

Dynamique d'un front forestier sur un talus d'éboulis actif en climat tempéré froid (Gaspésie, Québec)

Dynamics of a forest edge on an active scree slope occurring in a cold temperate climate environment (Gaspé Peninsula, Québec)

Dynamik eines Waldrandes auf einer aktiven Schutthalde in einem gemäßigt kalten Klima (Gaspé Halbinsel, Québec)

Manuel Lafortune, Louise Filion and Bernard Héту

Volume 51, Number 1, 1997

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/004840ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/004840ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (print)

1492-143X (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Lafortune, M., Filion, L. & Héту, B. (1997). Dynamique d'un front forestier sur un talus d'éboulis actif en climat tempéré froid (Gaspésie, Québec). *Géographie physique et Quaternaire*, 51(1), 67–80. <https://doi.org/10.7202/004840ar>

Article abstract

The development of the forest vegetation on a scree slope located in the valley of Rivière à Pierre, Gaspé Peninsula, was reconstructed over the last two centuries. It was established from dendroecological data that the forest limit was lower than its present position around 1850 and that the forest cover expanded until the middle of the 20th century, in spite of evidence for slope instability at the end of the 19th century. After 1950, the forest edge retreated to its present position. Annual sedimentation rates were calculated by using dendrogeomorphological methods. They were lowest (< 0.1 cm/year) during the second half of the 19th century, and increased to 0.5 cm/year during the 20th century, and up to 1.0 cm/year after 1975. Increased slope activity was likely associated with a higher frequency of frost-coated clast flows.

DYNAMIQUE D'UN FRONT FORESTIER SUR UN TALUS D'ÉBOULIS ACTIF EN CLIMAT TEMPÉRÉ FROID (GASPÉSIE, QUÉBEC)

Manuel LAFORTUNE, Centre d'études nordiques, Département de géographie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, G1K 7P4, m.lafortune@courrier.cen.ulaval.ca.

Louise FILION, Centre d'études nordiques, Département de géographie, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, G1K 7P4.

Bernard HÉTU, Module de géographie, Université du Québec à Rimouski, 300, allée des Ursulines, Rimouski, Québec, G5L 3A1.

Manuscrit reçu le 19 janvier 1996 ; manuscrit révisé accepté le 22 août 1996

RÉSUMÉ Cette recherche a permis de reconstituer, pour les deux derniers siècles, l'évolution de la végétation forestière sur un talus d'éboulis de la vallée de la rivière à Pierre, en Gaspésie. Les données dendroécologiques ont permis de faire ressortir que la limite supérieure de la forêt était plus basse que la limite actuelle vers le milieu du XIX^e siècle, que la végétation forestière a connu une phase d'expansion jusque vers le milieu du XX^e siècle, bien que certains signes d'instabilité se soient manifestés dès la fin du XIX^e siècle. Le front forestier a régressé jusqu'à sa position actuelle après les années 1950. Le taux annuel moyen de sédimentation, calculé par des méthodes dendrogeomorphologiques, a été inférieur à 0,1 cm pendant la deuxième moitié du XIX^e siècle pour ensuite atteindre 0,5 cm/an, puis excéder 1,0 cm/an après 1975. L'activité plus importante dans le versant serait associée à une fréquence accrue des coulées de pierres glacées.

ABSTRACT *Dynamics of a forest edge on an active scree slope occurring in a cold temperate climate environment (Gaspé Peninsula, Québec).* The development of the forest vegetation on a scree slope located in the valley of Rivière à Pierre, Gaspé Peninsula, was reconstructed over the last two centuries. It was established from dendroecological data that the forest limit was lower than its present position around 1850 and that the forest cover expanded until the middle of the 20th century, in spite of evidence for slope instability at the end of the 19th century. After 1950, the forest edge retreated to its present position. Annual sedimentation rates were calculated by using dendrogeomorphological methods. They were lowest (< 0.1 cm/year) during the second half of the 19th century, and increased to 0.5 cm/year during the 20th century, and up to 1.0 cm/year after 1975. Increased slope activity was likely associated with a higher frequency of frost-coated clast flows.

ZUSAMMENFASSUNG *Dynamik eines Waldrandes auf einer aktiven Schutthalde in einem gemäßigt kalten Klima (Gaspé Halbinsel, Québec).* Mit Hilfe dieser Forschung konnte man die Entwicklung der Wald-Vegetation auf einer Schutthalde im Tal des rivière à Pierre, Gaspé Halbinsel, in den letzten zwei Jahrhunderten rekonstruieren. Die dendroökologischen Daten ließen erkennen, daß die obere Grenze des Waldes gegen Ende des 19. Jahrhunderts tiefer lag als die gegenwärtige Grenze, daß die Wald-Vegetation bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts eine Ausdehnung erfuhr, wenn auch gewisse Anzeichen der Instabilität ab dem Ende des 19. Jahrhunderts aufgetreten sind. Der Waldrand ist auf seine gegenwärtige Position nach den fünfziger Jahren zurückgewichen. Die mit dendrogeomorphologischen Methoden errechnete durchschnittliche jährliche Sedimentierungs-Rate betrug während der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts unter 0,1 cm und erreichte anschließend 0,5 cm/Jahr, nach 1975 dann über 1,0 cm/Jahr. Die verstärkte Aktivität am Hang geht wohl auf ein häufigeres Auftreten vereister Blockströme zurück.

INTRODUCTION

Sur les talus d'éboulis évoluant en milieu tempéré, l'altitude et la physionomie du front forestier traduisent un équilibre dynamique entre la végétation et l'intensité de certains processus géomorphologiques (Héту, 1990), tels que les avalanches de neige (Luckman, 1978, 1988), les coulées de débris (Héту, 1987; Strunk, 1989, 1992; Bertran *et al.*, 1993) et les coulées de pierres glacées (Héту et Vandelac, 1989; Héту *et al.*, 1994). Or, cet équilibre dynamique peut évoluer dans le temps advenant un changement dans la fréquence ou l'intensité des processus. Dans un vaste talus d'éboulis (T-5) situé à proximité du site de la présente étude (T-3), en Gaspésie septentrionale (fig. 1), Héту (1990) a pu reconstituer les déplacements d'une bordure forestière au cours des 150 dernières années, en relation avec des changements dans l'activité du versant et dans l'importance de la sédimentation qui affecte la frange forestière. Située plus bas dans le versant pendant le XIX^e siècle, la limite supérieure de la forêt a ensuite connu une remontée jusque vers le milieu du XX^e siècle, pour ensuite régresser, par enfouissement, au profit du pierrier. Les déplacements de la forêt sur ce talus témoignent de changements récents dans l'intensité ou la fréquence des processus géomorphologiques (Héту, 1990).

Un examen sommaire des sept talus d'éboulis actifs de la vallée de la rivière à Pierre révèle que, outre T-5, quatre autres versants (T-3, T-4, T-6 et T-7) montrent des indices de recul récent de la forêt, associé dans tous les cas à un enfouissement des tiges, indiquant une recrudescence de l'activité géomorphologique à l'échelle de la vallée. Quelle

est la signification de ce phénomène ? S'agit-il d'une dynamique locale propre à chaque versant ou bien d'une tendance régionale liée à un changement climatique récent qui se serait traduit par un accroissement de la fréquence de certains processus géomorphologiques ? Dans cette deuxième éventualité, les déplacements de la forêt devraient être synchrones d'un versant à l'autre. Afin de trancher entre ces deux possibilités (dynamique locale ou tendance régionale), deux nouveaux talus ont été étudiés, soit T-3 (cette étude) et T-6 (étude en cours). Seuls les résultats découlant de l'étude du talus T-3 seront présentés ici. Les objectifs de cette recherche sont : (1) d'identifier, grâce à l'analyse dendroécologique des arbres constituant la frange forestière, les périodes d'activité sur un talus d'éboulis de la vallée de la rivière à Pierre (T-3) en Gaspésie, (2) d'estimer, à l'aide de repères dendrochronologiques, l'évolution du taux de sédimentation dans la frange forestière et enfin, (3) de retracer, pour les derniers siècles, les déplacements du front forestier, puis de comparer nos données avec celles obtenues par Héту (1990) sur un talus voisin (T-5).

LOCALISATION ET CARACTÉRISTIQUES DU TALUS D'ÉBOULIS ÉTUDIÉ

Le talus d'éboulis étudié (T-3) est situé en Gaspésie septentrionale (49°12' N, 65°48' O; fig. 1), sur le flanc est de la vallée de la rivière à Pierre, à 3 km de l'anse de Mont-Saint-Pierre. Dans cette région, située à la limite nord de la zone tempérée, la température moyenne annuelle est de 3,3 °C.

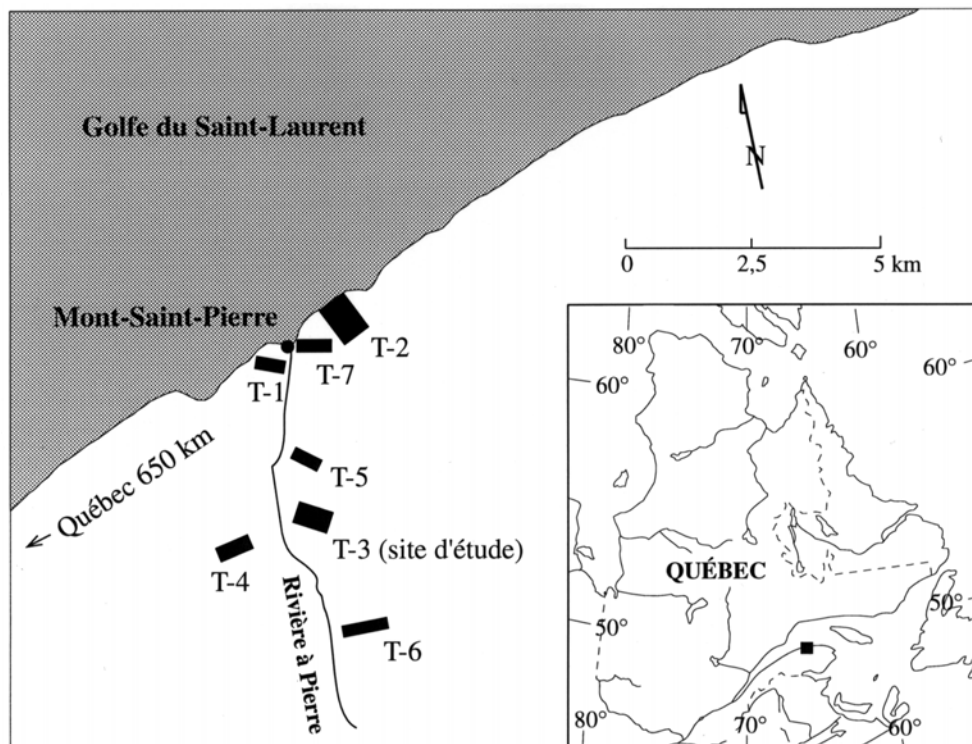


FIGURE 1. Localisation de la région et du talus à l'étude (T-3). T-1 à T-7 réfèrent à des talus étudiés par Héту, en 1986, 1990 et 1991.

