

Zeitschrift:	Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Herausgeber:	Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Band:	98 (1975)
Artikel:	Etudes archéologiques et botaniques sur les pilotis de la palissade de la station Nord d'Auvernier (lac de Neuchâtel)
Autor:	Arnold, Béat / Schweingruber, Fritz H.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-89079

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

ÉTUDES ARCHÉOLOGIQUES ET BOTANIQUES SUR LES PILOTIS DE LA PALISSADE DE LA STATION NORD D'AUVERNIER (LAC DE NEUCHATEL)

par

BÉAT ARNOLD et FRITZ H. SCHWEINGRUBER

(Traduction : R. Amiet / O. Lenz)

AVEC 8 FIGURES ET 6 PLANCHES

1. *Introduction*

A l'occasion de fouilles entreprises dans la baie d'Auvernier (lac de Neuchâtel), des pilotis ont fait l'objet d'études archéologiques et botaniques, dans le but d'obtenir des informations sur la structure des établissements humains et la paléoécologie. Bien que certains problèmes n'aient été que partiellement ou succinctement traités, nous sommes convaincus de l'utilité d'une exploitation globale des données archéologiques et botaniques combinées. Cette façon d'agir fournit plus d'éléments de base à la reconstitution d'établissements de l'âge du bronze que le traitement approfondi d'un problème partiel. Ni la chimie des troncs subfossiles, ni la technique de façonnement d'alors, n'ont été prises en considération. La comparaison des pilotis de palissade et des pilotis d'habitation sur des bases botaniques-archéologiques ne sera effectuée qu'une fois les fouilles terminées.

La « station Nord » d'Auvernier (canton de Neuchâtel), datant du Bronze final (Hallstatt B 2 d'après Müller-Karpe, environ 800 av. J.-C.), fut découverte en 1854. Les sondages réalisés en 1923, 1969 et 1970 n'apportèrent que peu d'informations. Il fallut attendre l'hiver 1970-1971 pour que, lors d'un vol, l'image de ce village se dégageât au travers des eaux d'une transparence exceptionnelle. Au large d'une zone de pilotis et de poutres, couchées sur le sol, une palissade (partie C) délimitait le village côté lac (EGLOFF 1972).

Une nouvelle campagne de sondages (1971) révéla les exceptionnelles richesses de cette station promise à une destruction totale par le passage de la nouvelle route nationale 5. Une fouille subaquatique de grande envergure fut alors décidée, et le sauvetage débuta durant l'hiver 1971-

1972¹ (pl. VII). En 1974, dans le cadre de la construction du nouveau port d'Auvernier engendré par le passage de l'autoroute, une large digue entoura le reste non encore remblayé du village, soit quelque 3000 m².

Les résultats présentés ci-dessous ont tous été obtenus durant la dernière campagne de plongées. Les fragments de palissades qui seront fouillés à l'air libre dans le caisson asséché présenteront peut-être une physionomie légèrement différente par la découverte de quelques pilotis supplémentaires, mais ces variations seront de faible importance.

2. *Les palissades extérieures de la station Nord et la contribution botanique à leur étude*

La palissade peut être subdivisée en trois éléments : une partie A, à l'ouest ; une partie B, prolongement de la partie A à l'intérieur de l'aire délimitée par l'ensemble des palissades ; enfin, à l'est, une partie C (pl. VIII).

La partie A peut éventuellement être rattachée à une autre station voisine (Brena), légèrement antérieure. On ne possède que peu de renseignements concernant ses pilotis.

Sur le plan représentant l'ensemble des pilotis (fig. 1) et sous l'eau, les parties A et B semblent provenir d'une seule et même palissade dont les pilotis émergent peu du sol, alors qu'ils pointent parfois à plus de 30 cm dans le fragment C.

Si la partie C correspond à la palissade observée par avion, les parties A et B ont été découvertes en plongée lors des fouilles subaquatiques de 1972. Ces deux fragments A et B mettent ainsi en évidence une zone jusqu'alors jamais fouillée ou étudiée. Cette zone représentera d'ailleurs la plus grande partie de la surface qui sera fouillée en 1974-1975 dans le caisson asséché. Topographiées en plongée, les palissades ne furent dégagées que sur une largeur de 2 m, un décapage de plus grande importance s'avérant incompatible avec les délais accordés à cette fouille de sauvetage. Chaque pilotis de la palissade étant ainsi numéroté et reporté sur un plan, les plongeurs en prélevèrent quelques cm² afin d'en faire déterminer l'essence.

