 mètres et de 4,00 à 4,50 mètres. Cet échantillon avait une longueur totale de près de 7,25 mètres et la cime était appuyée sur un arbre. La cime se retrouvait dans les branches de cet arbre.

Parmi les échantillons, trois avaient une cime verticale importante (THO 1, THO 4 et THO 5). Ces trois arbres avaient soit un appui pour la cime (THO 1 et THO 5) ou étaient dans le vide (THO 1 et THO 4). Les deux autres échantillons (THO 2 et THO 3) reposaient sur le sol sur toute la longueur du tronc, sauf pour la partie extrême de la cime. Pour ces deux échantillons, le sol se poursuivait de manière continue après la cime.

La présence de racines adventives a été détectée pour les cinq échantillons. Elles n'ont pas été incluses dans la recherche, car cette dernière se limitait à l'étude de la tige.

5.3 LA CROISSANCE RADIALE

5.3.1 L'ÂGE MINIMUM

Un âge minimum a pu être déterminé pour chaque échantillon à l'étude (tableau 5.5). L'âge n'a pu être fixé de façon certaine pour tous les arbres étudiés, soit parce que le cœur était pourri (THO 1, 3 et 5), soit parce que le changement anatomique entre le cylindre de la racine et la moelle de la tige n'a pas été trouvé (THO 2 et 4). Le plus vieux des échantillons avait 179 ans (THO 1) alors que le

plus jeune avait 63 ans (THO 2). Les trois autres échantillons étaient âgés de 150 ans (THO 3), de 130 ans (THO 4) et de 140 ans (THO 5).

Tableau 5.5 Âge minimum des échantillons à l'étude et emplacement sur la tige (en mètre) de la section la plus âgée

ARBRES	SECTION LA PLUS ÂGÉE	
	Âge	Emplacement (m)
THO 1	179	0,25
THO 2	63	0,00
THO 3	150	0,50
THO 4	130	0,00
THO 5	140	2,62

5.3.2 LA CROISSANCE RADIALE MOYENNE

La croissance radiale est faible pour l'ensemble des arbres, avec une croissance moyenne annuelle de 0,33 millimètre par année (tableau 5.6). L'échantillon THO 4 a la croissance radiale moyenne annuelle la plus faible (0,27 millimètre / an) alors que l'échantillon THO 2 présente la croissance radiale moyenne annuelle la plus élevée (0,41 millimètre / an). La valeur minimale des cernes mesurés est de 0 millimètre pour tous les arbres et la valeur maximale varie de 1,45 millimètre (THO 1) à 4,32 millimètres (THO 3).

Tableau 5.6 Données concernant la croissance radiale des thuyas étudiés

ÉCHANTILLONS	CROISSANCE RADIALE (mm)	
	MOYENNE*	MINIMUM / MAXIMUM**
THO 1	0,30	0 / 1,45
THO 2	0,41	0 / 1,53
THO 3	0,35	0 / 4,32
THO 4	0,27	0 / 2,30
THO 5	0,34	0 / 1,78
MOYENNE	0,33	0 / 2,28

* MOYENNE : croissance radiale moyenne pour chacun des arbres étudiés.

** MINIMUM / MAXIMUM : valeur minimum et maximum de la croissance radiale, en considérant l'ensemble des valeurs obtenues, pour chaque arbre.

5.3.3 LES COURBES DE CROISSANCE RADIALE

La courbe de croissance radiale moyenne de l'échantillon THO 1 montre une importante variation de la croissance dans les premières années (1819 à 1851) (figure 5.2). Cette période inclut seulement un ou deux rayons de 1819 à 1854. Trois plateaux de croissance sont visibles sur cette courbe : de 1852 à 1890 ; de 1891 à 1924 et de 1960 à 1996. Une période de croissance radiale plus importante et de variation de fréquence inter-annuelle faible est visible de 1925 à 1959.

L'échantillon THO 2 montre une croissance radiale variable, avec deux chutes importantes, soit en 1971 et en 1990 (figure 5.2). La croissance radiale moyenne était de 0,41 millimètre par an en moyenne et elle est restée faible après la seconde chute de croissance.

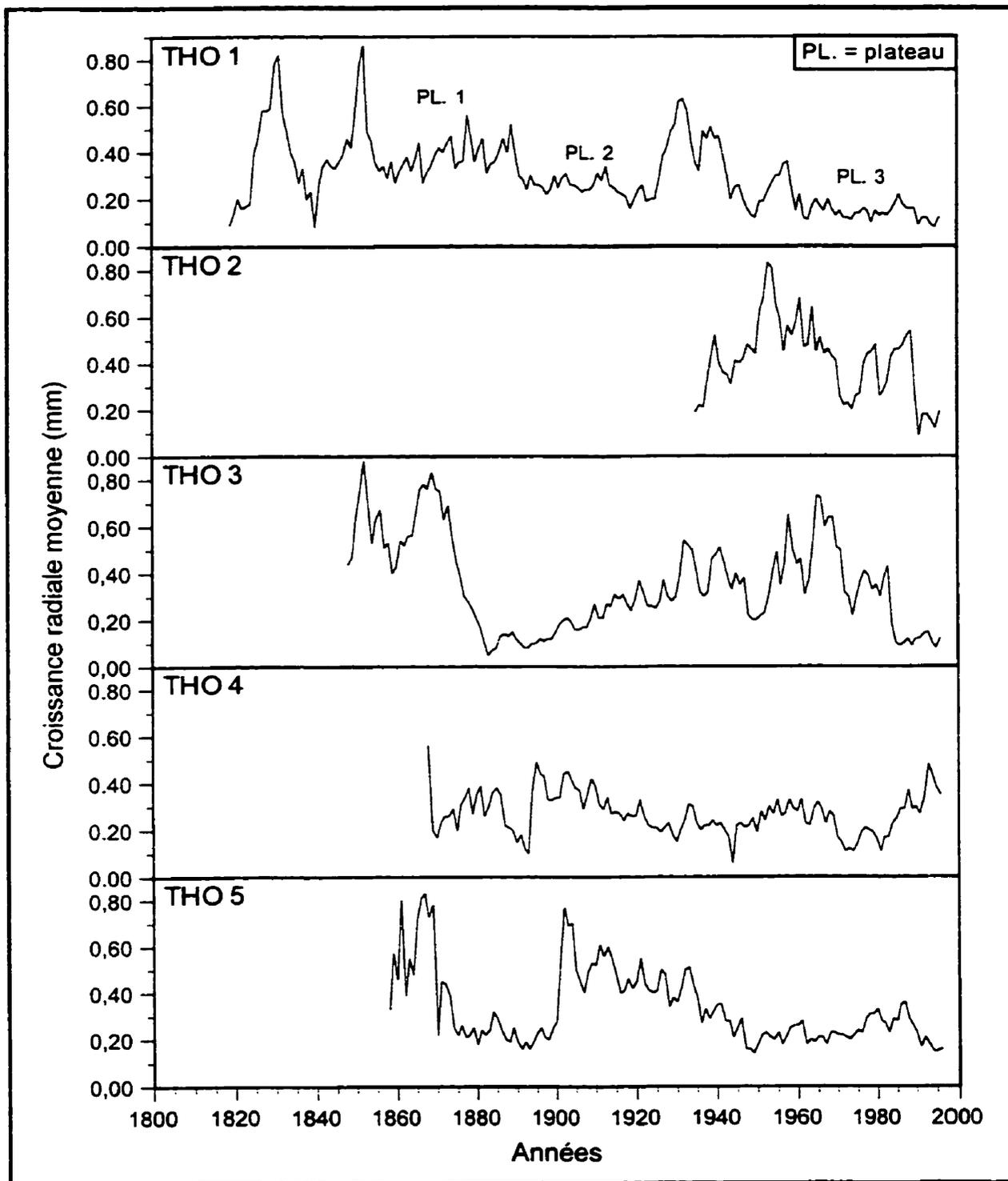


Figure 5.2 Courbes de croissance radiale moyenne, par arbre, des cinq échantillons étudiés, échantillonnés à l'anse au Gros ruisseau, sur les rives du fjord du Saguenay (tous les rayons mesurés sont inclus dans les moyennes).

La courbe de croissance de l'échantillon THO 3 présente une période de bonne croissance de 1848 à 1882 (figure 5.2). Une réduction de croissance est visible de 1876 à 1883 et est suivie d'une reprise graduelle jusqu'en 1931. De 1932 à 1983, la croissance est de nouveau importante. Une chute de la croissance est visible en 1984 et elle est suivie d'une période de croissance radiale très faible.

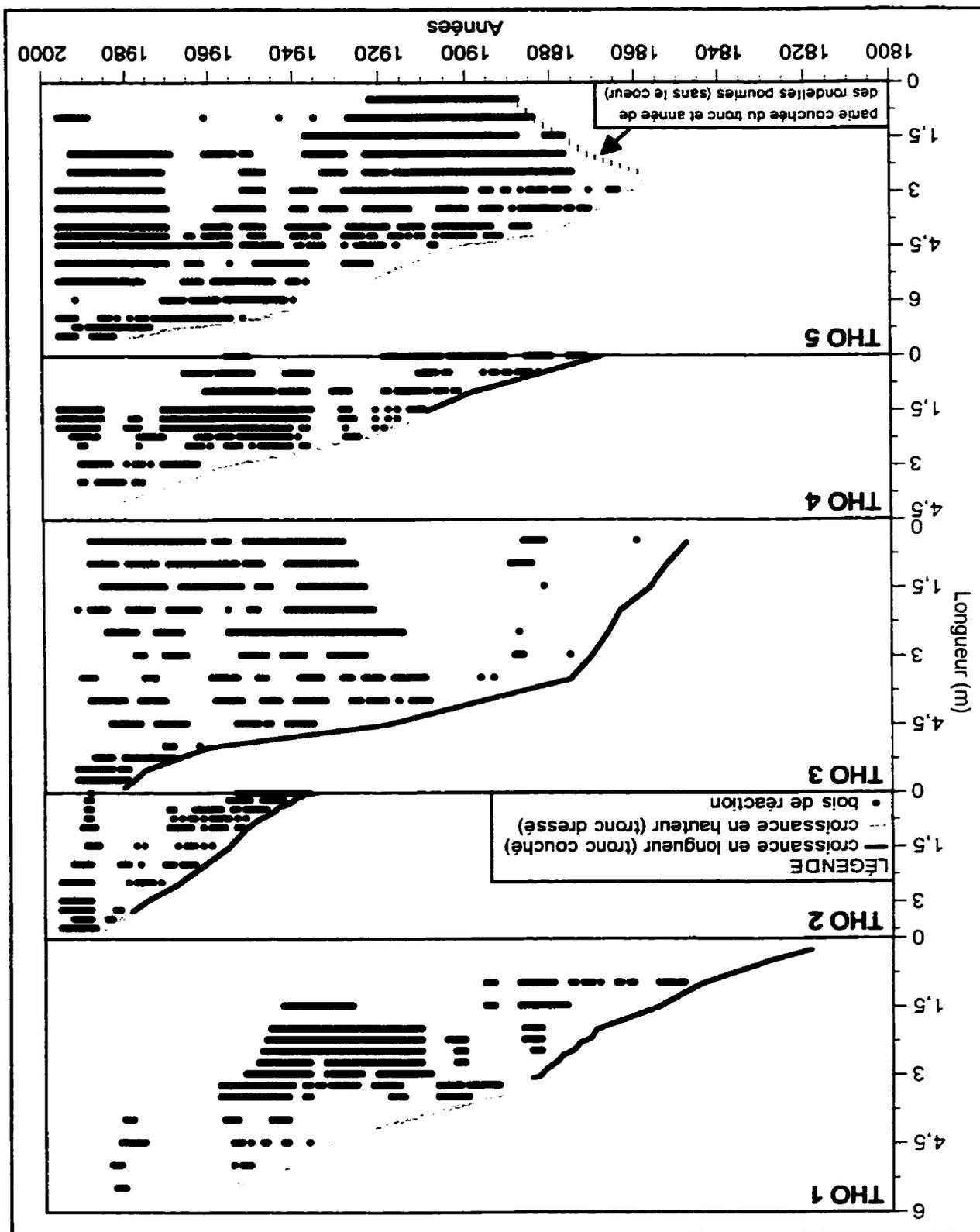
La courbe de croissance de l'échantillon THO 4 présente une chute importante d'une seule année, en 1944 (figure 5.2). Deux secteurs de réduction de croissance radiale sont aussi visibles, soit de 1886 à 1893 et de 1969 à 1975. La croissance radiale semble être en augmentation à partir de 1982.