Location of the study area and site (T-3). T-1 to T-7 refer to scree slopes studied by Héту in 1986, 1990 and 1991.

La température minimale moyenne de janvier est de $-13,8^{\circ}\text{C}$ alors que la moyenne maximale de juillet avoisine 20°C (Hétu et Vandelac, 1989). Les précipitations annuelles atteignent 970 mm dont 31 % tombent sous forme de neige. D'une longueur de 650 m, le talus T-3 est dominé par une corniche rocheuse de 60 m de hauteur, taillée dans les flyschs ordoviciens de la Formation de Cloridorme. Étant principalement constituée de schistes et de grès finement lités, cette paroi est très active, particulièrement à l'automne et au printemps. En effet, c'est durant ces deux saisons que sont concentrés la plupart des 40 à 60 jours connaissant au moins un cycle de gel-dégel (Trenhaile et Rudakas, 1981).

La pente du talus d'éboulis T-3 passe de 41° près de la paroi à moins de 26° à la base du versant. Le talus lui-même est colonisé par la forêt sur un peu moins de la moitié de sa longueur (250 m ; fig. 2). La sapinière occupe le plateau au sommet de la paroi (fig. 2). La partie supérieure du talus d'éboulis est pour l'essentiel dépourvue de végétation, hor-



FIGURE 2. Vue en direction est du talus T-3 et délimitation de la zone étudiée dans le cadre de ce travail.

A general view to the east of talus T-3. The zone under investigation is localized.

mis quelques bouquets d'arbres de forme rampante. Plus bas dans le versant, dans une zone d'une centaine de mètres de largeur, apparaissent des îlots de végétation dans lesquels les arbres prennent une forme érigée, mais le couvert végétal reste très discontinu (fig. 2). La frange forestière est constituée de thuyas (*Thuja occidentalis*) sur une bande de 5 à 20 m de largeur. Elle a un tracé très irrégulier en raison des profondes échancrures que forment deux langues de débris qui pénètrent profondément dans la forêt (fig. 2). En deça de la frange de thuyas, laquelle borde également les langues de débris, la partie inférieure du talus d'éboulis est recouverte par une forêt mixte surtout constituée de bouleaux blancs (*Betula papyrifera*), de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides*), de sapins baumiers (*Abies balsamea*) et d'épinettes blanches (*Picea glauca*). La forêt des 50 derniers mètres à la base du versant est issue de coupes ou de feux. Aucune trace de feu récent n'a été trouvée dans la partie supérieure du versant.

La paroi rocheuse au sommet du talus livre des débris de petit calibre (largeur moyenne: 3,7 cm), en forme d'aiguilles ou de plaquettes dont l'indice de sphéricité moyen, calculé suivant la méthode de Krumbein (1941), est de 0,3 (Hétu et Vandelac, 1989). Ne pouvant rouler, ces débris s'accumulent en masses instables près de la paroi, qui sont périodiquement redistribuées vers le bas du talus sous l'action de divers processus (Hétu et Vandelac, 1989; Hétu *et al.*, 1994). Les coulées de débris (*debris flows*) et les avalanches de neige sont assez fréquentes sur ce talus mais, comme elles n'atteignent que très rarement la forêt (Hétu et Vandelac, 1989), il est peu probable qu'elles participent à l'enfouissement de la base des arbres constituant la frange forestière. Certaines grosses avalanches contribuent à la formation de couloirs en forêt, comme nous avons pu le constater sur le talus T-6 au printemps 1987 et sur le talus T-5 à l'été 1996. Mais ces grosses avalanches, qui appartiennent à la catégorie des avalanches dites superficielles (Franco et Hétu, 1989), c'est-à-dire supranivales, n'ont laissé aucun dépôt, laissant supposer qu'elles interviennent peu dans le bilan sédimentaire global du versant. En fait, sur les talus à exposition ouest, soit T-3, T-5 et T-6, le transport des débris du pierrier vers la forêt s'effectue surtout sous forme de coulées de pierres glacées (CPG), comme le démontrent à la fois les inventaires de processus effectués depuis 1978 et le faciès des dépôts qui s'accumulent dans la forêt (Hétu *et al.*, 1994). Les CPG sont des coulées de pierraille dont la progression est facilitée par la présence d'une fine pellicule de glace autour des éléments, se formant lorsque les températures quotidiennes oscillent autour du point de congélation (Hétu *et al.*, 1994; Van Steijn *et al.*, 1995).

Associés à des zones de sur-alimentation en débris situées dans le prolongement des couloirs de la paroi, les CPG ré-utilisent fréquemment les mêmes tracés. Plus bas sur le talus, elles serpentent entre les îlots forestiers, là où les chenaux sont très marqués (fig. 2). Chacun d'eux est prolongé dans la frange forestière par un lobe terminal constitué de matériel à texture ouverte qui enfouit la végétation. Les lobes, plutôt petits, ont une largeur moyenne de 2,5 m et une longueur de 4 à 6 m. Étant donné le grand nombre de

chenaux, les lobes d'enfouissement, souvent coalescents, affectent en fait la majeure partie de la frange forestière (voir la carte publiée par Héту *et al.*, 1994). Les nombreux lobes qui parsèment le sous-bois ont des âges variés comme l'indiquent la nature et la densité de la végétation qui les recouvre (lichens, mousses, plantes herbacées ou arbustes). Parce qu'elles pénètrent très profondément en forêt, les deux grandes langues de débris du secteur sud (fig. 2) correspondent probablement aux secteurs où les CPG sont les plus fréquentes, comme en témoigne le grand nombre de lobes d'âge varié qui ont été déviés dans les bordures forestières qui les délimitent. D'ailleurs, ces langues de débris se situent sous le point de convergence de trois des principaux chenaux de CPG du secteur sud (fig. 2). En raison de l'enfouissement de végétation qui en découle, il paraît évident que les CPG jouent actuellement un rôle prépondérant dans le recul de la forêt comme ont pu le constater Héту *et al.* (1994). Les données dendroécologiques récoltées dans la partie sud du talus (fig. 2) ont permis d'en préciser le rythme.

MÉTHODES

CHOIX DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE ET PRISE DE DONNÉES SUR LE TERRAIN

Le secteur étudié correspond à la zone d'interpénétration du pierrier et de la forêt. Il forme une bande large de 100 m et longue d'environ 400 m, orientée dans le sens de la pente (fig. 2). Il comprend: a) le pierrier parsemé d'îlots de végétation au-dessus du front forestier, b) une frange forestière perturbée qui s'étend sur une trentaine de mètres de part et d'autre des deux langues de débris qui font respectivement 200 m et 130 m de longueur et c) une partie de la forêt située en contrebas des langues de débris. La répartition des stations d'échantillonnage à des fins d'analyse dendrochronologique a été effectuée de façon à bien représenter les divers milieux écologiques: les îlots de végétation supraforestiers ($n = 7$), la forêt avoisinant les langues de débris ($n = 58$), une zone de vieux thuyas située à la base de la grande langue de débris ($n = 16$) et la forêt située en contrebas ($n = 20$), ce qui représente un total de 101 stations d'observations et de mesures. Dans la forêt, on a pris soin de bien répartir les stations d'échantillonnage de part et d'autre des langues de débris, intégrant les zones de sédimentation nulle (pas d'accumulation au-dessus du collet des plus vieux arbres qui la bordent), de manière à bien les circonscrire dans le temps et dans l'espace. Dans le détail, la répartition des stations permet d'intégrer un maximum de lobes terminaux de CPG. Dans la sélection des stations, on a privilégié les sites où il y avait des conifères à tige unique et droite, au moins au-dessus de la surface du sol. Seuls les arbres les plus âgés ont été échantillonnés. Les espèces visées plus particulièrement sont le sapin baumier, l'épinette blanche et le thuya, mais on a également échantillonné à l'occasion les autres espèces d'arbres occupant nos stations quand ils étaient plus âgés. Dans plusieurs stations ($n = 53$), il n'y avait pas de débris accumulés au-dessus du collet des arbres, alors qu'ailleurs l'accumulation atteignait jusqu'à 87

cm d'épaisseur. L'épaisseur de débris accumulés au-dessus du collet de l'arbre a été mesurée, de même que le diamètre du tronc au niveau de la surface actuelle du dépôt et au collet. Des sections transversales du tronc ont été prélevées à ces deux niveaux ainsi qu'à l'emplacement des cicatrices relevées sur le tronc. Sur certains arbres, une section transversale des racines adventives a été prélevée près de leur insertion sur la tige. Considérée comme un indice de stabilité du versant, la présence ou l'absence de matière organique à la surface du sol et, s'il y a lieu, son épaisseur ont été notées dans chaque station. En tout, 53 puits ont été excavés, dont deux coupes dégagées perpendiculairement à la langue principale de débris, à 30 m l'une de l'autre dans le but de repérer des horizons organiques enfouis et pour examiner la stratigraphie dans les langues. L'épaisseur et la profondeur des couches organiques enfouies ont elles aussi été notées. Des mesures d'inclinaison du grand axe des éléments ont été effectuées dans deux lits de la grande langue de débris ($n = 50$ cailloux) afin de mieux en caractériser la dynamique.