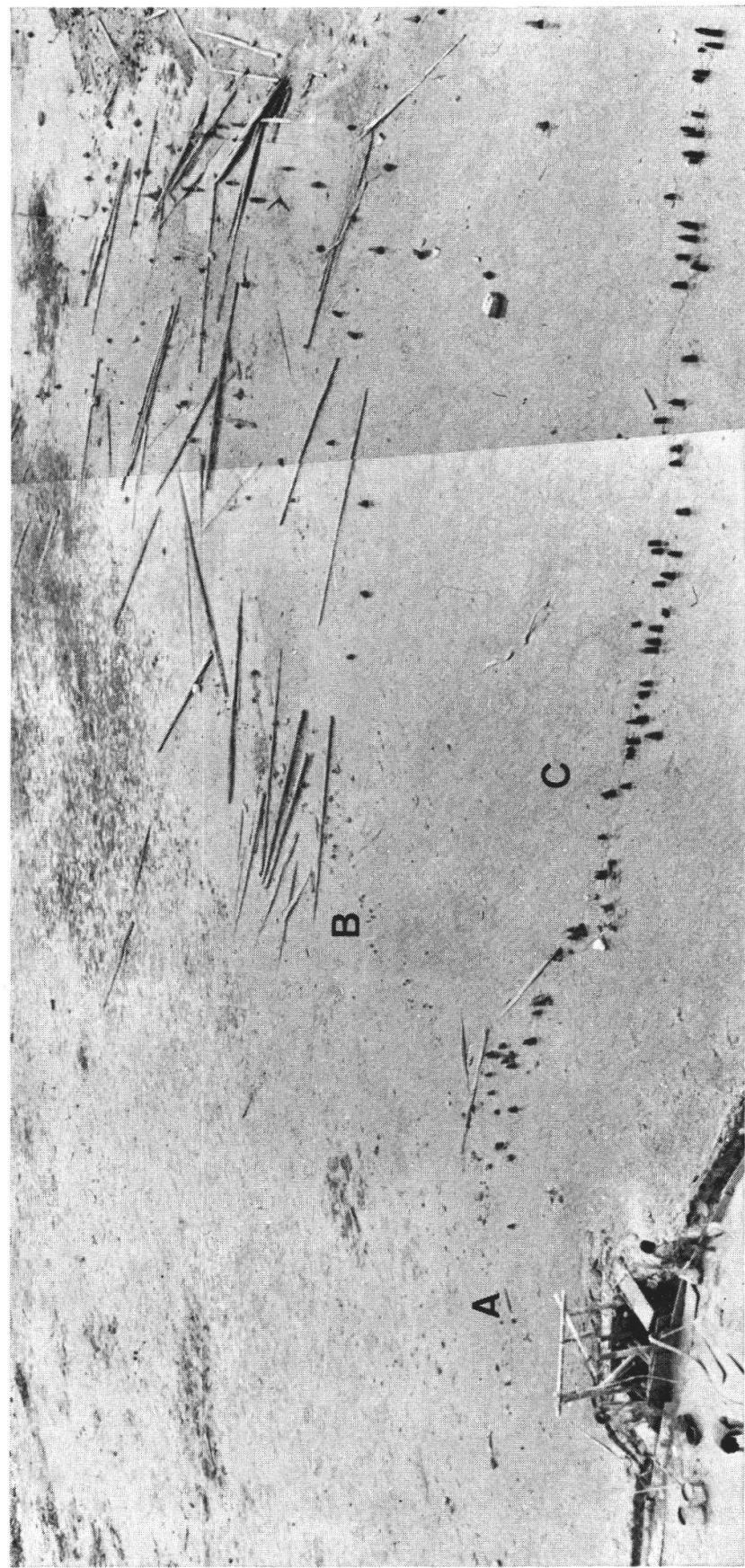
La palissade C, longue de plus de cent mètres, a arbitrairement été subdivisée en éléments long de 10 m à partir du point de convergence des trois parties de palissade (C 0-10, C 10-20, C 20-30, etc.). La partie A est subdivisée en deux éléments : A 1 long de 11 m, en contact avec B et C, et A 2 long de 14 m, représentant le reste topographié de cette palissade. Le tronçon B, long de 17 m, est très uniforme et ne nécessite aucune subdivision.

Très nettement différenciées de C (fig. 2), les parties A et B sont composées de chêne (*Quercus sp.*) à 62% pour A 1, 74% pour A 2 et

¹ Les fouilles d'Auvernier sont réalisées par le Service cantonal d'archéologie de Neuchâtel (archéologue cantonal : Michel Egloff). Ce service est rattaché au département des Travaux publics, que dirige M. Carlos Grosjean, conseiller d'Etat. La commission spéciale d'archéologie pour la construction de la RN 5 est présidée par le professeur M.-R. Sauter. Le financement des recherches est assuré par le budget de construction de la RN 5.



La palissade sous 2 mètres d'eau (partie C, décembre 1971).



Dans le caisson récemment asséché (août 1974), on distingue les trois palissades : A et B en chêne, C en sapin.