L'échantillon THO 5 présente, de 1858 à 1869, une croissance radiale relativement bonne (figure 5.2). Une chute de croissance importante est présente en 1870 et la croissance reste faible jusqu'en 1900, où une reprise importante de la croissance est observée. Une diminution graduelle de la croissance débute en 1905 pour se stabiliser à un niveau faible vers 1946.

5.4 LA CROISSANCE APICALE

Pour THO 1, la croissance apicale en moyenne de 3,8 centimètres par année (figure 5.3). Deux secteurs de croissance apicale plus importante sont à noter, soit de 2,00 à 3,50 mètres et de 4,50 à 5,00 mètres.

Figure 5.3 Croissance apicale extrapolée et cernes de bois de réaction pour différentes sections des tiges des thuyas étudiés.



La croissance apicale pour THO 2 était de 7,2 centimètres par an en moyenne (figure 5.3). La croissance apicale se divise en deux secteurs distincts, soit de 0,00 à 0,50 mètre (croissance lente) et de 0,50 mètre à la cime (croissance plus rapide).

La croissance apicale de THO 3 était en moyenne de 4,1 centimètres par an et elle se divise en trois secteurs (figure 5.3). Deux de ces secteurs avaient une bonne croissance, soit de 0,50 à 3,50 mètres (10,7 centimètres / an en moyenne) et de 5,00 à 6,00 mètres (4,4 centimètres / an en moyenne). Le troisième secteur (3,50 à 5,00 mètres) avait une croissance apicale faible de seulement 1,8 centimètre par année.

Pour l'échantillon THO 4, la croissance apicale moyenne était de 3,5 centimètres par année (figure 5.3). La croissance apicale était la plus importante de 1,00 à 1,75 mètre de tige. Le reste de la tige de cet échantillon (0,00 à 1,00 mètre et 1,75 à 4,00 mètres) variait peu autour de la croissance apicale moyenne.

La croissance en longueur pour l'échantillon THO 5 n'est pas connue pour les hauteurs inférieures à 2,62 mètres parce que toutes les sections de hauteur inférieure étaient décomposées dans le centre. La croissance apicale moyenne pour le secteur connu (2,62 à 7,00 mètres) était de 3,5 centimètres par année (figure 5.3). Deux ralentissement importants de la croissance étaient visibles, soit

de 4,00 à 4,50 mètres et de 6,50 à 7,00 mètres. Deux secteurs démontraient une meilleure croissance en longueur, soit de 2,95 à 4,00 mètres et de 4,50 à 6,50 mètres.

5.5 LE BOIS DE RÉACTION

Le bois de réaction est présent de façon importante pour tous les échantillons et à toutes les hauteurs des troncs (figure 5.3). Un patron général peut en être dégagé. Pour les échantillons THO 1, THO 2, THO 4 et THO 5, le bois de réaction débute souvent tôt (près de la moelle). Une présence importante de bois de réaction est observée sur un nombre important d'années (qui diffèrent entre les arbres) et certaines périodes sont plus marquées que d'autres (plus de bois de réaction dans certains secteurs de tronc). Pour l'échantillon THO 3, le patron est différent. Le bois de réaction débute abruptement, plus tard que pour les autres échantillons pour les hauteurs de 0,50 à 3,50 mètres. Par la suite, THO 3 présente un patron semblable aux autres arbres.

La tige de l'échantillon THO 1 était dans un état avancé de décomposition, le bois de réaction a donc été notée à partir de 1,00 mètre seulement. Le bois de réaction est présent à toutes les hauteurs étudiées, en quantité plus ou moins importante (figure 5.3). Un groupe intense de bois de réaction pour THO 1 est observé de 2,00 à 3,50 mètres pour les années 1909 à 1949. À partir de 4,00 mètres, la quantité de bois de réaction est moins importante.

Pour l'échantillon THO 2, le bois de réaction est présent de façon importante tout au long de la tige et il se divise en deux secteurs (figure 5.3). D'abord, pour toutes les hauteurs, le bois de réaction débute tôt après la formation de la moelle et il est produit sur une longue période de temps. Ensuite, après une période d'arrêt, le bois de réaction redevient important de 1987 à 1996, pour toutes les hauteurs.

L'échantillon THO 3 présente un patron de bois de réaction différent des autres arbres (figure 5.3). Dans un premier secteur de tronc, soit de 0,50 à 3,50 mètres, le bois de réaction est présent de manière intensive et continu à partir de 1910 à 1929, selon les hauteurs. De 4,00 mètres à la cime, le bois de réaction débute généralement peu de temps après la moelle et il est présent en continuité ou presque. Cette production massive de bois de réaction est présente à toutes les hauteurs.

L'échantillon THO 4 a commencé à produire du bois de réaction peu de temps après la formation de la moelle pour toutes les hauteurs sans exception (figure 5.3). Cette production de bois de réaction était intensive jusqu'au moment de la coupe pour presque toutes les hauteurs. La section de la cime (à 4,00 mètres) ne présente aucun cerne ayant du bois de réaction. Il est à noter qu'un secteur présente une plus forte intensité de bois de réaction, soit de 1,50 à 2,75 mètres et de 1927 à 1971.

De façon générale, l'échantillon THO 5 a produit du bois de réaction tôt après la formation de la moelle (lorsqu'elle était présente) (figure 5.3). De 0,50 à 2,50 mètres, le cœur des sections est absent, mais le bois de réaction est présent jusqu'au dernier cerne visible (vers la moelle). De 0,50 à 1,50 mètres, le bois de réaction n'est plus produit à partir de 1922 à 1937. De 2,00 à 7,00 mètres, le bois de réaction se retrouve de manière intensive à toutes les hauteurs et en continuité sur de longues périodes de temps, souvent jusqu'à l'année de la coupe.

Le bois de réaction a aussi été représenté en fonction de son emplacement sur la surface des rondelles (rayons ou quartiers). Ces données sont présentées pour l'ensemble d'une même tige et elles sont regroupées dans un seul plan (figure 5.4).

Pour THO 1, le bois de réaction se trouve majoritairement à l'emplacement Q2 (63,3 %) (figure 5.4). THO 2 contient un maximum de bois de réaction vers R3 (21,48 %) et Q3 (24,46 %). L'échantillon THO 3 contient un maximum de cernes de bois de réaction à l'emplacement Q3 (47,9 %) alors que les emplacements Q2 et R3 en contiennent respectivement 17,2 % et 22,2 %. Pour l'échantillon THO 4, ce sont les emplacements Q2 et R3 qui contiennent le plus de cernes de bois de réaction, avec 34,8 % et 28,9 % respectivement. Quant à THO 5, le maximum se trouve vers le secteur Q2 (33,95 %).

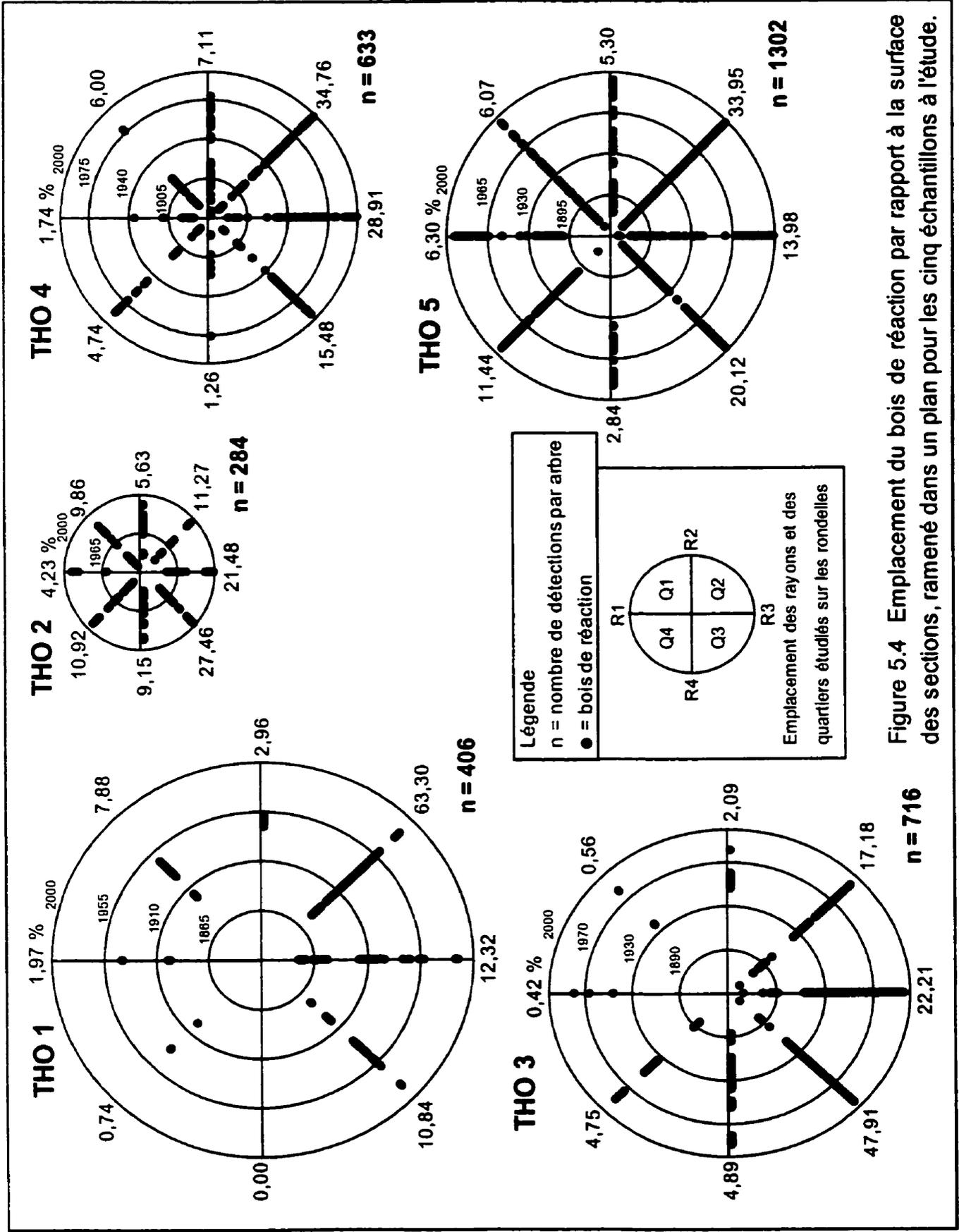


Figure 5.4 Emplacement du bois de réaction par rapport à la surface des sections, ramené dans un plan pour les cinq échantillons à l'étude.

Pour l'ensemble des échantillons, le bois de réaction se situe majoritairement dans la partie inférieure des sections.

5.6 LES CERNES INCOMPLETS OU ABSENTS

Des cernes incomplets ont été détectés, lors de l'interdatation, pour les cinq arbres à l'étude. Des cernes complètement absents ont aussi été observés. Pour les graphiques, les cernes incomplets et absents ont été comptabilisés ensemble (pas de distinction).

Pour l'échantillon THO 1, les cernes sont discontinus dans quatre secteurs (figure 5.5). 1) en 1901 et en 1903 (8,3 %) ; 2) en 1950 (18,8 %) ; 3) de 1960 à 1981 (le plus important groupe, soit 60,4 %) ; 4) de 1989 à 1995 (12,5 %). La majorité des cernes incomplets de cet arbre se situent entre 2,00 et 3,00 mètres de longueur (figure 5.5).

Deux secteurs de cernes discontinus sont visibles pour l'échantillon THO 2. 1) de 1972 à 1973 (1,9 %) ; 2) de 1990 à 1995 (98,1 %). Les cernes incomplets de cet arbre sont répartis sur toutes les hauteurs de la tige.