ANALYSE DENDROCHRONOLOGIQUE

Les sections transversales ont été séchées et polies pour bien identifier les cernes annuels de croissance. L'âge des tiges sectionnées a été déterminé au niveau du collet, ce qui a permis d'identifier, pour la majorité des arbres échantillonnés, la période de leur établissement dans le versant. Plusieurs arbres portaient des cicatrices et des racines adventives qui ont pu être datées avec précision. Les années de formation de bois de réaction ont été relevées sur les mêmes sections, lorsque cette modification dans la structure anatomique du bois durait plus de deux années. Les fréquences obtenues pour la formation de cicatrices et de bois de réaction ont été pondérées en tenant compte du nombre d'arbres échantillonnés qui étaient vivants à chacune des années, selon la méthode proposée par Shroder (1978). Les indices (I_t), exprimés en pourcentage, ont été obtenus de la formule suivante:

$$I_t = \left(\frac{\sum_{j=1}^n Rt}{\sum_{j=1}^n At} \right) \times 100 \quad (1)$$

dans laquelle R représente la réponse à un événement, t correspondant à l'année de cet événement et A au nombre d'arbres vivants à l'année t.

La croissance radiale de chaque arbre dont le collet était recouvert de plus de 10 cm de sédiments a été mesurée, ceci afin de voir si l'enfouissement pouvait entraîner un rétrécissement du diamètre à la base des tiges (forme en fuseau). La largeur des cernes a été mesurée le long de deux rayons opposés, perpendiculairement à l'orientation de la pente et en évitant les anomalies de cernes (c'est-à-dire bois de réaction, présence d'une racine adventive ou d'une branche, etc.), à l'aide d'un micromètre Henson d'une précision de 0,01 mm. Une courbe moyenne a ensuite été calculée.

ÉTUDE HISTOLOGIQUE DES TIGES ENFOUIES

Comme les courbes de croissance radiale ne montraient pas de période prolongée de réduction de croissance, nous avons dû procéder à l'analyse histologique des tiges enfouies pour dater l'enfouissement de la base des arbres. Pour limiter l'étude aux caractéristiques anatomiques les moins corrélées avec la largeur des cernes annuels, nous avons retenu la mesure de la surface du lumen des trachéides. Chez l'épinette blanche, en effet, Cournoyer (1991) a pu montrer que la surface et le diamètre des cavités cellulaires ne sont pas corrélés avec la largeur des cernes.

Vingt-cinq spécimens, soit vingt sapins baumiers, trois thuyas et deux épinettes blanches, dont le collet était enfoui sous une quantité variable de matériel (entre 5 et 87 cm), ont été analysés. Une couche de bois d'environ 20 μm d'épaisseur a été prélevée au niveau du collet, le long d'un rayon ne présentant aucune anomalie dans les cernes, puis colorée à la safranine et montée entre lame et lamelle.

Une caméra vidéo installée sur un microscope optique couplé à un ordinateur a permis de visualiser les trachéides à un grossissement de 100 X. Les cernes annuels ont été numérisés à l'aide du logiciel MacCell et la prise de mesures a été effectuée à l'aide du logiciel NIH Image 1.29. Pour chacun des cernes, la surface du lumen de 30 trachéides a été mesurée uniquement dans le bois initial, car dans le bois final la petite taille du lumen des cellules complique la prise de mesure. En outre, des mesures effectuées dans le cerne complet ou uniquement dans le bois initial donneraient des tendances identiques (Cournoyer, 1991). Les trachéides ont été mesurées le long de files radiales (ou assises cataclinales), soit dix cellules consécutives ou moins, selon la largeur du bois initial. Les premières files formées de cellules régulières, non déformées par la coupe, depuis le haut de l'image numérisée, ont été retenues.

Pour faire ressortir les variations abruptes et durables de la surface du lumen des trachéides, la distance euclidienne a été calculée pour chacune des séries de données (Brunt et Conley, 1990; Johnston *et al.*, 1992) selon l'équation suivante:

$$DE_{nw} = \sum_{i=1}^n (x_{iAw} - x_{iBw}) \quad (2)$$

dans laquelle n est la valeur centrale de la fenêtre, w la largeur d'une demi-fenêtre, a le nombre de lumens mesurés et enfin A et B les deux demi-fenêtres. Les calculs ont été effectués avec une demi-fenêtre (w) représentant cinq ans. Les sommets correspondant à des augmentations interannuelles supérieures à un écart type par rapport à la moyenne mobile ont été retenus pour identifier les changements anatomiques en réponse à l'enfouissement des tiges. Cette augmentation de la taille du lumen des cellules devait en plus se maintenir jusqu'en 1991, année du dernier cerne annuel complet.

CALCUL DES TAUX DE SÉDIMENTATION

Des taux de sédimentation ont été calculés en utilisant divers repères chronologiques, soit l'âge de l'arbre, l'année de formation de bois de réaction, l'âge d'une cicatrice enfouie ou encore l'année correspondant à un changement dans la taille du lumen des trachéides. La première méthode de calcul (S_1), qui consiste à diviser l'épaisseur des sédiments accumulés au-dessus du collet par l'âge de l'arbre, n'a pas été retenue à cause de sa faible précision. En effet, ce mode de calcul cause une réelle sous-estimation du taux de sédimentation, puisque l'accumulation a pu commencer longtemps après l'établissement de l'arbre.

Le début de l'enfouissement d'un tronc peut être déterminé avec plus de précision lorsque l'accumulation de sédiments a provoqué l'inclinaison de la tige, entraînant la formation de bois de réaction. Dans ce cas, le taux de sédimentation (S_2) se calcule selon l'équation:

$$S_2 = (P_i - O) / I \quad (3)$$

dans laquelle P_i est l'épaisseur de sédiments recouvrant la tige inclinée, O l'épaisseur cumulée des horizons organiques enfouis et I le nombre de cernes formés depuis l'inclinaison de la tige (fig. 3). Il est probable que cette méthode conduise aussi à une légère sous-estimation du taux de sédimentation, car on ne connaît pas l'épaisseur minimale de sédiments requise pour provoquer l'inclinaison de la tige.

Formées à l'air libre, les cicatrices d'impact ou d'abrasion trouvées sous le niveau actuel de la surface du sol constituent des indicateurs fiables pour le calcul des taux de sédimentation. Ne connaissant pas exactement l'épaisseur des

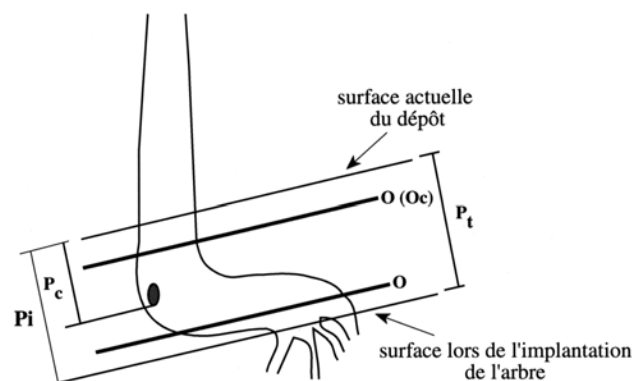


FIGURE 3. Vue en coupe d'un arbre et variables utilisées pour le calcul des taux de sédimentation. P_t indique la profondeur à laquelle se trouve le collet de l'arbre, P_c la profondeur de la cicatrice, P_i l'épaisseur de sédiments recouvrant la tige inclinée et O_c l'épaisseur cumulée des niveaux organiques.

Longitudinal section of a tree stem and variables used for calculation of sedimentation rates. P_t refers to the depth of the root collar, P_c to the depth of a given scar, P_i to the thickness of sediments burying the tilted stem and O_c to the cumulative thickness of organic layers.

sédiments déjà accumulés au moment de la formation de la cicatrice, il est possible que le taux de sédimentation (S_3) puisse être légèrement surestimé. L'équation devient alors :

$$S_3 = [((P_t - P_c - (O - O_c)) / (A - C)) + ((P_c - O_c) / C)] / 2 \quad (4)$$

où P_t est l'épaisseur totale des sédiments recouvrant le collet, P_c la distance entre la base de la cicatrice et la surface du dépôt, O l'épaisseur cumulée des horizons organiques enfouis, O_c l'épaisseur cumulée des horizons organiques présents dans P_c , A l'âge de l'arbre et C le nombre de cernes annuels formés après la cicatrice.