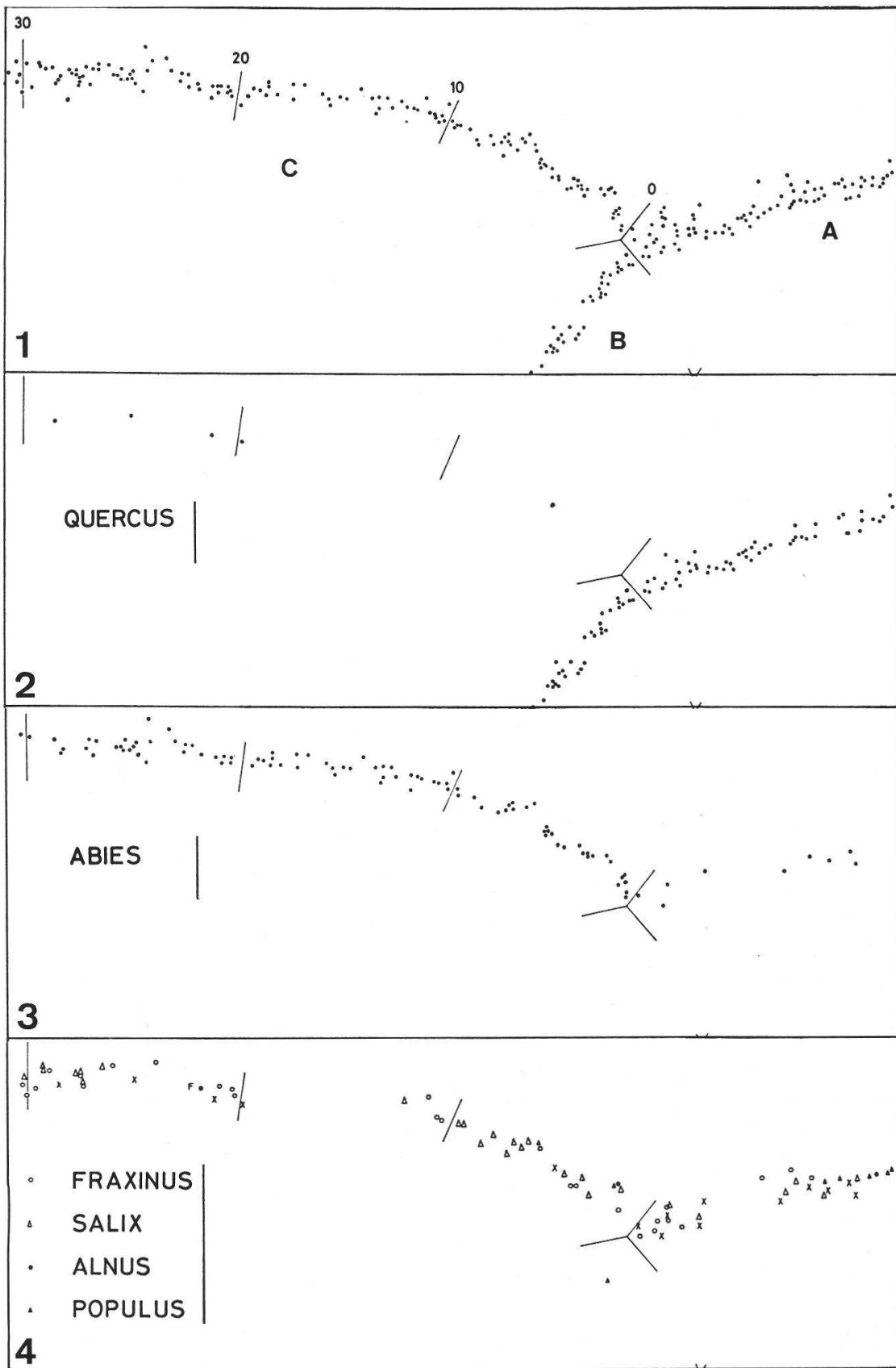


Fig. 1. Vue partielle des trois palissades de la station Nord (1) et répartition des chênes (2), des sapins blancs (3) et des diverses autres essences utilisées (4).