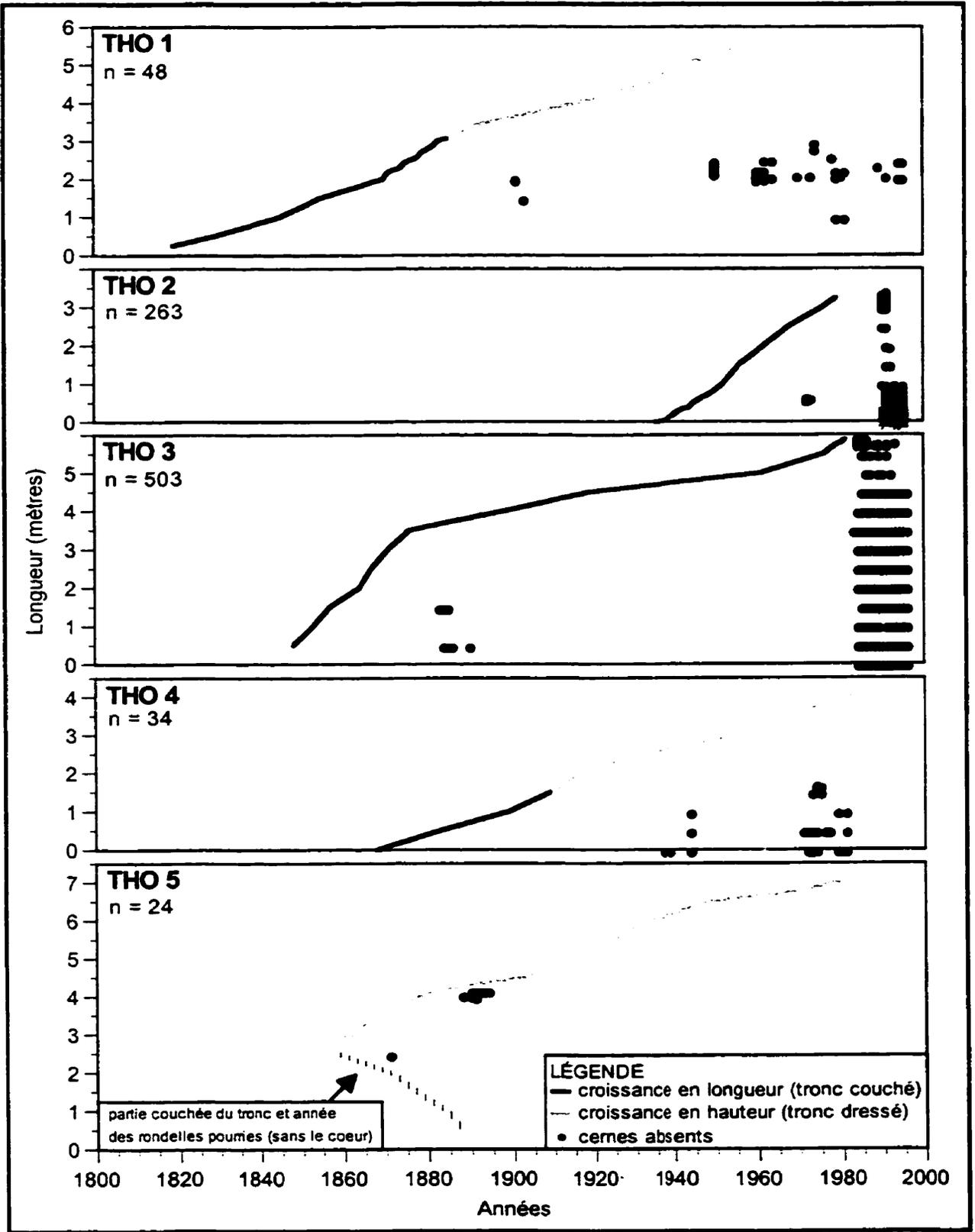


Figure 5.5 Croissance apicale extrapolée et cernes incomplets ou absents pour toutes les sections étudiées des cinq échantillons. n = nombre de cernes absents ou incomplets détectés pour chaque arbre.

L'échantillon THO 3 présentait aussi bien des cernes complètement absents que des cernes discontinus. Quelques cernes incomplets ou absents sont groupés entre 1883 et 1890 (1,6 %) alors que la majorité (98,4 %) se situait de 1984 à 1996 et ce, à toutes les hauteurs de la tige.

Les échantillons THO 4 et THO 5 présentaient moins de cernes incomplets. Par contre, ces cernes sont également groupés dans des secteurs de tiges ou des groupes d'années précis, comme pour les autres échantillons.

5.7 L'EXCENTRICITÉ DES SECTIONS

L'excentricité des sections a permis de mettre en évidence vers quelle direction radiale la croissance a été privilégiée, pour chacune des sections étudiées (figure 5.6). Pour trois des échantillons, soit THO 2, THO 3 et THO 4, les rayons les plus longs (ou rayons excentriques) sont le plus souvent dirigés vers le bas des sections (figure 5.6). Ainsi, pour THO 2, les rayons excentriques sont dirigés à 75 % entre 150° et 240° ; pour THO 3, 81,2 % de ces rayons sont situés entre 135° et 225° ; pour THO 4, 80 % des rayons les plus longs sont dirigés entre 150° et 190° degrés. Pour ces trois échantillons, les autres rayons excentriques sont répartis sporadiquement sur le reste de la circonférence des tiges.

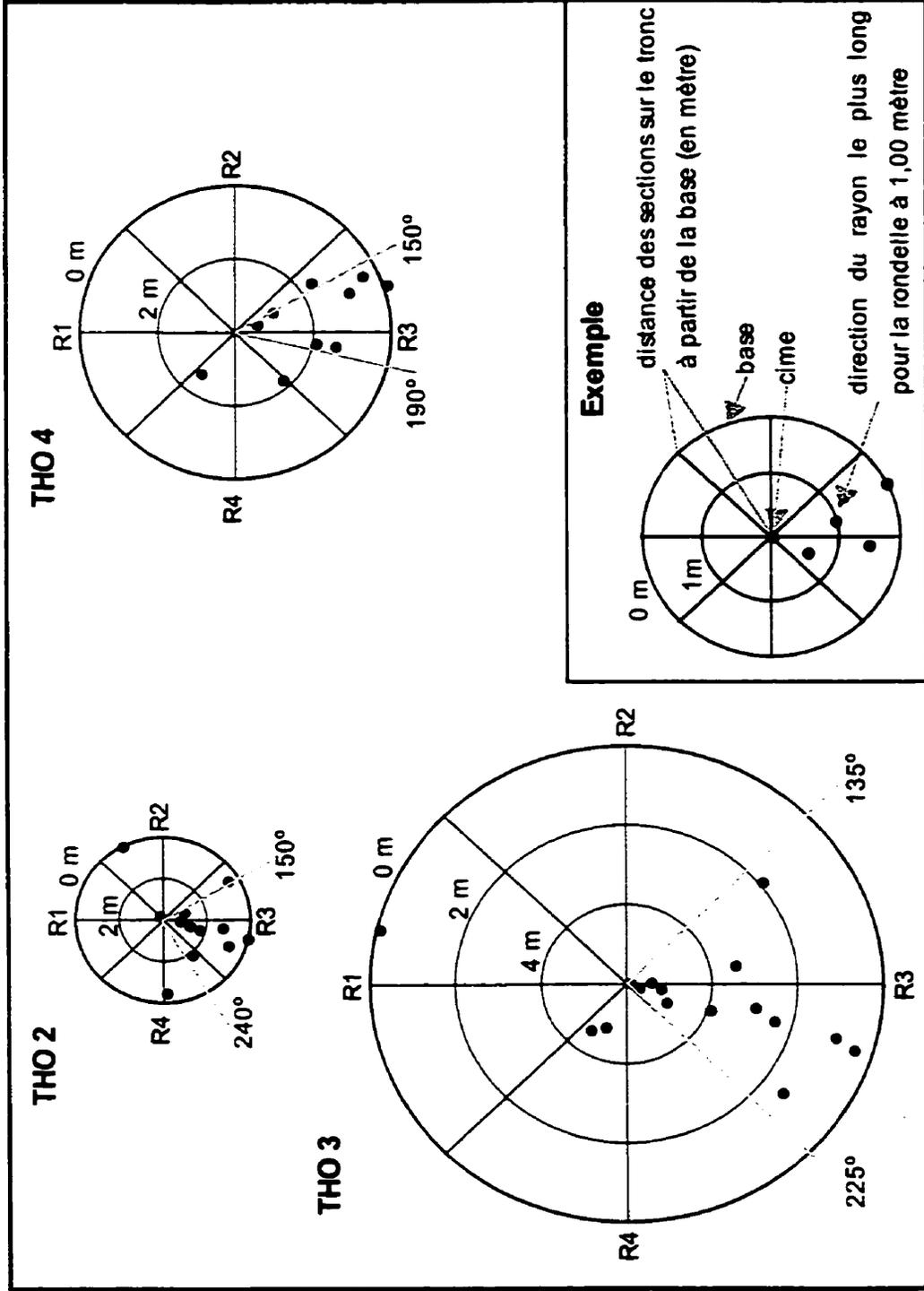
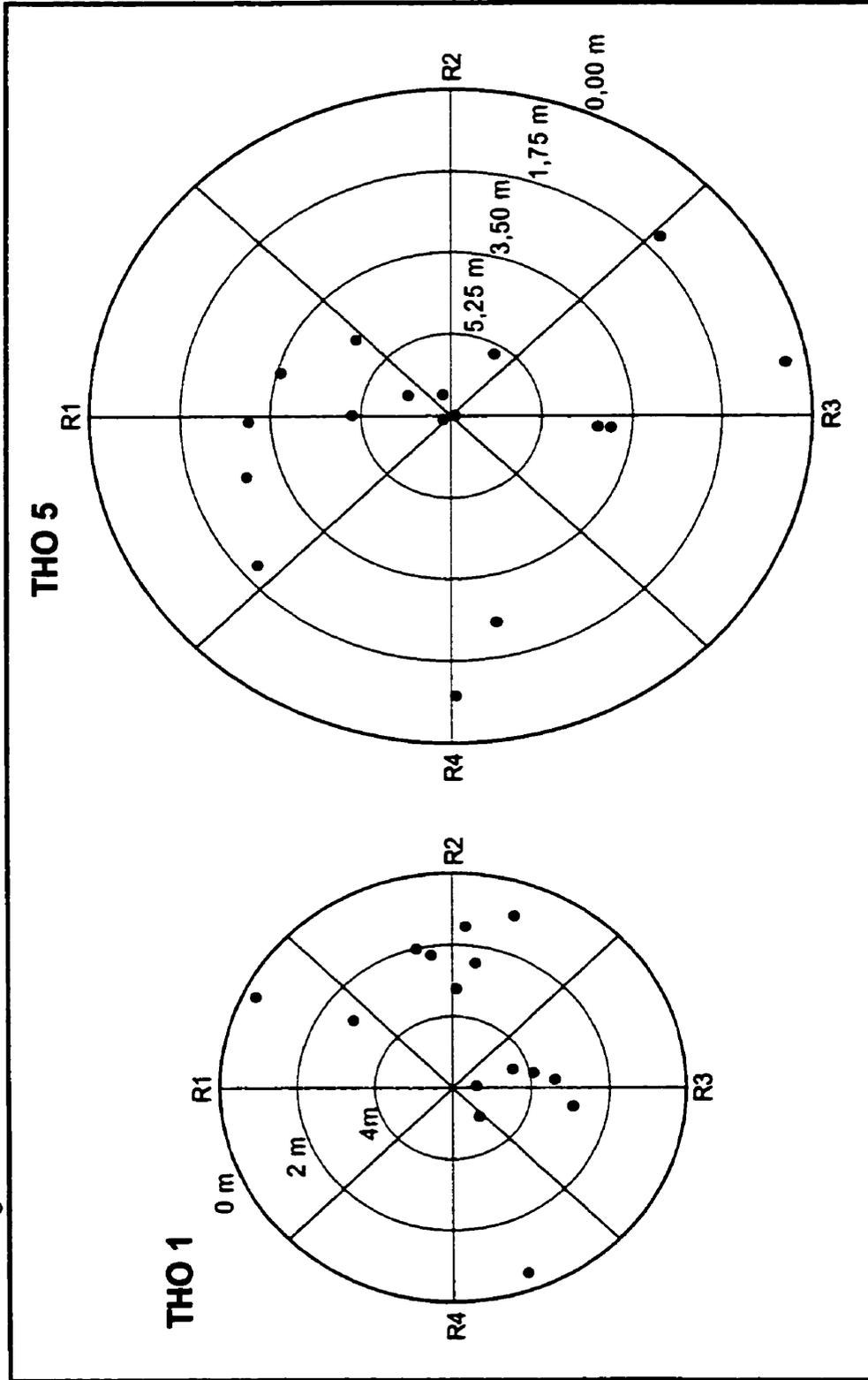


Figure 5.6 Excentricité des sections à des intervalles de 50 centimètres (et de 25 centimètres lorsque ces sections intermédiaires étaient étudiées) pour les cinq arbres analysés.

● direction du rayon le plus long pour chaque section.

suite de la figure 5.6



Pour les échantillons THO 1 et THO 5, les rayons excentriques sont dirigés plus sporadiquement sur la surface du tronc que pour les autres échantillons (figure 5.6). Dans l'ensemble, pour THO 1, les rayons les plus longs semblent être regroupés dans toute la demie droite alors que pour THO 5, ils semblent former un arc de cercle.