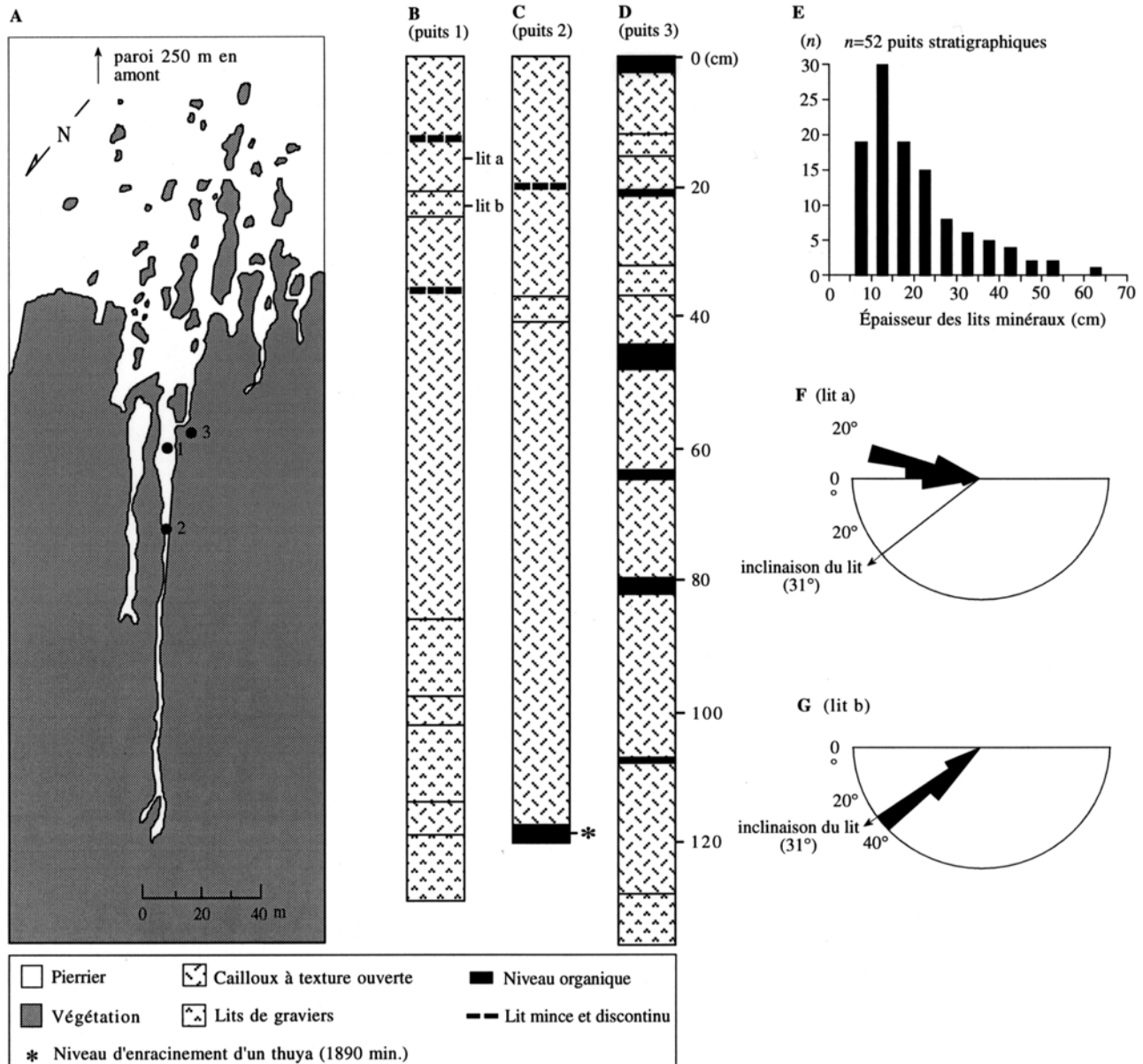


FIGURE 4. Localisation de trois coupes verticales (1 à 3) excavées dans le talus T-3 (A) et stratigraphie de ces trois coupes montrant l'alternance de lits minéraux (lits de cailloux et lits de graviers) et de lits organiques (B à D). L'épaisseur des lits minéraux est aussi présentée (E), ainsi que l'orientation des fragments dans un lit de cailloux à texture ouverte (F) et dans un lit de gravier (G).

Location of three vertical sections (1 to 3) excavated in talus T-3 (A) and stratigraphie showing openwork material and gravel beds alternating with organic layers (B to D). Thickness of mineral beds (E) and dips of fragment main axis (a) in openwork material (F) and gravel beds (G) were also included.

Le calcul du taux de sédimentation à partir des changements anatomiques (S_4) a été effectué selon la formule:

$$S_4 = [((P_r - O_r)/(A - R)) + ((P_t - P_r - (O - O_r))/R)]/2 \quad (5)$$

dans laquelle P_r est la profondeur d'enfouissement estimée d'après la réaction anatomique, O_r l'épaisseur cumulée des horizons organiques présents dans P_r et R le nombre de cernes formés depuis l'année de la réaction anatomique.

Lorsqu'une cicatrice est présente au niveau du collet ou que la tige est fortement inclinée, on remplace A (âge de l'arbre) dans l'équation précédente par C (nombre de cernes annuels suivant la formation de la cicatrice) ou I (nombre de cernes formés depuis l'inclinaison de la tige), selon le cas. La datation des racines adventives, lorsqu'elles étaient présentes, a permis de vérifier l'exactitude des informations concernant les périodes d'enfouissement.

RÉSULTATS

STRATIGRAPHIE

Les puits ouverts dans la zone où les arbres sont soumis à l'enfouissement, comme la coupe 3 excavée dans la frange forestière (fig. 4A et D), révèlent une alternance de lits organiques de type F ou FH et de couches de débris à texture ouverte ou semi-ouverte. En moyenne, on a dénombré 3,3 horizons organiques enfouis par puits ($n = 53$). Un maximum de 11 horizons a été observé à l'intérieur de la même coupe, soulignant le caractère intermittent de la sédimentation. L'épaisseur moyenne des horizons organiques enfouis dans les sédiments est de $4,1 \pm 2,9$ cm et celle des lits de cailloux de 16 ± 5 cm (fig. 4E). Un examen attentif des couches de débris révèle deux types de sédiments qui se répètent en alternance (fig. 4B, C et D) : (a) des lits relativement minces (5 à 20 cm) principalement constitués de gravier à texture ouverte pouvant comporter à l'occasion un faible pourcentage de limon ; (b) des couches de débris grossiers, à texture ouverte, beaucoup plus épaisses en général (5 à 50 cm), constituées de grandes plaquettes de schistes. L'orientation du grand axe des éléments diffère peu d'un type de lit à l'autre, les éléments parallèles à la pente étant largement majoritaires. En revanche, on note une différence importante au niveau de l'inclinaison (fig. 4F et G). Dans les lits de gravier, les éléments sont parallèles au plan du lit (fig. 4G), alors qu'ils présentent une forte imbrication dans les lits grossiers (fig. 4F). Le pendage des couches est généralement assez faible pour un talus d'éboulis. Dans la coupe n° 1 par exemple, il est de 31° . L'ensemble des caractéristiques observées, incluant le faible pendage des lits, sont typiques des dépôts associés aux coulées de pierres glacées (Hétu *et al.*, 1994; Van Steijn *et al.*, 1995). Les couches de cailloux fortement imbriqués correspondent aux lobes terminaux des coulées, alors que les lits de gravier dont les éléments sont parallèles au lit correspondent aux chenaux.

La coupe n° 2, excavée au centre de la grande langue de débris, à une centaine de mètres en contrebas de la limite pierrier-forêt continue, a permis de dégager, à 1,2 m de profondeur, un lit organique épais (plus de 20 cm) dans lequel un thuya est enraciné (fig. 4A et C). Cet arbre se serait établi vers 1890 A.D. au cours d'une période de stabilité relativement longue comme en témoigne l'épaisseur de la couche organique dans laquelle il s'enracine. On en déduit que vers la fin du XIX^e siècle la langue principale de débris n'était pas encore formée ou que son extrémité inférieure n'avait pas encore atteint ce point.

Un horizon organique de type F ou FH (Commission canadienne de pédologie, 1987) a été observé en surface dans 83 % des stations d'échantillonnage ($n = 101$). Son épaisseur est de $9,5 \pm 7$ cm en moyenne, bien qu'elle varie beaucoup d'un site à l'autre, entre 1 et 36 cm. On peut en fait distinguer deux zones : la frange forestière située de part et d'autre de la langue principale de débris où l'épaisseur de l'horizon de surface, généralement inférieure à la moyenne, est très variable d'une station à l'autre, et la forêt au bas de la grande langue de débris où l'épaisseur de l'humus est relativement constante et supérieure à la moyenne obtenue pour l'ensemble des stations.

ÉTABLISSEMENT DE LA VÉGÉTATION FORESTIÈRE DANS LE VERSANT

La détermination de l'âge au collet des arbres échantillonnés a permis de subdiviser la zone étudiée en cinq secteurs (fig. 5). L'îlot de thuyas situé à la base de la langue principale de débris (secteur D) est constitué des arbres les plus âgés de l'aire d'étude. Deux de ces thuyas ont plus de 400 ans. À l'exception de deux arbres établis après 1850 (fig. 5D) et qui ont un port droit, ces vieux thuyas présentent une tige fortement inclinée à la base, qui s'insère profondément dans le substrat. Il pourrait s'agir d'anciennes marcottes qui, à l'image des cèdres très courbés formant la limite actuelle forêt-pierrier, se sont développées dans un environnement très instable où la sédimentation était rapide. Ces tiges sont apparues entre 1520 et 1820 (fig. 5D). Il s'agit d'une période minimale d'implantation, car le collet se trouvait à une profondeur inconnue sous la pierraille de la grande langue de débris.

À l'intérieur du secteur C, soit juste au-dessus des vieux thuyas, les arbres échantillonnés se sont établis entre 1787 et 1945 (fig. 5C). Dans les 100 mètres supérieurs de la forêt (secteur B), les tiges sont apparues entre 1852 et 1953 (fig. 5B). Aucun arbre mort ou couché au sol n'a été trouvé dans ce secteur. Il s'agirait donc de la première génération d'arbres à coloniser cette partie du talus depuis la dernière période importante d'éboulisation. Les îlots de végétation supra-forestiers (secteur A) auraient colonisé le pierrier entre 1857 et 1930 (fig. 5A).

Finalement, dans la partie inférieure du versant (secteur E), la majorité des arbres se sont établis après 1930, les sapins et les épinettes blanches ayant moins de 65 ans (fig. 5E). De nombreuses souches de pin blanc qui avaient fait