→ 10 PILOTIS / 10 METRES

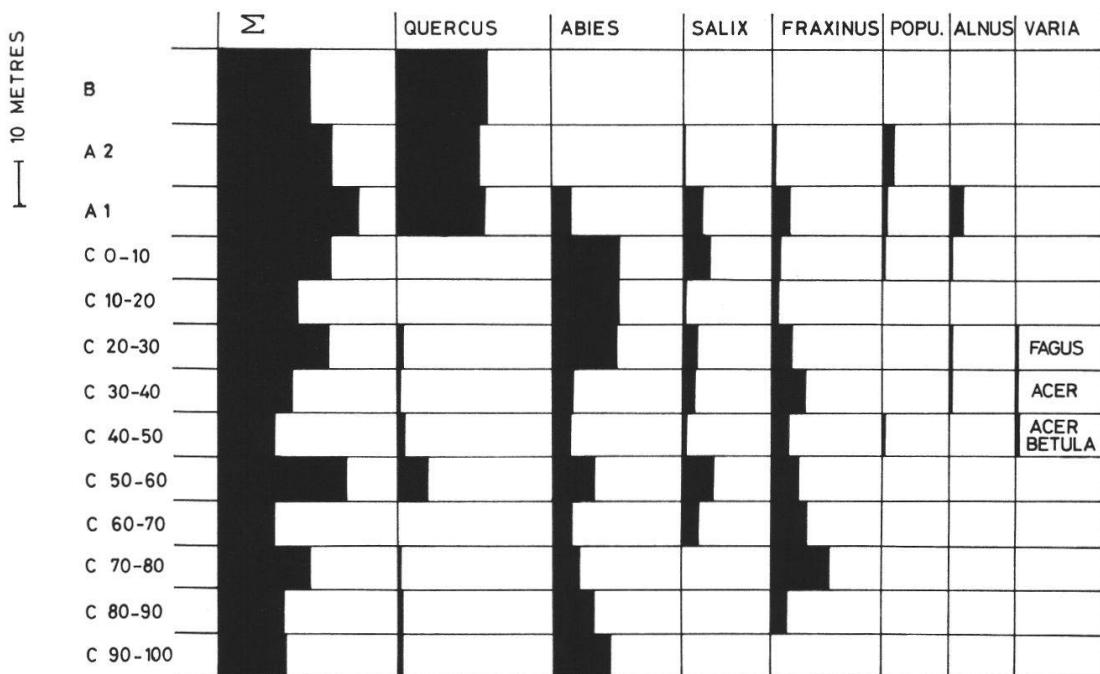


Fig. 2. Répartition et densité des pilotis dans les diverses palissades.

100% pour B, et elles ont la même densité de 40 ± 2 chênes pour 10 m de palissade. Cette unité de structure ne se rencontre pas aussi fortement marquée sur le fragment C. Son essence dominante est le sapin blanc (*Abies alba*), entre 9 et 31 pilotis par 10 m de palissade. Accessoirement, cette palissade C est encore composée de frêne (*Fraxinus excelsior*, jusqu'à 26/10 m) et de saule (*Salix* sp. jusqu'à 13/10 m). Présents sous forme de traces (maximum 1 à 2 par 10 m), on peut citer le peuplier (*Populus* sp.), l'aune (*Alnus* sp.), le hêtre (*Fagus silvatica*), l'érable (*Acer* sp.) et le bouleau (*Betula* sp.). Le chêne est aussi présent (1 à 4/10 m) mais il ne prend une certaine importance (14/10 m) que dans l'élément C 50/60.

Or, dans les valeurs énumérées ci-dessus pour le fragment C, on peut aussi inclure l'élément A 1. En effet, si l'on exclut les chênes, ce fragment avec ses sapins (9,1/10 m), frênes (8,2/10 m), saules (5,5/10 m) et peupliers (1,8/10 m) s'inscrit parfaitement quant à son échantillonnage et ses proportions dans le cadre de la palissade C, mais avec une faible densité de pilotis. Parallèlement, si on y inclut les chênes, le fragment A 1 atteint une densité maximale de pilotis (58/10 m). Nous voyons ainsi que la palissade C est venue doubler puis renforcer en A 1 l'ancienne palissade encore existante.

Après s'être poursuivie sur une centaine de mètres avec une densité toujours supérieure à 25 pilotis par 10 m, la palissade C voit sa densité s'abaisser pour progressivement s'estomper dans le terrain. Les densités obtenues pour les derniers mètres sont de 17 (C 100-110), 10 (C 110-120) et 12 pilotis pour 10 m (C 120-130).

En conclusion, la détermination de ces pilotis nous permet de dire que nous sommes en présence de deux palissades bien distinctes : l'une, la plus ancienne, en chêne (partie A-B), sur laquelle vient s'appuyer en la renforçant sur une dizaine de mètres l'autre fragment (C), plus récent, composé essentiellement de sapins, de frênes et de saules.

3. Provenance des pieux

Où les pilotis ont-ils été récoltés, dans quelle région, sur quelle station et selon quels critères ont-ils été choisis par l'homme de l'âge du bronze ?

On ne peut pas se prononcer sur les pilotis de chêne car les deux espèces répandues dans la région sont anatomiquement indifférenciables. Le chêne rouvre (*Quercus petraea*) croît sur les pentes plutôt sèches, et le chêne pédonculé (*Quercus robur*) se rencontre sur les stations plutôt humides, au bas des pentes et au bord des rivières.