5.8 L'EXCENTRICITÉ DES CERNES

Les graphiques d'excentricité permettent de mettre en évidence des cernes qui présentent une différence importante dans leur largeur, pour une année donnée.

L'excentricité des cernes pour THO 1 présente un déplacement et une diminution de l'intensité selon la longueur sur la tige (figure 5.7). À 1,00 mètre, les cernes excentriques sont présents intensivement de 1883 à 1896. À 1,50 mètre, l'excentricité débute plus tard, soit en 1900 pour se terminer en 1915. À 2,50 mètres, l'excentricité débute en 1936 et se termine en 1956. Ce groupe de cernes excentriques est présent de deux mètres à cinq mètres. À partir de 3,50 mètres, le nombre et l'intensité de ces cernes excentriques diminuent de plus en plus jusqu'à la cime. Un autre groupe de cernes excentriques est présent à 1,00 et 1,50 mètre, pour la période de 1970 à 1996. À 2,50 mètres, seules quatre années présentent des cernes excentriques pour ce secteur et à partir de 3,50 mètres, l'excentricité est quasi absente.

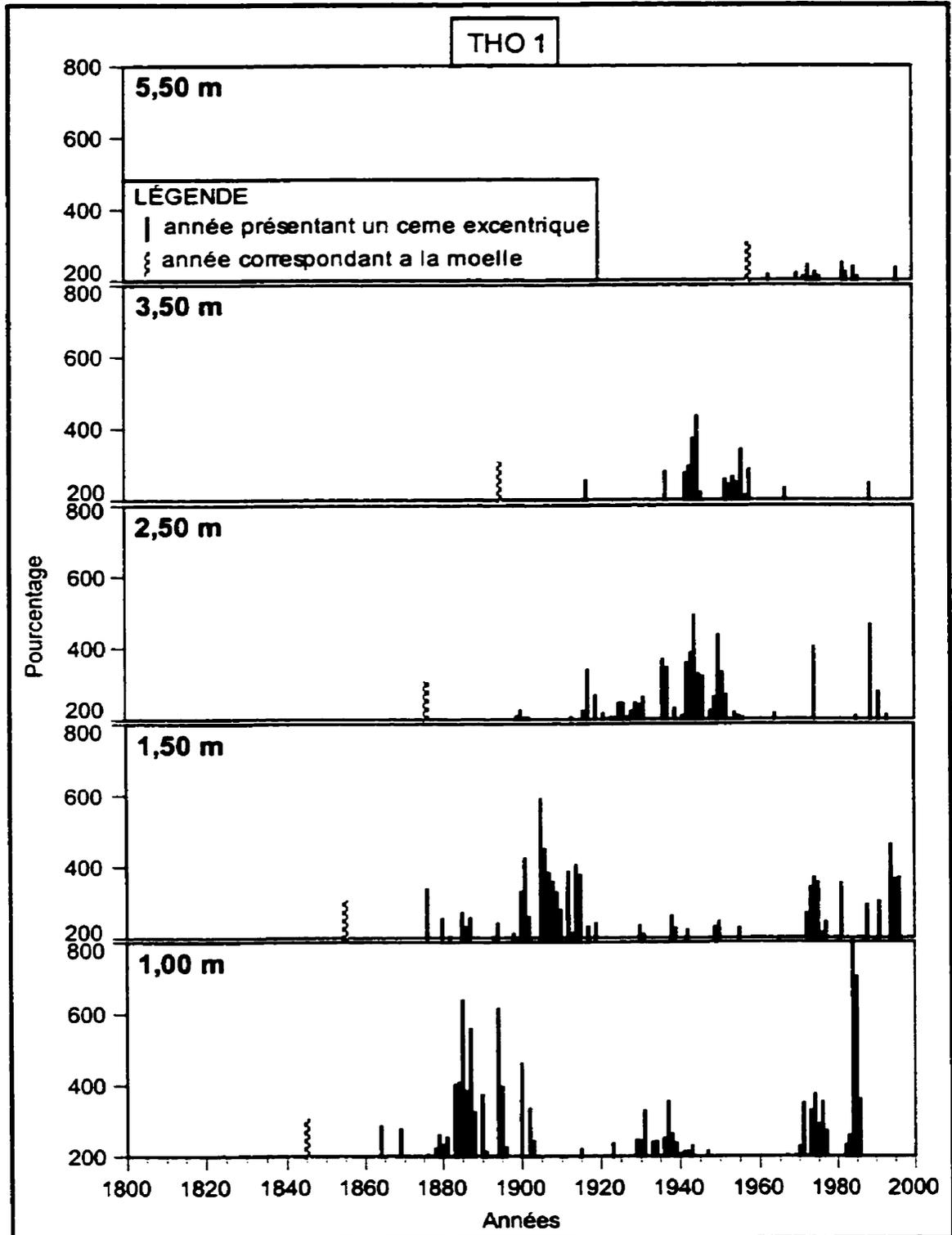


Figure 5.7 Excentricité des cernes de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections représentatives de l'échantillon THO 1.

Pour THO 2, l'excentricité des cernes est présente tout au long des sections, de façon plus ou moins sporadique (figure 5.8). Un secteur semble présenter une excentricité plus forte que le reste, soit de 1990 à 1996. À 2,50 mètres, l'intensité des cernes excentriques est particulièrement élevée pour ce groupe d'années.

Pour les échantillons THO 3, THO 4 et THO 5, l'excentricité des cernes de croissance semble être variable d'une section à l'autre et ne pas présenter un patron quelconque (annexe II). Pour THO 3, il est à noter que la section 4,50 mètres présente une abondance de cernes excentriques qui n'est pas observée sur d'autres sections de cet arbre. Pour THO 4, une abondance et une forte intensité de cernes excentriques est visible à 0,50 mètre, alors qu'à 3,00 mètres, il y a peu d'excentricité. Quant à l'échantillon THO 5, il présente un patron très variable selon la section. Un grand nombre de cernes excentriques est observé à 0,50 et 1,00 mètre. L'excentricité est particulièrement intense à 0,50 mètre de tige.

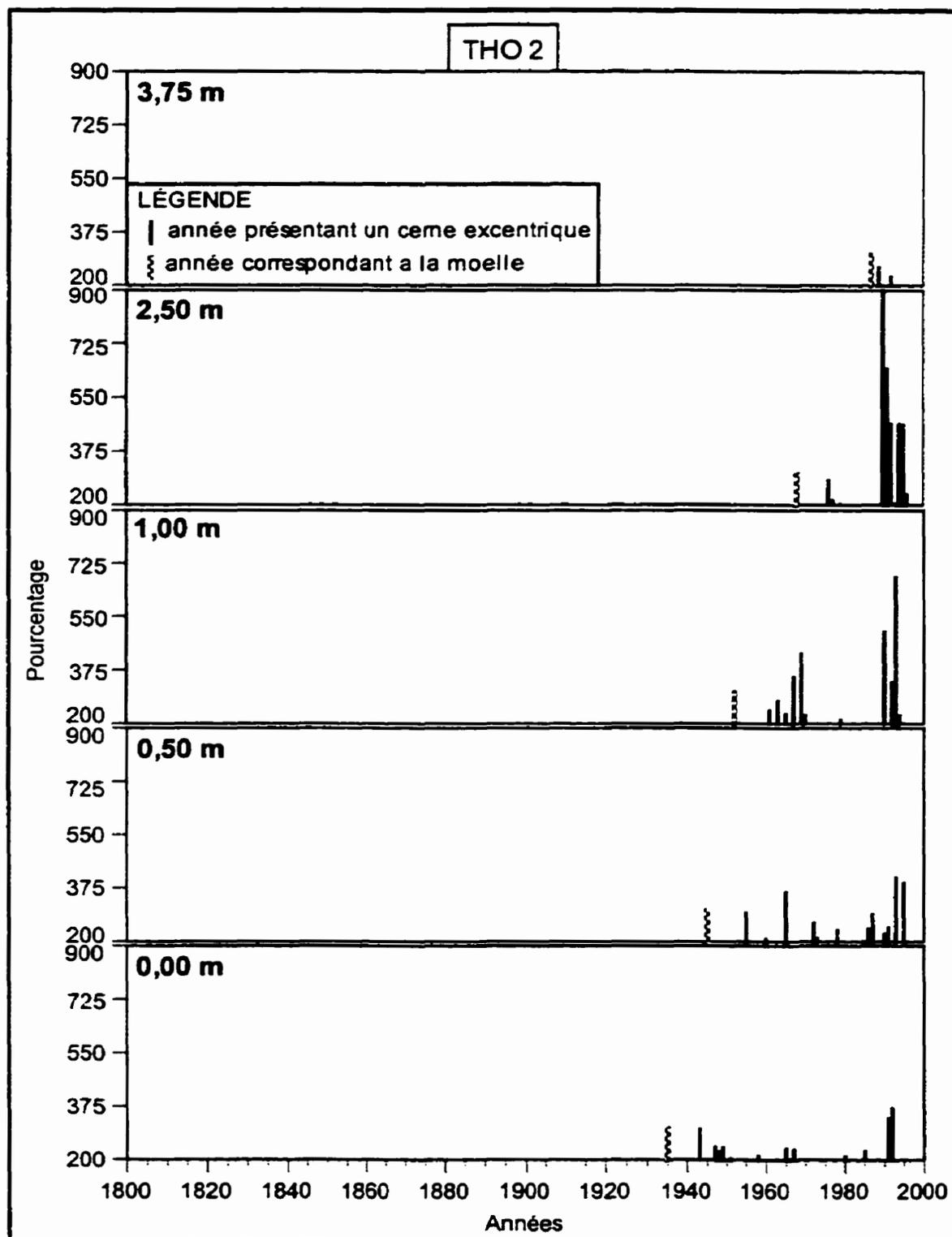


Figure 5.8 Excentricité des cemes de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections représentatives de l'échantillon THO 2.

CHAPITRE VI
DISCUSSION

6.1 UNE HYPOTHÈSE EXPLIQUANT LA FORME ARCHITECTURALE « COUCHÉE AU SOL »

L'intégration de l'ensemble des résultats a permis d'émettre une hypothèse qui explique la forme architecturale étudiée. La cime de ces arbres serait ramenée au sol lorsque le poids de la neige accumulée sur les branches excède un certain niveau (Timmel 1986 ; Travis et Meentemeyer 1991 ; Homma 1997 ; Fridman et Valinger 1998). Des auteurs ont mentionné qu'une accumulation de seulement 0,60 mètre est suffisante pour provoquer des dommages importants (comme des troncs qui rampent) chez certaines espèces d'arbre (Solantie 1994 ; Homma 1997). Pour la région du Saguenay, les précipitations annuelles de neige sont en moyenne de 3,50 mètres (Anonyme 1942-1983). Cette abondance de neige est conjuguée aux caractéristiques du site où ces arbres se sont développés. Ce site présentait une pente abrupte et un humus mince, ce qui en fait un milieu instable. Le rabattement de la cime au sol peut aussi s'expliquer par des mini-avalanches qui se produiraient dans les microsites spécifiques à chaque arbre (figure 6.1).

Les thuyas parviendraient à se redresser lorsqu'il se produit un changement dans l'environnement et qui élimine l'effet du poids de la neige. Ces changements peuvent être par exemple un arrêt brusque du sol sous le tronc (un vide) ou encore la présence d'un objet sur lequel la cime peut prendre appui (arbre, roche, etc.) (figure 6.1). Le redressement pourrait aussi se produire si plusieurs années sans neige abondante surviennent successivement.