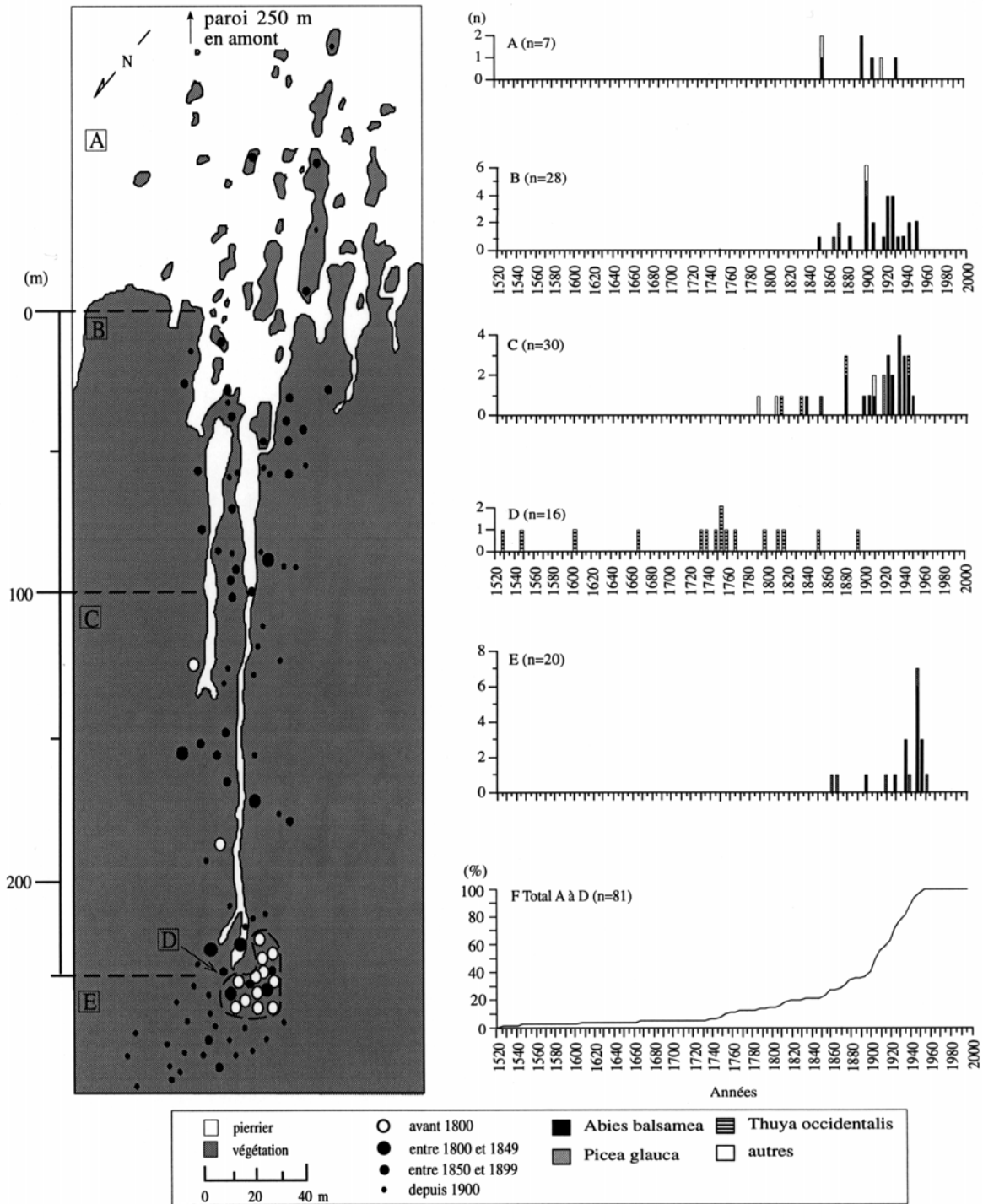


FIGURE 5. Carte montrant la répartition des arbres échantillonnés dans le versant, leur période d'établissement ainsi que les limites des secteurs A à E (discutés dans le texte). Les années d'établissement sont aussi présentées sous forme d'histogrammes pour chaque secteur (A à E), de même que la courbe de fréquence cumulée des arbres échantillonnés dans les secteurs A à D, présents dans le versant à chaque année (F).

Map showing the distribution of sampled trees, periods of tree establishment and limits of sectors A to E (discussed in text). Histograms show tree establishment as a function of time for each sector (A to E). Also presented: a cumulative curve showing the proportion of trees sampled in sectors A to D that were present on the slope for each year.

l'objet d'une coupe ont été partiellement calcinées par un feu qui a ravagé le bas du versant vers la fin du siècle dernier. Aucune cicatrice de feu ni matériel calciné n'ont été observés au-dessus du secteur E.

Il convient de rappeler ici que les arbres échantillonnés dans ce travail étaient présumément les plus âgés. Si on peut tirer des conclusions générales sur les périodes d'établissement de la végétation forestière dans le versant, on n'obtient par ailleurs aucune information sur la période récente, car les jeunes tiges n'ont pas été échantillonnées. D'après l'âge et la répartition des plus vieux arbres dans le versant, on peut déceler un mouvement général de colonisation progressive depuis le secteur D où se trouve l'îlot de vieux cèdres (avant 1820), vers les secteurs C (ca 1750) et B (ca 1850) et enfin, vers le pierrier (secteur A, ca 1890). La courbe de fréquence cumulée indique que 90 % des arbres échantillonnés dans les secteurs A à D étaient établis en 1935 (fig. 5F). Les arbres du secteur E n'ont pas été considérés ici, car leur établissement n'a pas de signification en ce qui a trait à l'activité dans le versant. Ils reflètent plutôt l'histoire des coupes et des feux récents.

FORMATION DE CICATRICES SUR LES ARBRES

Les arbres échantillonnés ($n = 101$) portaient au total 143 cicatrices visibles. En règle générale, ces cicatrices ont une forme ovale et mesurent au plus 10 cm de hauteur sur 5 cm de largeur. Certaines d'entre elles semblent résulter de l'impact causé par les gros blocs de grès à fort indice de sphéricité qui dévalent le versant à toute vitesse (Héty, 1990). D'autres sont des cicatrices d'abrasion liées au passage des coulées de pierres glacées. Enfin, un troisième type de cicatrices résulte de l'arrachement de branches prisonnières du couvert de neige et de glace qui s'affaisse graduellement au moment de la fonte. On a observé à l'occasion quelques cicatrices multiples lorsqu'un arbre a subi plusieurs dommages au même niveau sur la tige. Un maximum de sept cicatrices a été dénombré sur un arbre situé au contact forêt-pierrier. La hauteur moyenne des cicatrices au-dessus la surface actuelle du sol est de 47 ± 18 cm. Une vingtaine de cicatrices, soit 15 % de toutes les cicatrices relevées, ont été trouvées sous la surface du sol. Le nombre moyen de cicatrices par arbre et leur âge varient passablement d'un secteur à l'autre (fig. 6A).

La formation de la plus vieille cicatrice remonte à 1751. On n'a dénombré que peu de cicatrices ($n = 5$) avant 1910 (fig. 6A). Il est possible que les quelque 80 années écoulées depuis cette date soient suffisantes pour que la plupart des cicatrices se soient refermées. Après 1910, on observe un accroissement constant du nombre absolu de cicatrices et de l'indice pondéré selon le nombre de tiges vivantes (fig. 6A). Entre 1910 et 1949, on compte 0,53 cicatrice par année, c'est-à-dire une cicatrice tous les deux ans en moyenne ($I_t = 3,9$ %). Entre 1950 et 1974, ce nombre a quadruplé pour atteindre deux cicatrices par an ($I_t = 10,2$ %) et depuis 1975, il s'est formé en moyenne 3,2 cicatrices par année ($I_t = 18,2$ %). Les cicatrices apparues récemment

dans l'îlot de vieux thuyas (secteur D) indiquent que les débris atteignent fréquemment ce secteur depuis le début du XX^e siècle.

DÉSTABILISATION DES ARBRES DANS LE VERSANT

La compilation des données concernant la formation de bois de réaction fait ressortir trois groupes d'années (classes) durant lesquelles plus de 20 % des tiges ont été inclinées, soit de 1885 à 1890, de 1925 à 1930 et de 1950 à 1955 (fig. 6B). La période la plus ancienne n'a été décelée qu'au niveau du front forestier et des îlots supra-forestiers, alors que les deux plus récentes ont été observées sur l'ensemble de la zone étudiée, à l'exception du secteur E. La vague récente de déstabilisation aurait donc progressé du haut vers le bas de la forêt.

RÉPONSE ANATOMIQUE DES TIGES À L'ENFOUISSEMENT

Douze des 25 tiges ayant fait l'objet d'une analyse anatomique ont montré une augmentation subite et durable de la surface moyenne du lumen des trachéides par suite de l'enfouissement de la base des tiges sous une couche de débris dont l'épaisseur variait entre 42 et 87 cm. Chez le sapin, les tiges qui avaient reçu moins de 39 cm de débris ne montrent aucune modification de la taille de leurs cellules. Il semble donc que dans ce matériel schisteux à texture ouverte la profondeur critique d'enfouissement pour cette espèce se situe aux alentours de 40 cm. Au-delà de ce seuil, la surface moyenne du lumen des trachéides du bois initial passe de $387,6 \mu\text{m}^2$ à $568,5 \mu\text{m}^2$ après l'enfouissement des tiges, ce qui représente une augmentation de 46 % ($n = 8$). Chez six des huit sapins, l'augmentation de la surface du lumen des trachéides s'est accompagnée la même année d'un accroissement de la largeur des cernes annuels de l'ordre de 165 % en moyenne qui a duré entre un et cinq ans selon les individus.

Pour les autres espèces, le seuil critique n'a pu être clairement défini vu le nombre restreint d'échantillons. Il serait vraisemblablement inférieur à 46 cm pour le thuya ($n = 2$) et voisin de 50 cm pour l'épinette blanche ($n = 2$). Aucune relation entre l'augmentation de la surface des cavités cellulaires et la largeur des cernes n'a été décelée chez ces espèces.

Nous avons pu évaluer la validité des résultats obtenus de l'analyse anatomique de plusieurs façons, notamment en comparant les réponses à l'enfouissement chez deux arbres très rapprochés. Pour certains arbres, nous avons aussi utilisé plusieurs repères chronologiques, comme l'âge d'une cicatrice ou d'une racine adventive. Ainsi, deux sapins dont la base était distante de moins de deux mètres et enfouie sous respectivement 42 et 46 cm de matériel, ont réagi presque simultanément à l'enfouissement, l'un en 1984, l'autre en 1980. Deux autres arbres (un sapin et un thuya), situés à 60 cm l'un de l'autre, ont réagi à l'enfouissement à trois années d'intervalle, en formant des cellules de plus grande dimension. Par ailleurs, une épinette blanche présentant à 35 cm au-dessus du collet une cicatrice formée en 1969 montre la même année une augmentation de la surface du