La présence dans la palissade de pilotis de frêne et de sapin est à tel point particulière, voire insolite, qu'on peut se demander si l'homme d'alors ne choisissait pas les troncs dans une ou plusieurs stations selon des règles strictes. Aujourd'hui, le frêne et le sapin se rencontrent ensemble le plus souvent dans la frênaie à érable de l'étage montagnard. Les premiers résultats de l'étude des profils de sédimentation et des fouilles d'Auvernier La Saunerie montrent que le sapin était à l'époque beaucoup plus répandu dans la région que maintenant.

Afin d'apporter quelque éclaircissement sur la provenance des arbres, on a calculé la largeur moyenne des cernes (rayon en mm : nombre de cernes) et on a ordonné les troncs par classe de largeur de cernes. C'est ce qu'illustre la figure 3.

La répartition des âges, tout comme les largeurs des cernes, ne sont pas homogènes dans le matériel.

Chez le frêne, la plupart des exemplaires présentent un accroissement annuel moyen de 0,5 à 1,6 mm (env. 75 % de toutes les pièces), alors que chez le chêne et le sapin la répartition est plus régulière.

Sur la base de ces constatations, nous pouvons dire que le frêne provient de groupements végétaux de stations en pente relativement sèches. Seuls certains exemplaires peuvent avoir crû dans la frênaie à érable du pied des côtes ou du fond des ravins. Il doit s'agir en grande partie de frênes calciphiles situés en marge des peuplements aujourd'hui exploités. Les cernes du chêne et du sapin n'ont par contre donné lieu à aucune observation de ce genre.

Etant donné l'uniformité relative du diamètre et de la rectitude des pilotis, il est permis de supposer que les troncs destinés à la construction de palissades furent choisis dans des peuplements hétérogènes quant aux essences, aux âges, aux hauteurs d'arbres et au nombre de tiges. Ce mode d'exploitation par assortiment était encore pratiqué il y a 150 ans dans la région qui nous concerne.

Bien que l'aptitude des différentes essences forestières à la construction d'ouvrages subaquatiques ait été vraisemblablement connue —

dans les établissements du néolithique, le bois de chêne était généralement utilisé — il n'en a pas été tenu compte dans le cas qui nous occupe. Le bois de frêne perd sa solidité après peu d'années, tandis que le bois de sapin et, sous certaines conditions, celui de chêne, gardent après plusieurs millénaires une résistance mécanique élevée.

La connaissance de la largeur des cernes doit nous aider à élucider le problème de la provenance des troncs utilisés. Ceux-ci peuvent avoir été abattus soit dans des peuplements relativement uniformes en ce qui concerne les diamètres — ces peuplements sont répartis par petites surfaces dans la forêt naturelle — soit dans des boisés du type jardiné. Une comparaison des résultats avec les tables de production actuelles apporte des éclaircissements sur la question. Nous remercions M. Walter Keller pour les données forestières ci-après.

La comparaison ne peut être faite sans réserve, les courbes (fig. 4 et 5) étant établies sur la base de peuplements réguliers, éclaircis par le haut où les diamètres sont mesurés à 1,30 m du sol.

On tentera tout de même une telle confrontation pour les raisons suivantes :

- a) dans les peuplements non éclaircis, le diamètre moyen s'accroît aussi avec l'âge ;
- b) une tendance à l'accroissement existe également chez chaque arbre ;
- c) les segments de troncs, à en juger d'après la faible quantité de branches sur les pilotis, ne sont pas pris dans le houppier des arbres ;
- d) pour des raisons de commodité de transport, il est très improbable que les troncs aient été récoltés dans des endroits très éloignés. Les billes de frêne et de sapin proviennent plutôt de stations relativement uniformes (sapin, classe de fertilité 18-25, stations au pied des pentes).

La comparaison donne pour le sapin blanc les résultats suivants.

(Calcul : mesurage de la largeur des cernes par tranches de 10 sur échantillons avec duramen.)

Calcul du diamètre moyen des troncs de classes d'âge déterminés :

$$\frac{\sqrt{\varepsilon r^2}}{n} \cdot 2$$

Ceci montre que les peuplements n'étaient pas exploités en coupe rase, mais que des troncs de diamètres définis étaient sélectionnés. Des jeunes peuplements, on extrayait les arbres les plus gros, tandis que dans les peuplements plus âgés, on choisissait les tiges les plus minces.

Si on considère la classe de fertilité 22 comme la moyenne de toutes les stations (*Milio-Fagetum*, *Abieti-Fagetum*, *Fagetum typicum*) de la région, le diamètre moyen à l'âge de 30 ans est alors de 11,9 cm, les diamètres variant entre 0 et 24 cm. A 80 ans, le diamètre moyen est de 37,9 cm, variant entre 16 et 56 cm. Ceci dit, il est évident que les peup-

ments hétérogènes au point de vue de l'âge offraient un choix suffisant de billes comme le montre le matériel subfossile.