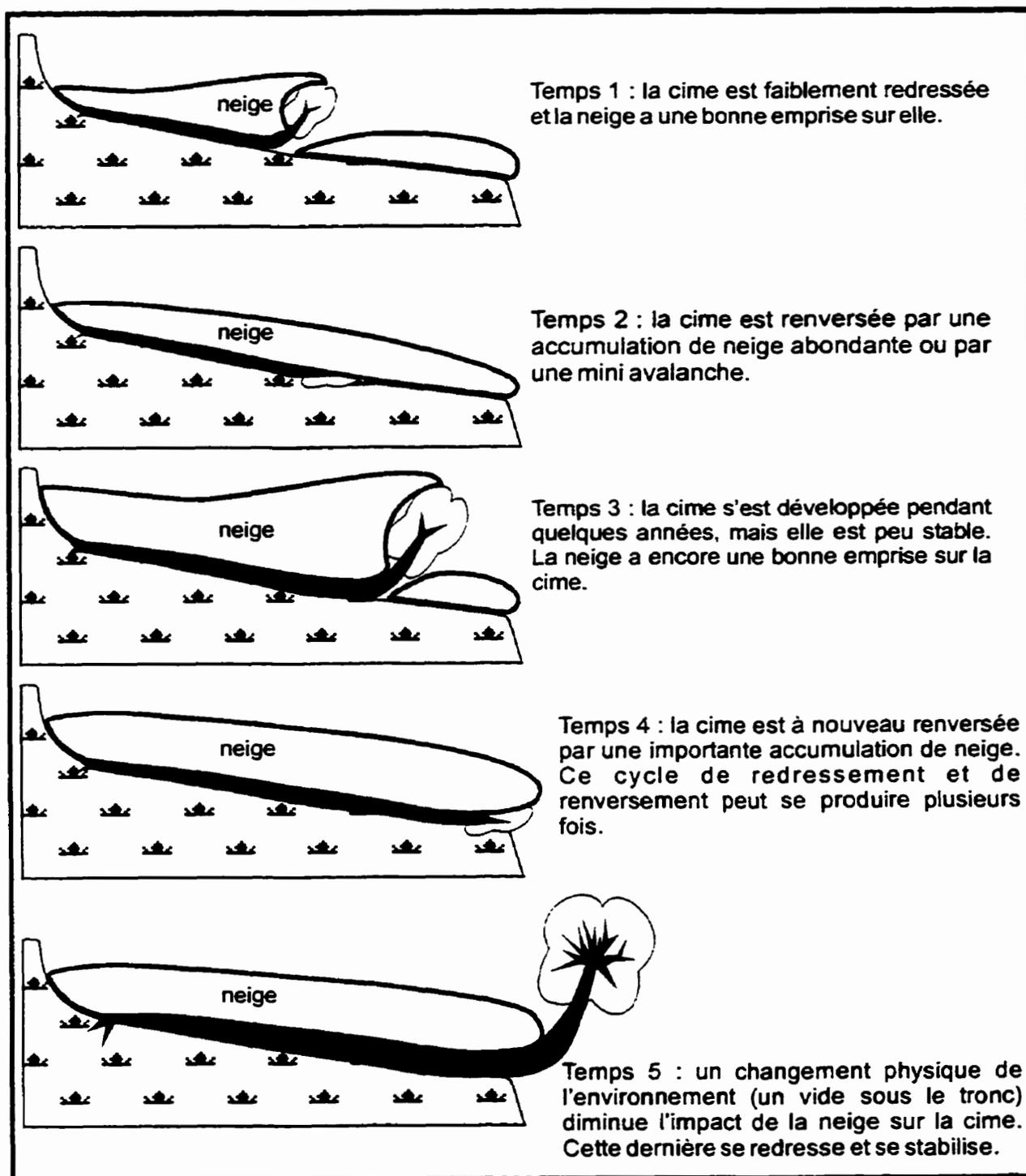


Figure 6.1 Renversements successifs de la cime des thuyas par l'accumulation de neige, jusqu'à ce que les arbres parviennent à se stabiliser.

6.2 LA CONFIRMATION DE L'HYPOTHÈSE

La forme architecturale et les caractéristiques des microsites de chacun des arbres étudiés ont fourni des indices importants qui permettent de confirmer l'influence du couvert de neige sur la forme architecturales des arbres. Certaines caractéristiques structurales de la croissance (le bois de réaction et l'excentricité des sections) ont aussi permis cette validation.

6.2.1 LA FORME ARCHITECTURALE

Parmi les cinq échantillons étudiés, deux sous-catégories de formes ont été distinguées. Le premier groupe comprend les arbres qui sont parvenus à se redresser de manière nette (THO 1, THO 4 et THO 5). Le deuxième groupe inclue les arbres dont la cime risquait encore (au moment de la coupe) d'être rabattue au sol, puisque leur cime était peu redressée et peu vigoureuse (THO 2 et THO 3).

6.2.1.1 Les arbres redressés : THO 1, THO 4 et THO 5

Les échantillons THO1, THO 4 et THO 5 avaient une cime nettement redressée. Les chances de rabatement au sol par la neige étaient devenues faibles ou nulles (figure 5.1). Pour l'échantillon THO 1, le sol se terminait de façon abrupte après 3,00 mètres (vide de plusieurs centimètres sous le tronc). Le changement brusque d'orientation du tronc visible à ce niveau indique une modification dans l'environnement de cet arbre et qu'il avait réagi à ce changement. Par la suite, la

cime était appuyée sur une roche, ce qui réduisait l'effet possible de l'accumulation de neige au niveau de la couronne.

Pour l'échantillon THO 4, le sol s'arrêtait abruptement à 1,50 mètre de tronc, dû à la présence d'un vide important (plus d'un mètre de haut) (figure 5.1). Après 1,50 mètre, l'accumulation de la neige sur le tronc avait donc une emprise moins importante, ce qui aurait permis à l'arbre de se redresser et de se renforcer.

L'accumulation de la neige année après année aurait été trop importante pour permettre à l'échantillon THO 5 de se redresser avant 2,25 mètres de tronc. Le redressement de cet échantillon aurait été facilité par la présence d'un arbre sur lequel il était appuyé. La présence de cet appui a réduit ou éliminé l'effet de la neige qui aurait pu s'accumuler sur les branches de la couronne, permettant ainsi le redressement de cet échantillon.

6.2.1.2 Les arbres non-redressés : THO 2 et THO 3

Pour les échantillons THO 2 et THO 3, les cimes étaient faiblement redressées (moins de 0,65 mètre) et elles avaient un diamètre de moins de 1,5 centimètres pour la plus haute section analysée. Cela laisse supposer qu'une abondance de neige dans la cime aurait pu encore influencer fortement le développement de ces arbres (Worrell 1979). De plus, le sol était continu sous ces deux arbres et il se poursuivait sur une distance d'au moins 2,00 mètres après la cime (figure 5.1). Il

n'y avait donc pas de changements dans l'environnement de ces arbres, tel qu'un vide, une roche ou un arbre, qui auraient pu aider au redressement des tiges. L'accumulation de neige aurait donc pu continuer d'influencer la forme architecturale en ramenant les cimes au sol à intervalles réguliers, si les arbres n'avaient pas été coupés.

Pour l'échantillon THO 3, il est à noter que l'influence de la neige aurait débuté seulement à partir de 3,50 mètres de tronc, cet échantillon était probablement vertical jusqu'à cette hauteur. Plusieurs informations confirmeraient ce fait : des racines cassées ont été observées lors de la récolte ; il y a une importante chute de croissance radiale en 1882 ; cette chute est conjuguée à une réduction majeure de la croissance apicale et à la production intense de bois de réaction (figures 5.2 et 5.3, section 6.2.2).

6.2.2 LE BOIS DE RÉACTION ET L'EXCENTRICITÉ DES SECTIONS

Le bois de réaction étant produit lorsque les tiges des arbres sont en déséquilibre, il s'agit d'un bon indicateur pour déterminer si un arbre tentait de se stabiliser, pour une période donnée. Plus l'abondance du bois de réaction est importante, plus l'atteinte de la stabilité est difficile. Pour les conifères, le bois de réaction est produit du côté opposé à la tension (opposé au sens du vent ou de la pente, par exemple) ou sur la partie inférieure d'une tige inclinée. Lorsqu'une tige est droite

et stable, la quantité de bois de réaction est alors faible ou nulle (Low 1964 ; Westing 1965 ; 1968 ; Timmel 1986 ; Loup *et al.* 1991).

Pour les cinq arbres analysés, le bois de réaction était principalement situé vers le bas des sections (figure 5.4), comme pour l'excentricité des sections (à l'exception de THO 1 et THO 5) (figure 5.6). Le bois de réaction est un bon indicateur que la cime avait de la difficulté à rester verticale ou encore à se redresser (à cause d'un facteur externe récurrent, telle que la neige). L'abondance de bois de réaction à toutes les hauteurs et sur de longues périodes de temps, pour les cinq arbres, indique que ce facteur récurrent peut influencer la croissance pendant plusieurs années.

6.2.3 LES CARACTÉRISTIQUES DU SITE ET DE LA VÉGÉTATION

L'aire d'étude était située sur la rive sud du fjord du Saguenay et elle était caractérisée par une pente abrupte, un humus mince (tableau 5.1) et un sol composé d'un amas de grosses pierres. Ces caractéristiques conjuguées rendaient le sol instable et affectaient la qualité de l'ancrage disponible pour la végétation (particulièrement pour les arbres). Une fréquence importante d'avalanches de neige sont prévisibles sur ce site, ce qui augmente le risque de déstabiliser plus ou moins régulièrement la végétation du site.

La végétation était composée principalement de trois espèces de conifères : l'épinette noire, le sapin baumier et le thuya occidental (tableau 5.2). Le sapin et le thuya étaient représentés dans toutes les strates de la végétation (tableau 5.3). Plusieurs auteurs ont mentionné la capacité du thuya à s'adapter à des conditions de vie difficiles ou extrêmes (Larson 1990 ; Matthes-Sears et Larson 1991 ; Archambault et Bergeron 1992b ; Briand *et al.* 1993 ; Farrar 1995). Le thuya est la seule des trois espèces qui semblait présenter une adaptation particulière au renversement. En effet, l'instabilité du site risquait de créer régulièrement des déséquilibres aux arbres. Un seul sapin et une seule épinette présentaient la forme architecturale « couchée au sol », alors que le thuya la présentait près de trois fois sur quatre (tableau 5.4). Le thuya est donc une espèce plastique qui peut s'adapter aux conditions de croissance rencontrées sur le site d'étude. Ces résultats confirment d'autres études qui stipulent que le thuya s'ajuste à son environnement et aux événements qui s'y produisent sporadiquement ou continuellement (Édelin 1977 ; Briand *et al.* 1993 ; Kelly *et al.* 1994).

La faiblesse de la structure du bois de thuya faciliterait leur survie. Les épinettes et les sapins ont un bois plus dur qui réagirait peu ou pas à l'accumulation de neige. De plus, quelques spécimens renversés et morts de ces deux espèces ont été observés sur le terrain. Cela expliquerait en partie la faible quantité de sapins et d'épinettes vivants qui présentaient la forme architecturale « couchée au sol ». Ce résultat est confirmé par Webb (1988), qui mentionne que des sapins et des

épinettes survivent seulement pendant quelques années à un renversement. Des différences au niveau du développement et de l'architecture racinaire entre les thuyas, les sapins et les épinettes pourraient aussi fournir une piste de solution expliquant les différences observées entre les espèces.

6.3 LES AUTRES FACTEURS

D'autres facteurs caractérisant la croissance et le développement des arbres ont aussi été étudiés. Ces facteurs sont la croissance radiale, les cernes absents ou incomplets et l'excentricité des cernes. Ils ont fourni des renseignements complémentaires permettant de mieux comprendre l'effet du rabattement de la cime au sol par la neige.

6.3.1 LA CROISSANCE RADIALE

Larson (1990) et Briand *et al.* (1993) mentionnaient que le thuya présente le taux de croissance radiale le plus faible reconnu. La croissance radiale moyenne par année des cinq échantillons à l'étude (0,33 millimètre / an) (tableau 5.6) est inférieure à celles des sapins (1,17 millimètre / an) et des épinettes (0,78 millimètre / an) pour la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Krause communications personnelles 1999). Cette croissance lente est probablement due aux conditions du milieu. Plusieurs auteurs confirment d'ailleurs l'influence importante du milieu sur la croissance des thuyas (Archambault et Bergeron 1992b ; Kelly *et al.* 1992). En effet, les arbres étudiés poussaient sous un couvert

forestier, sur une pente abrupte et sur un sol instable. De plus, la difficulté à conserver un équilibre, année après année, dans le secteur de tronc en développement (cime), due à l'abondance de la neige (Timmel 1986 ; Travis et Meentemeyer 1991 ; Homma 1997 ; Fridman et Valinger 1998) pourrait aussi être incluse parmi les facteurs ayant provoqué la croissance radiale faible des arbres étudiés.

6.3.2 LES CERNES ABSENTS OU INCOMPLETS

Des cernes incomplets ou absents ont été détectés en grand nombre pour deux des échantillons étudiés, soit THO 2 et THO 3 (qui n'étaient pas encore stabilisés) (figure 5.5). Cette abondance de cernes absents, particulièrement dans la cime, serait un bon indicateur de difficulté dans la croissance, puisque de tels cernes sont normalement trouvés davantage à la base du tronc plutôt que tout le long de la tige ou dans la cime (Rubner 1910 ; Antevs 1925 ; Athari 1981 ; Nogler 1981 ; Wätzig et Fisher 1987 ; Takaoka 1993). Les cernes absents ou discontinus pourraient indiquer que les arbres subissaient une forte suppression ou d'importantes perturbations affectant directement leur croissance ou leur développement (Hartig 1871 ; Rubner 1910 ; Antevs 1925 ; Athari 1981 ; Nogler 1981 ; Wätzig et Fisher 1987 ; Takaoka 1993).