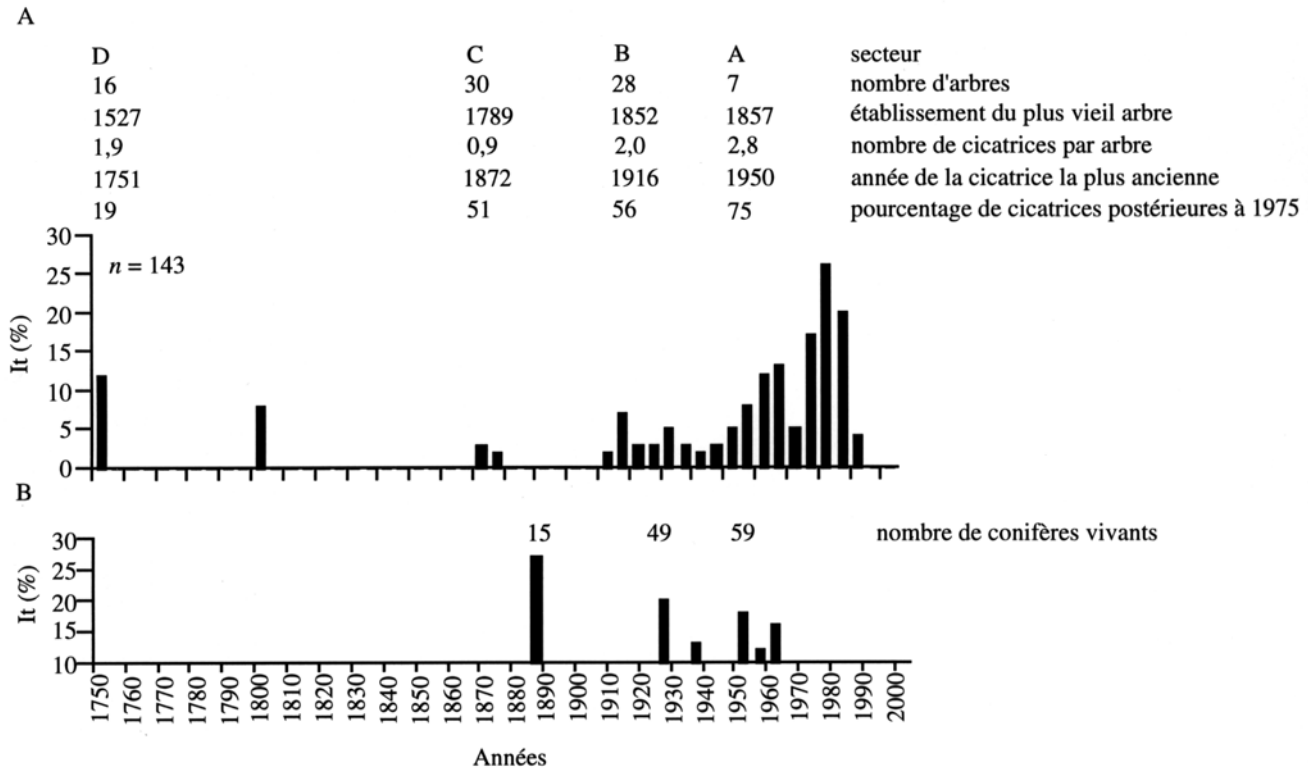


FIGURE 6. Données sur la formation de cicatrices au sein de chaque secteur et fréquence pondérée (*It*) de formation de cicatrices (A) et de bois de réaction (B).

Data on scar formation for each sector along with indices (*It*) for scar (A) and reaction wood formation (B).

lumen des trachéides. Dans ce cas, un arrivage de sédiments a fort bien pu écorcher la tige (d'où la cicatrice) tout en permettant d'atteindre la profondeur critique pour susciter une réaction anatomique dès la première saison de croissance suivant l'accumulation. Une telle concordance a aussi été observée chez un autre arbre, cette fois entre l'âge d'une racine adventive à 5 cm au-dessus du collet et l'année de l'accroissement en surface des cavités cellulaires, les deux remontant à 1974.

TAUX DE SÉDIMENTATION

Deux ensembles de données sont présentées ci-dessous, soit : 1) des taux moyens de sédimentation par secteur pour l'ensemble de la période forestière, qui commence avec l'installation des arbres ; 2) l'évolution dans le temps des taux de sédimentation dans l'ensemble de la zone étudiée.

A. Taux moyens de sédimentation depuis l'établissement des arbres

Des taux moyens de sédimentation ont été calculés pour chacun des secteurs A, B et C, soit pour la partie active du talus. Afin d'être plus représentatifs, ces taux tiennent également compte des stations où l'accumulation a été nulle ($n = 33$). Le taux moyen calculé pour l'ensemble des trois secteurs ($n = 65$) est de 0,6 cm/an. Le secteur A reçoit en moyenne 0,5 cm/an de débris de paroi, soit un taux proba-

blement bien inférieur à la masse de sédiments qui transite à ce niveau chaque année. Comme les coulées de pierres glacées surviennent surtout au printemps, au moment où les îlots d'arbres sont encore enneigés, elles les contournent ou passent par-dessus, n'y laissant que peu de débris. En fait, le pierrier constitue une zone de transit plutôt qu'une zone d'accumulation de débris. En revanche, le taux moyen de sédimentation le plus élevé (0,7 cm/an) a été obtenu pour le secteur B, soit dans la partie supérieure de la forêt. Dans le secteur C, situé plus bas dans le versant, environ 0,3 cm de matériel s'accumule annuellement et plus de 70 % des arbres ont le collet enfoui sous moins de 10 cm de matériel.

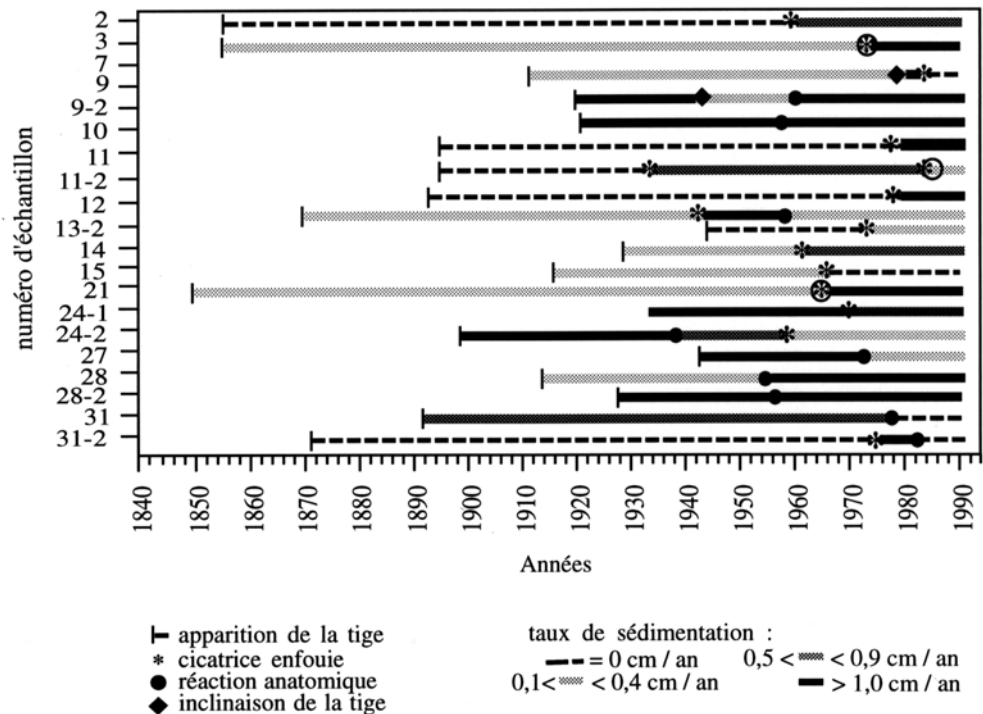
Dans le secteur D où se trouve l'îlot de vieux thuyas, il n'a pas été possible d'évaluer les taux de sédimentation, d'une part parce que le collet des arbres, trop profondément enfoui, n'a pu être dégagé et, d'autre part, parce que les tiges sont trop fortement arquées. Dans le secteur E, soit dans la partie forestière en contrebas des langues d'ébouilisation, il n'y a pas eu d'accumulation de débris depuis l'établissement des arbres échantillonnés, soit depuis une centaine d'années.

B. Variations temporelles du taux de sédimentation

Vingt arbres, dont le collet était enfoui sous plus de 10 cm de sédiments et pour lesquels les analyses dendrochronologique et anatomique ont fourni des repères chronologiques

FIGURE 7. Variations temporelles du taux de sédimentation chez 20 arbres échantillonnés qui ont permis d'identifier des repères chronologiques.

Variation in sedimentation rates through time among 20 sampled trees that allowed the identification of chronological markers.



fiables, ont été utilisés pour ces calculs (fig. 7). La position de ces arbres ainsi que les taux moyens de sédimentation sont présentés sur la figure 8. Faute de repères chronologiques suffisamment nombreux, on n'a pu obtenir de données fiables pour la période antérieure à 1850. Entre 1850 et 1899 (fig. 8B), la sédimentation semble avoir été faible partout, soit inférieure à 0,1 cm/an. Entre 1900 et 1949, le taux moyen de sédimentation atteint 0,5 cm/an (fig. 8C). Les taux les plus élevés ont été obtenus à la charnière des secteurs B et C. Jusqu'en 1974 (fig. 8D), le taux moyen reste du même ordre, mais le nombre de stations recevant une grande quantité de sédiments augmente. Après 1975 (fig. 8E), la masse de débris atteignant la forêt augmente d'une façon importante et l'accumulation touche des zones situées plus bas dans le versant. Le taux moyen d'accumulation dépasse alors 1 cm/an.

DISCUSSION

Nos données permettent de retracer les déplacements du front forestier sur le talus T-3 ainsi que l'évolution concomitante des taux de sédimentation au cours des deux derniers siècles (fig. 8). À l'instar des thuyas à tige arquée formant la frange forestière actuelle, les vieux thuyas situés à la base de la grande langue de débris constituaient probablement avant 1850 l'interface pierrier/forêt (fig. 8A). La forme très arquée du tronc de ces vieux thuyas serait attribuable à l'arrivage de matériel à la base des tiges, favorisant la propagation par marcottage. Formant une bande continue à la base des pierriers dans l'ensemble des talus à exposition ouest de la région, le thuya semble en effet une espèce très bien adaptée à ces conditions de sédimentation rapide. Sa

grande plasticité phénotypique lui permettant d'adopter un port rampant lui confère un avantage certain dans les conditions de sur-enneigement et d'instabilité du substrat qui caractérisent les bordures forestières.

Il est impossible de reconstituer le tracé de la frange forestière contemporaine de l'îlot de vieux cèdres, mais dans la mesure où tous les arbres du secteur B et la plupart des arbres du secteur C se sont implantés après 1850, il est clair que la forêt était alors beaucoup plus basse sur le versant. L'existence, au-dessus de l'îlot de vieux thuyas (secteur D), au sein du secteur C, de quelques individus dont l'établissement remonte avant 1850 (n= 5) et même avant 1800 dans deux cas (fig. 4), permet d'envisager la limite forestière présentée à la figure 8A. Comme la localisation des chenaux de CPG les plus actifs dépend de la morphologie de la paroi (couloirs), il n'est pas impossible en effet que les langues de débris soient des formes récurrentes dans ce secteur du versant.