Les mêmes constatations peuvent être faites au sujet du matériel de frêne comme l'indique la figure 5.

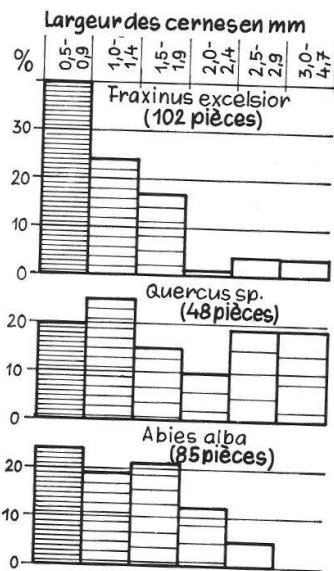


Fig. 3. Répartition des classes de largeurs du cerne chez diverses essences

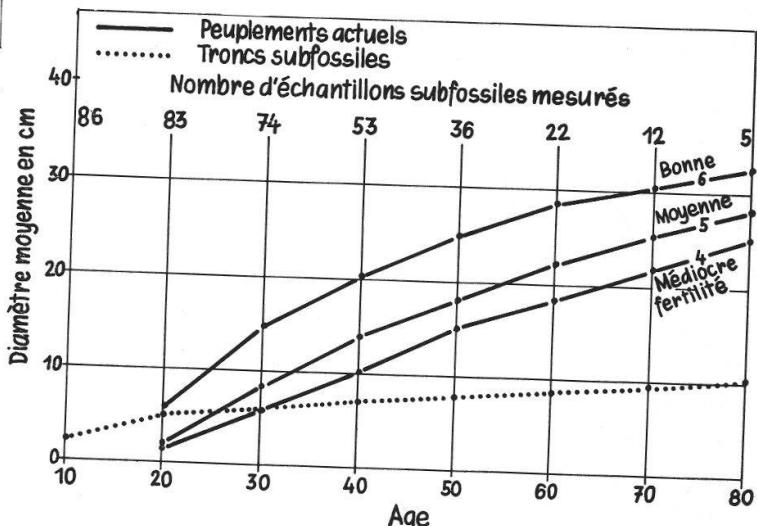
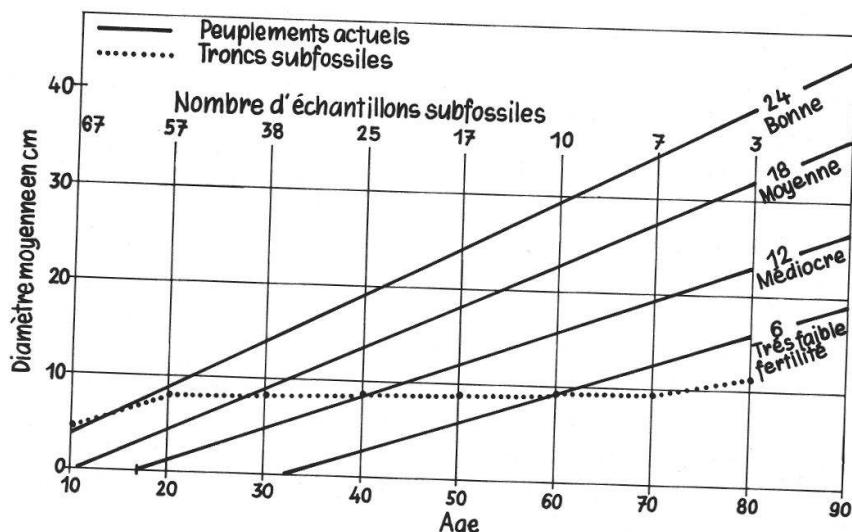


Fig. 5. Comme pour la figure 4, mais pour le frêne (*Fraxinus excelsior*). Adapté des Tables de production de WIEDEMANN (1957).



Classes de fertilités: Hauteur moyenne des plus forts arbres d'un peuplement homogène à l'âge de 50 ans, soit 6, 12, 18, 24 m.

Fig. 4. Diamètre des pilotis de sapin (*Abies alba*), comparé au diamètre moyen de peuplements récents de différentes classes de fertilité en fonction de l'âge. Adapté des Tables de production du sapin en Suisse de l'Institut fédéral de recherches forestières (1966).

4. Résistance mécanique des pilotis et fouille subaquatique

Enfoncés dans 3 mètres de sédiments lacustre (craie), les pilotis de la station Nord en ont été extraits à l'aide d'un radeau d'une poussée de 1,2 tonne. Cette poussée, considérable, s'est néanmoins révélée être un peu faible pour les pilotis situés à l'intérieur du village alors qu'elle était suffisante pour les pilotis de la palissade, de taille moindre.