6.3.3 L'EXCENTRICITÉ DES CERNES DE CROISSANCE

La variation de la largeur d'un cerne donné autour d'une section peut être causée par du bois de réaction, des cernes incomplets ou par d'autres facteurs influençant la croissance radiale. Il s'agit d'une information particulière pouvant fournir une indication quant au déplacement de la croissance autour d'une section, par rapport aux années ou encore par rapport à la distance sur le tronc (longueur). Parmi les arbres étudiés, il a été possible de déterminer un patron permettant de confirmer l'hypothèse d'un rabattement de la cime au sol qui est ou non suivi d'une stabilisation. En effet, lorsque les arbres analysés étaient couchés au sol, l'incidence de l'excentricité des cernes était importante. Lorsque le tronc était en voie de se stabiliser, l'incidence de cette caractéristique diminuait selon la hauteur et dans le temps (THO 1, figure 5.7). Par contre, lorsque la stabilité n'était pas atteinte, l'incidence demeurait importante ou variait peu sur la tige (THO 2, figure 5.8).

6.4 LES CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES ARBRES ANALYSÉS

6.4.1 THO 1

La cime de THO 1 aurait été ramenée au sol une première fois en 1852 (chute importante de la croissance radiale, suivi d'une longue période de croissance faible) (figure 5.2). Le redressement de la tige correspondrait aux années 1925-1960, qui sont caractérisées par une faible variation interannuelle et un taux de croissance radiale plus élevé que pour le reste de la tige. Cet échantillon tendait à être de plus en plus stable dans le temps et cela s'expliquerait par plusieurs

facteurs. D'abord, il y a la diminution (en quantité et en intensité) du bois de réaction en s'approchant de la cime (figure 5.3). Ensuite, il y a l'excentricité des cernes de croissance. Celle-ci s'est déplacée dans le temps entre les différentes sections et elle a diminué en intensité en se rapprochant de la cime (figure 5.7). Enfin, la forme architecturale elle-même et les caractéristiques du site confirme l'atteinte d'une certaine stabilité pour THO 1.

6.4.2 THO 2

Pour THO 2, le secteur de croissance radiale très faible qui survient après 1990 est conjugué à un grand nombre de cernes incomplets. Ces deux facteurs indiquent clairement que l'arbre subissait des conditions difficiles de croissance (figure 5.2 et 5.5) et qu'il était instable. L'excentricité des cernes de croissance de THO 2 confirmerait aussi que cet arbre n'était pas stabilisé (figure 5.8). En effet, l'excentricité est présente sur toutes les sections analysées et elle est répartie sporadiquement par rapport aux années. Les cernes incomplets et le bois de réaction étaient abondants et pouvaient être conjugués sur un même cerne, ce qui risquait d'augmenter fortement l'intensité de l'excentricité des cernes. Comme cette caractéristique (excentricité des cernes) est présente tout au long de la tige, THO 2 était probablement instable au moment de la coupe.

6.4.3 THO 3

L'arbre THO 3 a subi deux événements majeurs ayant fortement influencé sa croissance et son développement. Le premier événement serait une chute au sol, en 1882 (il mesurait environ 3,50 mètres de haut). Les informations qui confirment cette chute sont : un bris racinaire visible lors de la récolte ; des chutes importantes des croissances radiale et apicale (figures 5.2 et 5.3) ; une apparition nette et importante de bois de réaction après 1882 (figure 5.3). Le deuxième événement aurait eut lieu en 1984. Il s'agit d'un arbre (mort au moment de l'échantillonnage) tombé sur THO 3 au niveau de la cime (juste avant la courbure). Cet événement a influencé la croissance de la manière suivante : une chute importante de la croissance est visible en 1984 et par la suite, il y a une abondance de cernes absents et incomplets (pour toute la longueur de la tige) (figure 5.5). THO 3 était encore instable au moment de la récolte : le bois de réaction, les cernes incomplets, la forme architecturale et les caractéristiques du site le confirment.

6.4.4 THO 4

L'échantillon THO 4 tendait à être de plus en plus stable dans le temps. Cela s'expliquerait par deux caractéristiques de la croissance. D'abord, il y a la disparition du bois de réaction au niveau de la cime (figure 5.3) et ensuite l'augmentation de la croissance radiale à partir de 1982 (figures 5.2). Les

caractéristiques du site et de la forme architecturale (figure 5.1) confirmeraient aussi l'atteinte d'une certaine stabilité par cet arbre.

6.4.5 THO 5

L'échantillon THO 5 a produit du bois de réaction très tôt pour toutes les hauteurs. Bien qu'il fut appuyé sur un arbre et redressé (donc stable), il est possible que la cime ait eu des difficultés à se stabiliser, principalement parce qu'elle se développait dans les branches de l'arbre servant d'appui. THO 5 devait donc contourner continuellement de nouveaux obstacles (les branches de l'autre arbre). Le fait que THO 5 se trouvait sous un couvert forestier important pourrait expliquer la diminution graduelle de la croissance radiale de 1905 à 1946 et que cette croissance soit restée faible par la suite.

CHAPITRE VII

CONCLUSION

La présente étude concernait les thuyas occidentaux se développant sur les parois des rives du fjord du Saguenay et visait à expliquer le développement d'une forme architecturale particulière, soit la forme « couchée au sol ». Cette forme était caractérisée par un tronc couché au sol sur une distance minimale de un mètre et par une cime redressée (courbure au niveau de la tige). Elle semble correspondre à une adaptation particulière des thuyas, puisque seulement deux autres espèces du site à l'étude présentaient cette forme, mais de manière très sporadique. L'intégration des résultats a permis d'émettre une hypothèse qui expliquerait comment cette forme architecturale est formée. Il se produirait un rabattement de la cime au sol lorsque l'accumulation de la neige atteint un niveau trop élevé ou lorsqu'une mini-avalanche se produit dans un microsite particulier à un arbre. Les arbres se redresseraient en présence d'un changement dans leur environnement physique immédiat. La forme architecturale étudiée est donc de type rampante.

Pour les cinq thuyas étudiés dans le cadre de cette recherche, des facteurs communs et particuliers ont été notés, au niveau du bois de réaction, de la croissance (radiale et en longueur), des cernes absents ou incomplets et de l'excentricité (sections et cernes). L'environnement immédiat et la forme architecturale des échantillons suggèrent que la neige accumulée sur les branches de la cime peut avoir un impact important sur tous ces facteurs, particulièrement sur le bois de réaction. La pente abrupte peut aussi être une cause, puisque des avalanches de neige plus ou moins importantes sont prévisibles, ce qui aurait pour

effet de rabattre brusquement la cime au sol et de la garder « prisonnière » de la neige pour la période hivernale, influençant ainsi la forme architecturale. La forme architecturale rampante, sur les thuyas de cette recherche, correspondrait à celle qui a été proposé par Worrell (1979).

La méthode limite l'étendue des résultats au site d'étude, près de l'anse au Gros ruisseau, sur la rive sud du fjord du Saguenay. Des études subséquentes pourraient confirmer que l'hypothèse suggérée pour expliquer la forme architecturale rampante s'étend sur un plus vaste territoire que celui étudié ici.

La méthode utilisée dans le cadre de cette étude pourrait être améliorée sur quelques points. Ces améliorations permettraient d'affiner les résultats obtenus et de mieux comprendre le développement et la croissance des tiges rampantes. Ainsi, l'emplacement du bois de réaction pourrait être déterminé de manière précise sur la surface des sections (par exemple par balayage électronique et reproduction graphique de chaque section étudiée), les branches et les différents types de racine des arbres auraient pu être récoltées et étudiées. Ces informations complémentaires auraient fourni des indices de plus sur le développement des arbres analysés.

La méthode qui a été élaborée pour cette recherche a permis d'émettre une hypothèse logique pouvant expliquer le développement et la mise en place de la

forme rampante des thuyas. L'analyse des résultats permet aussi d'ouvrir la voie à d'autres études. Ainsi, plusieurs sites pourraient être comparés entre eux, afin de déterminer si l'hypothèse émise est corroborée pour d'autres secteurs. L'analyse de l'influence du couvert de neige avec des observations prises pendant l'hiver permettrait de confirmer l'existence du phénomène proposé.

Cette étude a permis d'expliquer le développement et la croissance de thuyas occidentaux ayant une forme architecturale particulière, soit la forme rampante. Il a été possible de relier entre elles différentes caractéristiques qui ont été analysées dans le but de comprendre comment ces arbres ont pu survivre au phénomène de rampage des tiges. Enfin, une hypothèse a été émise pour expliquer comment les tiges rampantes ont pu être formées.

CHAPITRE VIII

RÉFÉRENCES

- Antevs, E. 1925. The big tree as a climatic measure. Carnegie Int. Washington Publ. 352: 115-153.
- Archambault, S. et Y. Bergeron. 1992a. An 802-year tree-ring chronology from Quebec boreal forest. *Can.J.For.Res.* 22: 674-682.
- Archambault, S. et Y. Bergeron. 1992b. Discovery of a Living 900 Year-old Northern White Cedar, *Thuja occidentalis*, in Northwestern Québec. *Can.Field-Nat.* 106(2): 192-195.
- Athari, S. 1981. Jahringausfall, ein meist unbeachtetes Problem bei Zuwachsuntersuchungen in rauchgeschädigten und gesunden Fichten. *Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien.Nr.* 139: 7-27.
- Anonyme. 1942-1983. Station météo de l'aéroport de Bagotville, Québec, Canada.
- Baillie, M.G.L. 1995. *A slice through time*. London, B.T. Batsford Ltd.
- Baillie, M.G.L. 1982. *Tree ring dating and archaeology*. London, Canberra, Croom Helm.
- Barthélémy, D. 1997. A flexible tree for the protection of intensive farmland and for the production of high quality in marginal forest sites subject to fire risk in mediteranean regions. *Unité de modélisation des plantes du CIRAD*. Montpellier, France. pp.

- Barthélémy, D. ; C. Édelin et F. Hallé. 1989. Architectural concepts for tropical trees. In: Tropical Forest: Botanical dynamics, speciation and diversity, L.B. Holm-Nielsen and H. Baslev (Eds.), Academic Press, London. 89-100.
- Beasley, R.S. et J.O. Klemmedson. 1973. Recognizing site adversity and drought-sensitive trees in stands of bristlocone pine (*Pinus longavea*). Econ.Bot. 27: 141-146.
- Bégin, C. et L. Fillion. 1991. Dynamique de la réitération adaptative dans le développement des formes de croissance de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. à la limite des forêts (Québec subarctique). Dans : L'arbre : Biologie et développement. Acte du deuxième colloque international sur l'arbre. C. Édelin, éditeur. Montpellier Naturalia Monspeliensia. Numéro hors série A7. 566-567.
- Benthley, P.A. et E.C. Smith. 1962. A study of northern white cedar and jack pine in Nova Scotia. Proc.N.S.Inst.Sci. 24:376-398.
- Blanchet, B. 1982. Les cédrières de Québec. Études Écologiques no. 6, M.M. Grandtner, éd. Laboratoire d'écologie forestière, Université Laval, Québec.
- Briand, C.H. ; U. Posluszny et D.W. Larson. 1993. Influence of age and growth rate on radial anatomy of annual rings of *Thuja occidentalis* L. (eastern white cedar). Int.J.Plant Sci. 154(3): 406-411.
- Briand, C.H. ; U. Posluszny ; D.W. Larson et U. Matthes-Sears. 1991. Patterns of architectural variation in *Thuja occidentalis* L. (eastern white cedar) from upland and lowland sites. Bot.Gaz. 152(4): 494-499.