Entre 1850 et 1950, le front forestier aurait gagné assez rapidement le haut du versant, surtout avant 1935, alors que 90 % des individus échantillonnés étaient déjà établis. La répartition des plus vieux arbres montre en effet une vague générale d'établissement, depuis l'îlot de vieux thuyas vers le pierrier (fig. 5). Dans le secteur B constituant la limite supérieure de la zone forestière continue, on n'observe d'ailleurs aucune tige morte, une indication qu'il s'agirait de la première génération d'arbres à envahir le pierrier après 1850. La position de la limite du couvert végétal continu en 1899 (fig. 8B), puis en 1940 (fig. 8C) a été déterminée en réunissant d'un trait les îlots de végétation dont la superficie actuelle est supérieure à 10 m². Les îlots devaient comporter

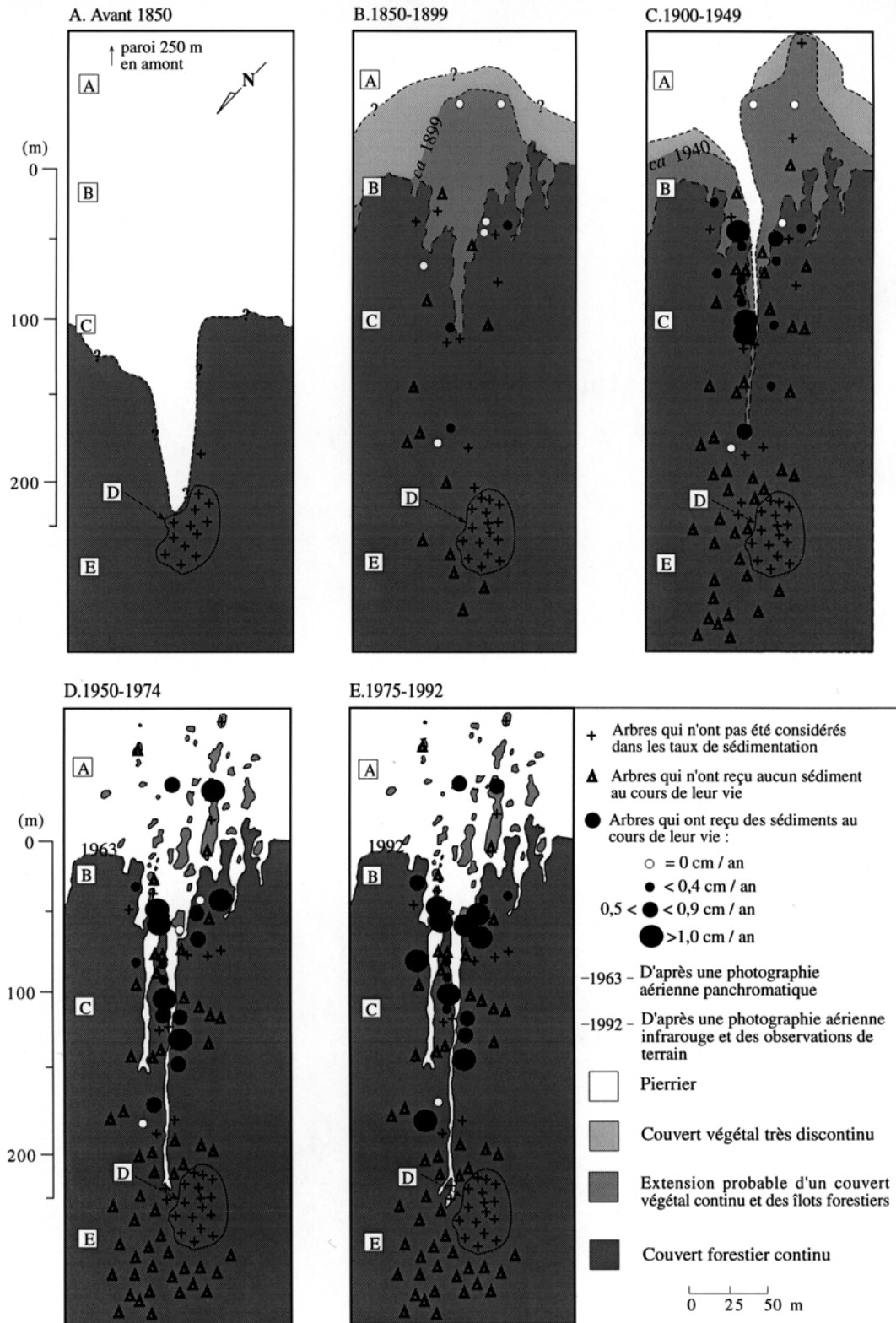


FIGURE 8. Extension du couvert végétal peu avant 1850 et de 1850 à nos jours et variations spatio-temporelles des taux de sédimentation dans le versant étudié.

Extension of the vegetation cover just before 1850 and after 1850 to the present, and spatio-temporal variation in sedimentation rates along the study slope.

au moins un arbre à tige droite ayant une taille supérieure à 3 m et dont l'année d'implantation correspond à la période retenue. Le fait que les plus vieux arbres des îlots forestiers aient une tige droite révèle qu'ils se sont implantés en milieu relativement fermé et en retrait par rapport à la frange forestière de l'époque. Vers la fin du XIX^e siècle (fig. 8B), la forêt avait probablement colonisé tout le secteur actuellement occupé par les îlots supra-forestiers (fig. 2), interprétés comme des lambeaux d'une végétation forestière jadis plus étendue. D'ailleurs plusieurs indices témoignent de conditions beaucoup plus stables sur l'ensemble du versant durant la deuxième moitié du XIX^e siècle. Les taux de sédimentation calculés pour cette période sont nuls ou très faibles (< 0,4 cm/an) dans tous les secteurs (fig. 8). Une coupe excavée au centre de la grande langue de débris à une trentaine de mètres sous la limite actuelle de la forêt (fig. 4C, coupe 2) a permis de mettre au jour un horizon organique dans lequel est enraciné un thuya implanté vers 1890. Ce lit organique fossilisé sous 1,2 m de débris témoigne de conditions stables à ce niveau du versant à la fin du XIX^e siècle. Environ 70 m plus bas, deux autres arbres établis respectivement en 1846 et en 1937 ont la base enfouie sous cette même langue de débris. Dans l'îlot de vieux thuyas, enfin, les tiges apparues après 1850 ont développé un port droit en réponse à des conditions de stabilité, contrairement aux tiges plus anciennes qui sont très arquées. D'après ces données, la grande langue de débris était probablement absente durant l'optimum forestier de la deuxième moitié du XIX^e siècle.

Déjà vers la fin du XIX^e siècle, alors même que se poursuit l'établissement de la forêt, certains signes d'instabilité se manifestent dans le versant. Entre 1885 et 1890, 28% des arbres échantillonnés ont formé du bois de réaction en réponse à l'inclinaison des tiges (fig. 6B). Pendant le XX^e siècle, l'instabilité du versant s'est accentuée comme l'indiquent les taux moyens de sédimentation qui excèdent 0,5 cm/an et même 1 cm/an par endroits, notamment dans l'axe de la grande langue de débris, qui serait (ré-)apparue avant 1950 (fig. 8C).

Entre 1925 et 1930, puis à nouveau entre 1950 et 1955, 20% des arbres échantillonnés ont formé du bois de réaction, surtout ceux situés à proximité de milieux aujourd'hui ouverts. Il est difficile de distinguer clairement les causes de l'inclinaison des tiges dans la frange forestière, dans la mesure où deux effets peuvent se conjuguer, soit l'arrivage de débris et l'enneigement excessif des franges forestières sous l'effet de la déflation. Nous pensons que ces deux facteurs interviennent simultanément, car l'élargissement du pierrier tend à accroître la partie du talus soumise à la déflation. Le poids de la neige et de la glace au moment de la fonte, vraisemblablement combiné à celui de débris entraînés au printemps au-dessus du couvert de neige, est responsable de l'arrachement de branches et de la formation subséquente de cicatrices qui sont nombreuses dans la zone de contact forêt-pierrier. De telles cicatrices d'arrachement de branches ont été rapportées par Bélanger et Filion

(1991) sur des épinettes blanches soumises à l'enfouissement par des sables dunaires et des sédiments nivéoliens.

Malgré plusieurs indices d'une intensification de l'activité géomorphologique, l'établissement de la végétation forestière s'est poursuivie jusque vers les années 1950, surtout dans les secteurs B et C (fig. 5). Plus haut dans le versant (secteur A : îlots supra-forestiers), cette phase d'établissement semble avoir pris fin un peu plus tôt, soit vers les années 1930. Étant la plus active, la partie supérieure du pierrier est en effet la plus difficile à coloniser et, de plus, la première touchée lorsque survient une nouvelle phase d'instabilité.

Une photographie aérienne datant de 1963 montre que la petite langue de débris, située juste au nord de la langue principale, est demeurée à peu près inchangée entre 1963 et 1992. La plus grande, au contraire, s'est allongée d'une vingtaine de mètres, tout en se scindant en deux dans sa partie aval (fig. 8D et E). Après 1975, le taux moyen de sédimentation s'est accru à plus de 1 cm/an. Le fait que cet accroissement ait été enregistré simultanément à plusieurs stations souvent assez distantes les unes des autres suppose une augmentation réelle du nombre de coulées. Le grand nombre de lobes d'âges différents dans le sous-bois (d'après la nature du couvert végétal) tendrait à confirmer que la fréquence des CPG a augmenté après 1975.

Toujours après 1975, on observe une augmentation du nombre de cicatrices sur les arbres échantillonnés, certaines étant attribuables à la chute gravitaire de cailloux. Une fois créées, les langues de débris forment en effet de véritables couloirs en forêt, ce qui permet aux gros blocs cubiques qui dévalent le talus en roulant d'atteindre des arbres situés très bas dans le versant, comme certains vieux thuyas croissant en contrebas de la langue principale de débris qui portent des cicatrices d'impact et des cicatrices d'abrasion. L'augmentation de la fréquence des cicatrices après 1950 (fig. 6) est un indice supplémentaire de recul et de morcèlement de la forêt.

L'absence de trace de feu dans les sols au niveau des 250 m supérieurs de la forêt laisse croire que les feux n'ont pas joué un rôle déterminant dans la recrudescence récente de l'activité dans le talus d'éboulis. Une situation très différente a été récemment décrite par Marion *et al.* (1995) dans un talus d'éboulis de la région du lac à l'Eau-Claire, dans le Québec subarctique, où une série de feux survenus au cours du dernier millénaire ont joué un rôle prépondérant dans la déstabilisation des versants. Sur le versant étudié ici, les nombreuses traces de feu observées dans le secteur E montrent que l'influence du feu est restée confinée à la partie inférieure du versant, durant le dernier siècle tout au moins. Sur un versant voisin (T-5), Héту (1990) a aussi observé de nombreuses traces d'incendie dans le bas du versant.