Les résultats obtenus l'ont été en fonction des essences et de leur structure cellulaire actuelle. En effet, les pilotis en sapin se sont conservés d'une manière si remarquable qu'ils sont actuellement réutilisables. Ils ont pu être intégralement extraits du sol, sans grand problème, les cassures étant relativement rares.

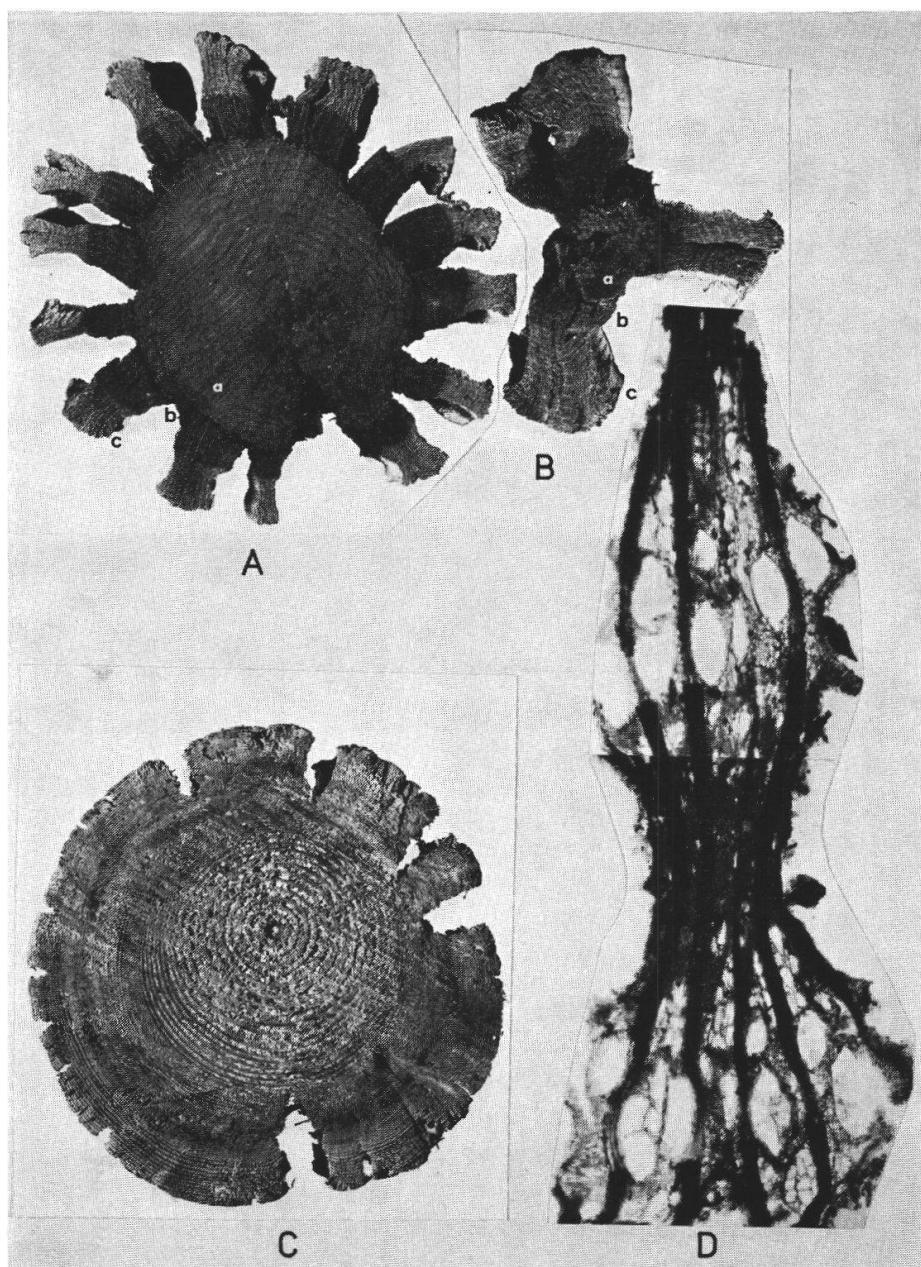
Les pilotis en chêne, de structure cellulaire plus dégradée, se cassent par contre fréquemment, mais un échantillonnage assez complet a quand même pu être obtenu sans cassure. Le fait qu'il s'agit souvent de pilotis fendus ou refendus, donc de forme semi-circulaire ou triangulaire, augmente encore ce phénomène de rupture par l'asymétrie des résistances mécaniques dans les pilotis. De surcroît, nombreux sont les pilotis qui présentent des fentes transversales tous les 30 à 40 cm. Ces dernières, d'origine inconnue, augmentent encore fortement les probabilités de cassure.