- Brunig, E.F. 1973. Sturmschäden als Risikofaktor bei der Holzproduktion in den wichtigsten Holzzeugungsgebieten der Erde. *Forstarchiv*. 44: 137-140.
- Caulkins, H.L. 1967. The ecology and reproduction of Northern White Cedar. Master of Forestry thesis. University of Michigan, Ann.Arbor.
- Colin, F. ; D. Barthélémy et L. Ribeyrolles. 1993. Influence de la densité de la plantation sur quelques caractéristiques dendrométriques, morphologiques et architecturales de la provenance Istebna II (Pologne) de *Picea abies* (L.) Karsten (Pinaceae). *Architecture des arbres fruitiers et forestiers, Montpellier, France. Acte de colloque*. 209-235.
- Curtis, J.D. 1946. Preliminary observations on northern white cedar in Maine. *Ecology*. 27: 23-36.
- Curtis, J.D. 1944. Northern white cedar on upland soils in Maine. *J.For.* 42: 756-759.
- Dolukhanov, A.G. 1978. The timberline and the subalpine belt in the Caucasus mountains USSR. *Arct.Alp.Res.* 10: 409-422.
- Édelin, C. 1977. Images de l'architectures des conifères. Thèse de 3^{ième} cycle, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. 255p.
- Eis, S. 1986. Differential growth of individual components of trees and their interrelationships. *Can.J.For.Res.* 16: 352-359.
- Fanta, J. 1981. *Fagus sylvatica* L. und das *Aceri-Fagetum* an der alpinen Waldgrenze in Mitteleuropäischen Gebirgen. *Vegetation*. 44: 13-24.

- Farrar, J.L. 1995. *Trees in Canada*. Fitzhenry & Whiteside Limited. Markham (Ontario, Canada). 502p.
- Fernald, M.L. 1919. Lithological factors limiting the ranges of *Pinus banksiana* and *Thuja occidentalis*. *Rhodora*. 21: 41-67.
- Fridman, J. et E. Valinger. 1998. Modelling Probability of Snow and Wind Damage Using Tree, Stand, and Site Characteristics from *Pinus sylvestris* Sample Plots. *Scand.J.For.Res.* 13: 348-356.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London, New York.
- Guillemette, A. 1982. *Éléments de physique du bois*. Les Éditions FM. Laval (Québec). 153p.
- Gouvernement du Québec. 1994. *Règlement sur les parcs*. Éditeur officiel du Québec. Québec. pp.
- Habeck, J.R. 1958. White cedar ecotypes in Wisconsin. *Ecology*. 39: 457-463.
- Hallé, F. et R.A.A. Oldeman. 1970. *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Monographie MASSON Éd. Paris. 178p.
- Hallé, F. ; R.A.A Oldeman et P.B. Tomlinson. 1978. *Tropical trees and forest*. Springer, Berlin.
- Harry, D.E. 1987. Shoot elongation and growth plasticity in incense-cedar. *Can.J.For.Res.* 17: 484-489.

- Hartig, R. 1871. Über das Dickenwachstum der Waldbäume. Zeitschr.F.Jagdwesen. 3: 66-104.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bull. 43: 69-78.
- Homma, K. 1997. Effects of snow pressure on growth form and life history of tree species in Japanese beech forest. J.Veg.Sci. 8: 781-788.
- Kelly, P.E. ; E.R. Cook et D.W. Larson. 1994. A 1397-year tree-ring chronology of *Thuja occidentalis* from cliff faces of the Niagara Escarpment, southern Ontario, Canada. Can.J.For.Res. 24: 1049-1057.
- Kelly, P.E. ; E.R. Cook et D.W. Larson. 1992. Constrained growth, cambial mortality, and dendrochronology of ancient *Thuja occidentalis* on cliffs of the Niagara Escarpment : an eastern version of bristlecon pine ? Int.J.Pl.Sci. 153: 117-127.
- Kloetzli, F. 1991. Niches of longevity and stress. Pages 97-110 in G. Essler, D. Overdieck, eds. Modern ecology. Elsevier, Amsterdam.
- Lanner, R.M. 1965. Branching and apical dominance in *Thuja occidentalis* L. Document non publié.
- Larson, D.W. 1990. Effects of disturbance on old-growth *Thuja occidentalis* L. at cliff edges. Can.J.Bot. 68: 1147-1155.
- Larson, D.W. et P. Kelly. 1991. The extend of old-growth *Thuja occidentalis* on cliffs of the Niagara Escarpment. Can.J.Bot. 69: 1628-1636.

- Larson, D.W. ; U. Matthes-Sears et P. Kelly. 1993 Cambial dieback and partial shoot mortality in cliff-face *Thuja occidentalis* : evidence for sectored radial architecture. *Int.J.Plant Sci.* 154(4): 496-505.
- Larson, P.R. 1963. Stem form development of forest trees. *Forest Science Monographs.* 5: 1-42.
- Lavoie, C. et S. Payette. 1991. Les formes de croissance de l'épinette noire et les changements climatiques séculaires. Dans : *L'arbre : Biologie et développement.* Acte du deuxième colloque international sur l'arbre. C. Édelin, Éditeur. Montpellier Naturalia Monspeliensia. Numéro hors série A7. 221-227.
- Logiciel SAS. 1988. *SAS Procedure Guide, Release 6.03.* Editions Cary, NC : SAS Institute Inc. 441p.
- Loup, C. ; M. Fournier et B. Chanson. 1991. Relation entre architecture, mécanique et anatomie de l'arbre. Cas d'une pin maritime (*Pinus pinaster* Soland.). *L'arbre : Biologie et développement.* Acte du deuxième colloque international sur l'arbre. C. Édelin, éd. Montpellier Naturalia Monspeliensia. Numéro hors série A7. 181-195.
- Low, A.J. 1964. A Study of Compression Wood in Scots Pine (*Pinus silvestris* L.). *Forestry (London).* 37(2): 179-201.
- Martineau, R. 1985. *Les insectes nuisibles des forêts de l'est du Canada.* Éditions Marcel Broquet. La Prairie (Québec). 283p.
- Matthes-Sears U. et D.W. Larson. 1995. Rooting characteristics of trees in rock : a study of *Thuja occidentalis* on cliff faces. *Int.J.Plant Sci.* 156(5): 679-686.

- Matthes-Sears, U. et D.W. Larson. 1991. Growth and physiology of *Thuja occidentalis* L. from cliffs and swamps : is variation habitat or site specific ? Bot.Gaz. 152(4): 500-508.
- McElhanney, T.A. et associés. 1935. Canadian wood : their properties and uses. Département de l'intérieur, Ottawa, Canada. 330p +.
- Mitchell, A.F. 1965. The growth in early life of the leading shoot of some conifers. Forestry (London). 38(1): 121-136.
- Morgan, J. et M.G.R. Cannell. 1994. Shape of tree stems -- a re-examination of the uniform stress hypothesis. Tree Physiology. 14: 49-62.
- Morin, H. et S. Payette. 1986. La dynamique récente des combes à neige du golfe de Richmond (Québec nordique) : une analyse dendrochronologique. Can.J.Bot. 64: 2113-2119.
- Musselman, R.C. ; D.T. Lester et M.S. Adams. 1975. Localized ecotypes of *Thuja occidentalis* in Wisconsin. Ecology. 56: 647-655.
- Nogler, P. 1981. Auskeilende und fehlende Jahrringe in absterbenden Tannen (*Abies alba* Mill.). Allg.Forstz. 28: 709-711.
- Osawa, A. 1993. Effects of Mechanical Stresses and Photosynthetic Production on Stem Form Development of *Populus maximowiczii*. Annals of Botany. 71: 489-494.

- Pâques, L.E. et Y. Contrain. 1993. Recherche de critères de sélection pour l'amélioration génétique de la forme des arbres forestiers. Acte de colloque : Architecture des arbres fruitiers et forestiers, Montpellier, France. 289-349.
- Peltola, H. 1997. Model computation on the critical combination of snow loading and windspeed for damage of Scots pine, Norway spruce and Birch sp. at stand edge. *For.Ecol.Manag.* 95: 229-241.
- Petty, J.A. et R. Worrell. 1981. Stability of Coniferous Tree Stems in Relation to Damage by Snow. *Forestry (London)*. 54(2): 115-128.
- Reukema, D.L. 1959. Missing annual rings in branches of young-growth Douglas-fir. *Ecology*. 40(3): 480-482.
- Rubner, K. 1910. Das Hungern des Cambiums und das Aussetzen der Jahrringe. *Naturw. Zeitschr. F. Forst- U. Lanswirtsch.* 8: 212-262.
- Sakai, A. 1976. Adaptation of plants to deposited snow. *Low Temperature Science, Ser.B.* 34: 47-70, Hokkaido, Univ.Japn. (in Japanese).
- Saucier, J.-P. et collaborateurs. 1994. Le point d'observation écologique (normes techniques). Ministère des Ressources Naturelles, Gouvernement du Québec. 116p.
- Schweingruber, F.H. 1988. *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht / Boston / London. 276p.

- Scurfield, D.G. et A.B. Wardrop. 1962. The nature of reaction wood. VI. The reaction anatomy of seedlings in woody perennials. *Austr.J.Bot.* 10(2): 107-116.
- Solantie, R. 1994. Effect of weather and climatological background on snow damage of forest in southern Finland in November 1991. *Silva Fennica.* 28(3): 203-211.
- Stevens, G.C. et J.F. Fox. 1991. The causes of tree line. *Annu.Rev.Ecol.Syst.* 22: 177-191.
- Stokes, M.A. et T.L. Smiley. 1968. An Introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago, London.
- Swetnam, T.W. et P.M. Brown. 1992. Oldest known conifers in the southwestern United States : temporal and spatial patterns of maximum age. Pages 24-38 in *Old-growth forest in the southwest and Rocky Mountain regions : proceedings of a workshop.* USDA Forest Service General Technical Report RM-213.
- Takaoka, S. 1993. The effect of missing rings on stand-age estimation of even-aged forest in northern Hokkaido, Japan. *Ecological Research.* 8: 341-347.
- Teissier Du Cros, E. 1999. *Cypress A Practical Handbook.* M. Ducrey, D. Barthélémy, C. Pichot, R. Giannini, P. Raddi, A. Roques, J. Sales Luis, B. Thibaut, Editors. Studio Leonardo, Florece, Italie. pp.
- Timmel, T.E. 1986. *Compression wood in Gymnosperms (vol. 1, 2 et 3).* Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo. (vol. 1: 1 à 706p ; vol. 2: 707-1338p ; vol. 3: 1339-2150p)

- Travis, D.J. et V. Meentemeyer. 1991. Influence of glaze ice storms on growth rates of loblolly pine *Pinus taeda* and shortleaf pine *Pinus echinata* in the Southern Appalachian Piedmont. *Clim.Res.* 1: 199-205.
- Wätzig, H. et B. Fischer. 1987. Untersuchungen über den Jahrringausfall an Fichtenbeständen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden.* 36: 273-275.
- Webb, S.L. 1988. Windstorm and microsite colonization in two Minnesota forest. *CanJ.For.Res.* 18: 1186-1195.
- Westing, A.H. 1968. Formation and function of compression wood in gymnosperms. II. *Bot.Rev.* 34: 51-78.
- Westing, A.H. 1965. Formation and function of compression wood in gymnosperms. *Bot.Rev.* 31: 381-480.
- Worrell, R. 1979 Snow damage to the stems of coniferous trees. Unpublished Honours Degree Thesis, Forestry Dept., University of Aberdeen.