Les tendances générales observées dans le déplacement du front forestier dans le talus T-3 sont identiques à celles qui ont été dégagées pour le talus T-5, situé à quelque

750 m de distance, en direction nord (fig. 1) (Héту, 1990). Dans les deux cas, les données indiquent 1) que la limite supérieure de la forêt était plus basse que la limite actuelle vers le milieu du XIX^e siècle, 2) que la végétation forestière a connu une phase d'expansion jusque vers le milieu du XX^e siècle, bien que certains signes d'instabilité se soient manifestés dès la fin du XIX^e siècle et 3) que le recul de la forêt après les années 1950 s'est accompagné d'une hausse marquée du taux de sédimentation dans la frange forestière. Des observations préliminaires effectuées sur le talus T-6 vont dans le même sens (Rollin, en prép.), ce qui tend à démontrer que l'enfouissement des tiges constituant la frange forestière est un phénomène généralisé sur le versant est de la vallée de la rivière à Pierre.

La morphologie du talus, caractérisée par une multitude de chenaux bordés de levées et prolongés en forêt par des lobes de débris à texture ouverte, suggère les CPG comme processus dominant. Des CPG ont pu être observées en activité à quelques reprises sur T-3, notamment au printemps 1990, alors que les plus longues parcouraient une distance de plus de 500 m, dont une centaine de mètres en forêt, déposant au-dessus du collet des arbres une couche de débris relativement étendue dont l'épaisseur dépassait le demi mètre par endroits (Héту *et al.*, 1994). Constituées de matériel à texture ouverte organisé en chenaux bordés de levées, prolongés par des lobes terminaux à cailloux fortement imbriqués (Héту *et al.*, 1994; Van Steijn *et al.*, 1995), les dépôts laissés par les coulées de pierres glacées ne peuvent être confondus ni avec les coulées de débris (*debris flows*), toujours très riches en matrice dans ce matériel schisteux (Héту, 1995), ni avec les dépôts d'avalanches, qui ne sont jamais aussi organisés. Les chenaux de CPG sont présents partout à la surface du talus T-3, incluant les grandes langues de débris qui échancrent la forêt. L'omniprésence de ce micro-modèle d'une année à l'autre (observations sur près de 20 ans), malgré l'intervention occasionnelle d'autres processus dont les traces sont vite effacées, indique que les coulées de pierres glacées constituent, pour ce qui est du bilan morpho-sédimentaire, le processus dominant sur ces talus (Héту *et al.*, 1994). Nos données semblent indiquer une augmentation récente de la fréquence des CPG à l'échelle de la vallée et dont la signification reste à préciser.

En terminant, il convient de souligner l'intérêt méthodologique des études anatomiques dans ce type d'étude. La réponse anatomique des arbres à l'enfouissement du tronc a constitué une méthode efficace de calcul des taux de sédimentation, surtout lorsque la datation a pu être validée grâce à l'identification d'autres repères chronologiques fournis par les cicatrices ou les racines adventives. Il n'est pas facile de quantifier la dynamique d'un versant où la sédimentation relève principalement d'événements ponctuels dans le temps et dans l'espace, comme c'est le cas avec les coulées de pierres glacées (Héту *et al.*, 1994). Ce caractère discontinu de la sédimentation est bien attesté par les données stratigraphiques qui révèlent des apports récurrents de pieraille séparés par des périodes de stabilité relative souli-

gnées par les horizons organiques enfouis. Le nombre de couches de débris, très variable d'un puits à l'autre, démontre la variabilité spatiale de la sédimentation. Pour établir des bilans sédimentaires complets et précis, il faudrait pouvoir dater à l'année près chacune des couches de débris observées dans les puits, ce qui est impossible, faute de repère. En fait, les périodes circonscrites par les repères dendrochronologiques disponibles intègrent généralement plus d'une couche de débris ainsi que les couches organiques qui les séparent. Par conséquent, il n'est possible de calculer que des taux moyens de sédimentation par tranches de temps dont le découpage dépend des repères dendroécologiques. Mais dans la mesure où les méthodes utilisées sont constantes quelle que soit la période considérée, nous pensons que les taux de sédimentation calculés et les variations temporelles observées (fig. 8) sont significatives, d'autant plus que le manque de précision à l'échelle stationnelle est en partie compensé par une bonne distribution des stations dans toute la zone de sédimentation associée aux deux langues de débris.

En réalité, seuls les arbres, en l'occurrence des sapins baumiers, pour lesquels un seuil critique d'enfouissement (autour de 40 cm) a été franchi, ont montré un accroissement de la taille des cavités cellulaires, comme si le bois de telles tiges enfouies prenait les caractéristiques anatomiques du bois de racine (Morrison, 1953). Cournoyer et Filion (1994) ont obtenu des résultats similaires pour l'épinette blanche croissant dans un milieu soumis à la sédimentation éolienne. Les changements anatomiques en réponse à l'enfouissement sont donc plus spontanés que les changements dans la croissance radiale (Marin et Filion, 1992; Cournoyer et Filion, 1994) et ils fournissent des repères chronologiques plus fiables.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Marie-Pierre Ouellon et Dany Lavoie pour leur aide sur le terrain, ainsi que Luc Cournoyer, du Laboratoire de dendrochronologie du Centre d'études nordiques, pour son aide précieuse en laboratoire. Les commentaires de B. Francou et B. Luckman ont été fort appréciés. Cette recherche a été effectuée grâce au soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et génie (CRSNG) et du Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) du ministère de l'Éducation du Québec.

RÉFÉRENCES

- Bélangier, S. et Filion, L., 1991. Niveo-aolian sand deposition in sub-arctic dunes, eastern coast of Hudson Bay, Québec. *Journal of Quaternary Sciences*, 6: 27-37.
- Bertran, P., Francou, B. et Pech, P., 1993. Stratogénèse associée à la dynamique des coulées à front pierreux en milieu alpin, La Mortice, Alpes méridionales, France. *Géographie physique et Quaternaire*, 47: 93-100.
- Brunt, J.W. et Conley, W., 1989. Behavior of a multivariate algorithm for ecological edge detection, p. 179-203. *In Ecological Modelling*, Elsevier, 49, Amsterdam.

- Commission canadienne de pédologie, 1987. Le système canadien de classification des sols. Agriculture Canada, publication 1646, 170 p.
- Cournoyer, L., 1991. Étude des modifications anatomiques de l'épinette blanche (*Picea glauca* Moench (Voss)) croissant en milieu dunaire subarctique. Thèse M. Sc., Université Laval, 66 p.
- Cournoyer, L. et Filion, L., 1994. Variation in wood anatomy of white spruce in response to dune activity. *Arctic and Alpine Research*, 26: 412-417.
- Francou, B. et Héту, B., 1989. Éboulis et autres formations de pentes hétérométriques. Contribution à une terminologie géomorphologique. Notes et comptes rendus du groupe de travail " Régionalisation du périglaciaire ", Fasc. XIV :11-69.
- Héту, B., 1987. L'influence du contexte géomorphologique quaternaire sur la dynamique postglaciaire des versants raides de la Gaspésie septentrionale (Québec, Canada). Thèse Ph.D., Département de géographie, Université de Montréal, 568 p.
- _____ 1990. Évolution récente d'un talus d'éboulis en milieu forestier, Gaspésie, Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 44: 199-215.
- _____ 1995. Le litage des éboulis stratifiés cryonivaux en Gaspésie (Québec, Canada) : rôle de la sédimentation nivéo-éolienne et des transits supranivaux. *Permafrost and Periglacial Processes*, 6 : 147-171.
- Héту, B. et Vandelac, P., 1989. La dynamique des éboulis schisteux au cours de l'hiver, Gaspésie septentrionale, Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, 43: 389-406.
- Héту, B., Van Steijn, H. et Vandelac, P., 1994. Les coulées de pierres glacées: un nouveau type de coulées de pierraille sur les talus d'éboulis. *Géographie physique et Quaternaire*, 48: 3-22.
- Johnston, C. A., Pastor, J. et Pinay, G., 1992. Quantitative methods for studying landscape boundaries, p. 107-125. In A. J. Hansen et F. di Castri, édit., *Landscape Boundaries*. 92.
- Krumbein, W. C., 1941. Measurements and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 11(2): 64-72.
- Luckman, B. H., 1978. Geomorphic work of snow avalanches in the Canadian Rocky Mountains. *Arctic and Alpine Research*, 10: 261-276.
- _____ 1988. Debris accumulation patterns on talus slopes in Surprise Valley, Alberta, *Géographie physique et Quaternaire*, 42: 247-278.
- Marin, P. et Filion, L., 1992: Recent dynamics of subarctic dunes as determined by the tree-ring analysis of white spruce, Hudson Bay (Québec). *Quaternary Research*, 38: 316-330.
- Marion, J., Filion, L. et Héту, B., 1995. The Holocene development of a debris slope in subarctic Québec, Canada. *The Holocene*, 5: 409-419.
- Morrison, T. M., 1953. Comparative histology of secondary xylem in buried and exposed roots of dycotyledonous trees. *Phytomorphology*, 3: 427-430.
- Shroder, J. F., 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement, Table Cliff Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9: 168-185.
- Strunk, H., 1989. Dendrogeomorphology of debris flows. *Dendrochronologia*, 7: 13-23.
- _____ 1992. Frequency distribution of debris flows in the Alps since the "Little Ice Age2. *Zeitschrift für Geomorphologie*, suppl. 83_ 71-81.
- Trenhaile, A. S. et Rudakas, P. A., 1981. Freeze-thaw and shore-platform development in Gaspé, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 35: 171-181.
- Van Steijn, H., Bertran, P., Francou, B., Héту, B. et Texier, J.-P., 1995. Models for the genetic and environmental interpretation of stratified slope deposits. *Permafrost and Periglacial Processes*, 6: 125-146.
- Van Steijn, H., Van Brederode, L. et Goedheer, G. J., 1984. Stratified slope deposit of the grèzes-litées type in the Ardèche region in the south of France. *Geografiska Annaler*, 66A: 295-305.