ANNEXE I

**Programme SAS utilisé pour déterminer l'excentricité de
la largeur des cernes de croissance des arbres étudiés**

```

data tho;
infile
'D:\utilisateurs\annieplourde\sas\tho2\d5300
13.txt' dlm=tab firstobs=2 expandtabs
missover;
input annee a1 a2 a3 a4;
output;

```

```

proc sort data=tho;
by annee;
run;

```

```

data tho1;
set tho;
vmax=max(a1,a2,a3,a4);
vmin=min(a1,a2,a3,a4);
by annee;
run;

```

```

data tho2;
set tho1;
if a1=vmax then rmax=1;
if a2=vmax then rmax=2;
if a3=vmax then rmax=3;
if a4=vmax then rmax=4;
if a1=vmin then rmin=1;
if a2=vmin then rmin=2;
if a3=vmin then rmin=3;
if a4=vmin then rmin=4;
by annee;
run;

```

```

data tho3;
set tho2;
if rmax=1 then rmaxd=0;
if rmax=2 then rmaxd=90;
if rmax=3 then rmaxd=180;
if rmax=4 then rmaxd=270;
if rmin=1 then rmind=0;
if rmin=2 then rmind=90;
if rmin=3 then rmind=180;
if rmin=4 then rmind=270;
by annee;
run;

```

```

data tho4;
set tho3;
if a1<vmax then x1=a1;
if a2<vmax then x2=a2;
if a3<vmax then x3=a3;
if a4<vmax then x4=a4;
if a1>vmin then z1=a1;
if a2>vmin then z2=a2;
if a3>vmin then z3=a3;
if a4>vmin then z4=a4;
run;

```

```

data tho5;
set tho4;
m_small=mean(x1,x2,x3,x4);
m_big=mean(z1,z2,z3,z4);
by annee;
run;

```

```

data tho6;
set tho5;
ampmax=vmax-m_small;
percmax=(vmax/m_small)*100;
ampmin=(m_big-vmin);
percmin=(vmin/m_big)*100;
by annee;
run;

```

```

data tho7;
set tho6;
if percmax>=200 then
a200=percmax;
if percmin<=50 then a50=percmin;
run;

```

```

data thofin;
set tho7;
drop x1 x2 x3 x4 z1 z2 z3 z4;
run;

```

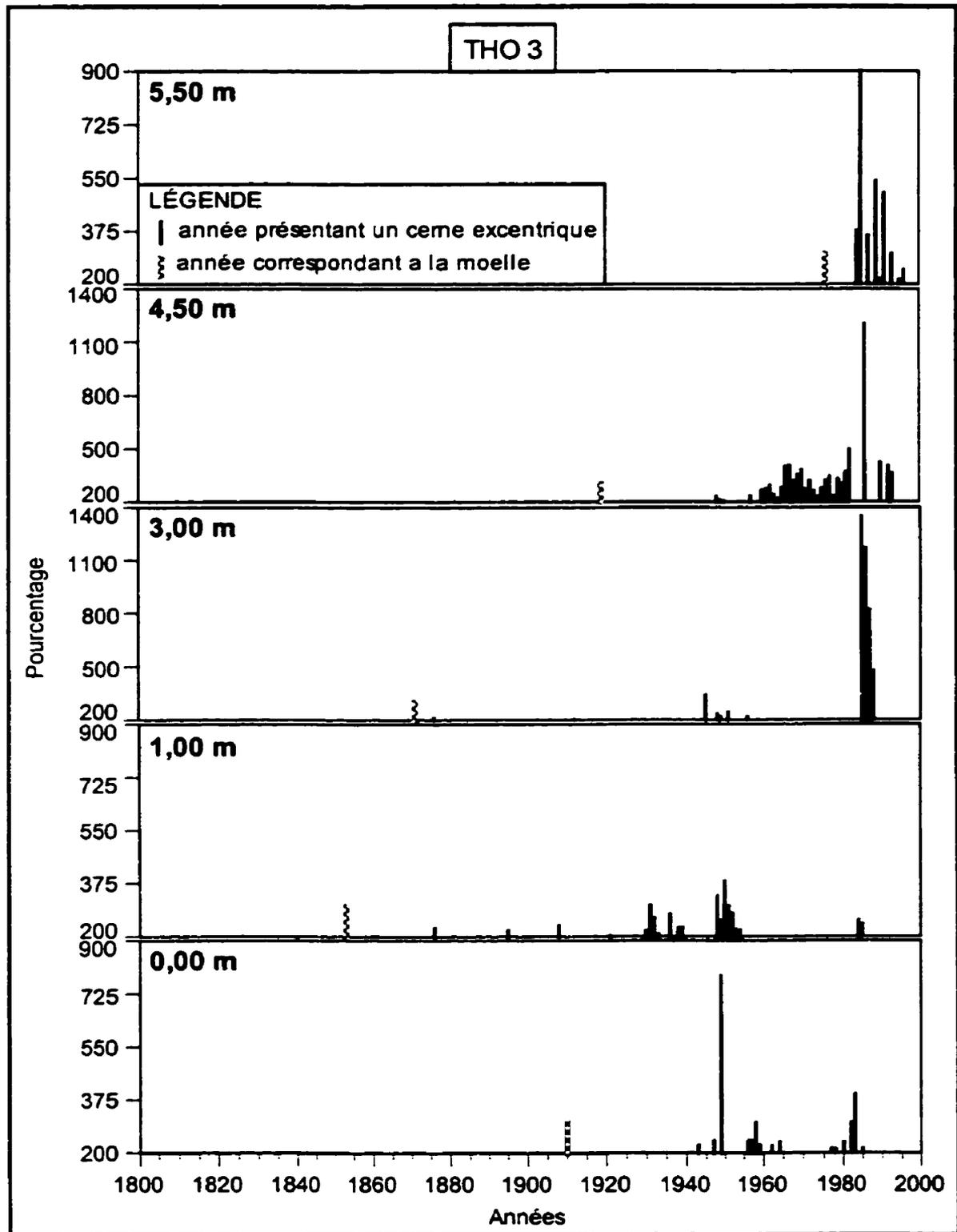
```

proc print data=thofin;
run;

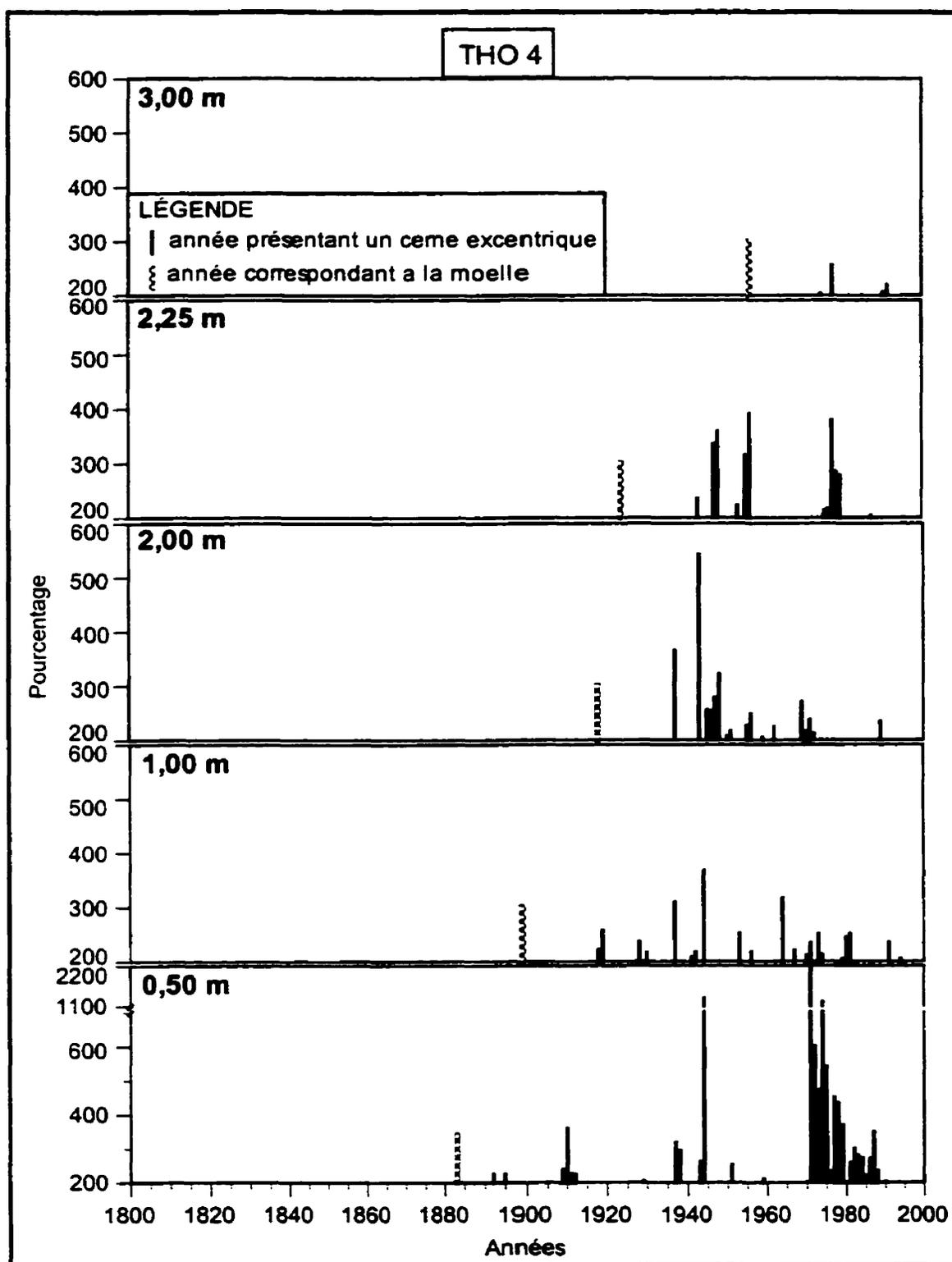
```

ANNEXE II

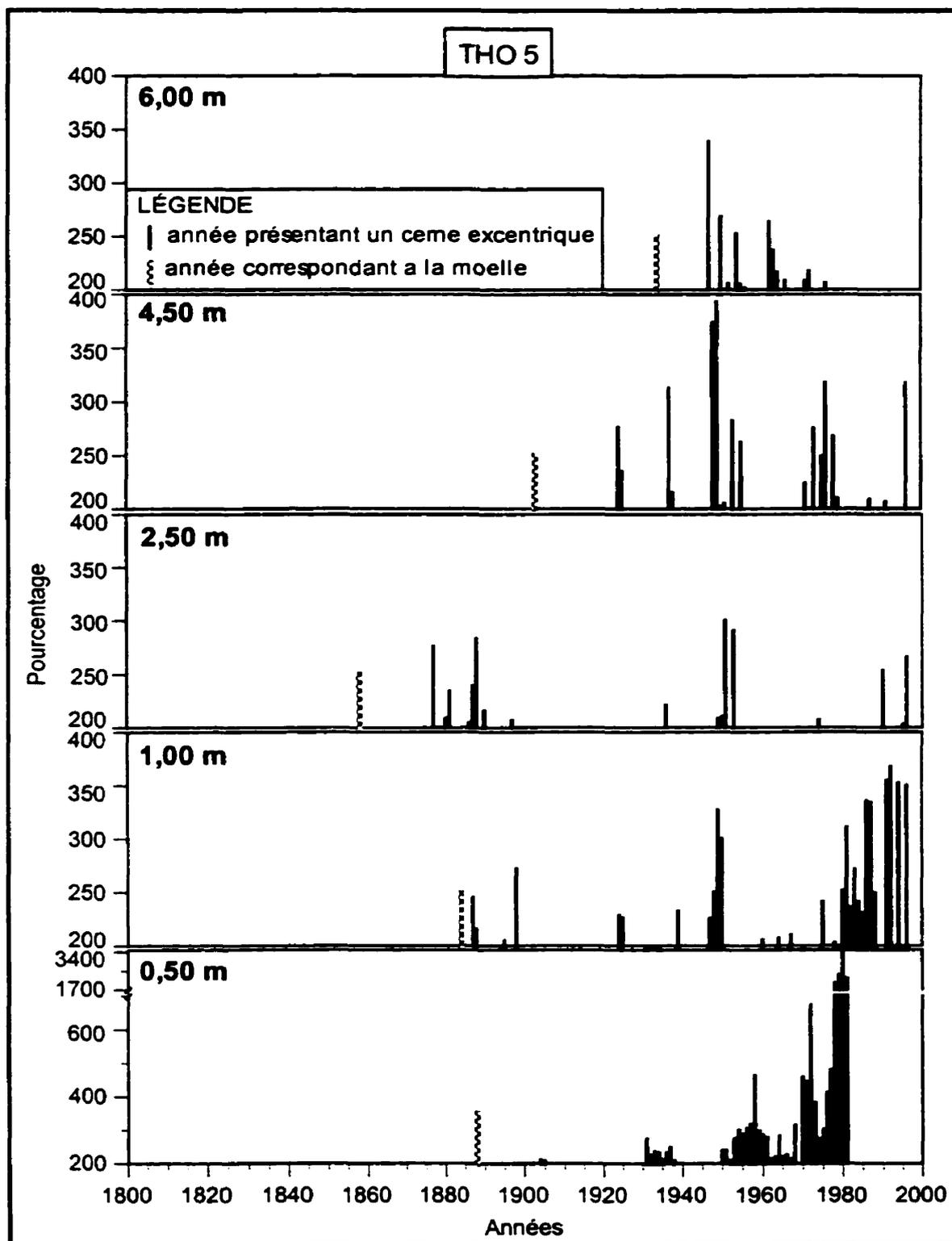
Excentricité des cernes de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections représentatives des échantillons THO 3, THO 4 et THO 5



Annexe II.a Excentricité des cernes de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections représentatives de l'échantillon THO 3.



Annexe II.b Excentricité des cerne de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections représentatives de l'échantillon THO 4.



Annexe II.c Excentricité des cemes de croissance à un seuil de 200 % pour cinq sections représentatives de l'échantillon THO 5.