Le troisième type de pilotis est composé de bois mous, saule et frêne surtout. Toute tentative de levage avec le radeau s'est toujours soldée par un échec, les cellules du bois étant totalement dégradées. Les prélever en plongée avec une petite scie était l'affaire d'une à deux minutes, et il s'est avéré impossible d'en étudier un dans sa totalité et de le comparer avec ceux en sapin ou en chêne.

Nous pouvons donc dire qu'une étude sommaire de la structure cellulaire de quelques pilotis est suffisante pour indiquer s'il est possible de les extraire avec quelque succès du sol. L'engin de levage mis en œuvre devra exercer une traction d'au moins 1,5 à 2 tonnes pour des pilotis de cette taille. Les résultats obtenus avec du sapin ($65-185 \text{ kg/cm}^2$) sont excellents, moyens avec du chêne ($75-110 \text{ kg/cm}^2$) et nuls avec du frêne et du saule ($10-18 \text{ kg/cm}^2$).

5. L'état de conservation des troncs subfossiles du point de vue technologique

Nombreux sont les auteurs qui, au cours des derniers 30 ans, ont entrepris des études biologiques, chimiques et physiomécaniques. De nombreux phénomènes isolés ont été traités, mais il faut bien reconnaître que des lacunes subsistent. On ignore en effet les relations qui existent entre la qualité des bois subfossiles, le type de sédimentation (qualité des sédiments : conditions aérobies ou anaérobies ; cours d'eau eutrophes, oligotrophes, dystrophes ; secs, condition d'humidité variable ou constante ; marais, rives lacustres ; stabilité des sédiments) et l'essence forestière (résineux, feuillus ; aubier, duramen, dimension des bois ; chimisme ; anatomie ; propriétés physio-mécaniques).

**A et B. —**

Troncs subfossiles de chêne à l'état sec, de 13 et 10 cm de diamètre. Le centre des troncs est constitué par un noyau de duramen dur, peu décomposé et faiblement rétréci. a) (rétractibilité env. 10%), entouré d'un manchon tendre de duramen désagrégé, fortement rétréci ; b) (rétractibilité env. 60%). L'aubier c) est le plus décomposé et le plus fortement rétréci (env. 75%).

C. —

Tronc subfossile de sapin à l'état sec de 14 cm de diamètre. En général, le bois de conifères se rétrécit peu. Seule une couche périphérique le plus souvent mince, est fortement désagrégée et rétrécie.

D. —

Eclat d'orme à l'état sec ; coupe transversale, 12,5 : 1. La rétractibilité n'est pas uniforme. Les vaisseaux du bois de printemps se rétrécissent tangentiellellement d'environ un tiers, les fibres ligneuses et les vaisseaux de bois d'été de plus des trois quarts.

L'exposé qui suit n'apporte qu'une modeste contribution à l'étude de l'ensemble des problèmes.

Les trois essences forestières sont macroscopiquement nettement différenciables. Le bois de frêne est fortement ramolli, celui de sapin par contre ne présente qu'un manchon externe tendre, recouvrant le bois resté dur. Chez le chêne, on remarque la présence de trois parties distinctes (pl. IX, A-C). L'aubier, de couleur claire, ainsi que les couches externes du duramen sont tendres, alors que la partie interne est dure. L'épaisseur de ces zones varie et semble dépendre du diamètre des troncs (pl. IX, A et B).

Nous avons testé 18 échantillons de 3 pilotis de frêne, 13 échantillons de 2 pilotis de chêne et 12 échantillons de 2 pilotis de sapin, afin d'en déterminer la densité, la teneur en eau et la résistance à la compression axiale. Ces valeurs sont alors comparées à celles obtenues sur des échantillons prélevés sur du matériel récent. Les trois sortes de bois ont été choisies en fonction du genre de décomposition ; le frêne représente le cas extrême de ramollissement, alors que chez le chêne et le sapin le processus de décomposition comprend deux zones distinctes.

Des éprouvettes standardisées de $2 \times 2 \times 4$ cm d'arête, prélevées sur les échantillons saturés d'eau, furent pesées (poids frais), puis on détermina leur résistance à la compression axiale. Après séchage à 105° C durant 24 heures, elles furent à nouveau pesées (poids anhydre), et leur infra-densité (poids anhydre : volume saturé) fut calculée. L'essai de résistance à la compression axiale sur des éprouvettes conditionnées à 12 %, tel qu'il est d'usage de le pratiquer, n'a pas pu avoir lieu en raison de l'éclatement du bois au séchage, qui affecte spécialement les zones périphériques. Il est, dans ce cas, exclu d'obtenir des éprouvettes intactes dans les dimensions requises. Ces résultats (fig. 6 et 7) sont alors mis en parallèle avec les valeurs correspondantes trouvées sur du matériel récent dont la teneur en eau est supérieure à la limite de saturation des fibres.

La figure 6 montre dans quelles mesures les caractéristiques peuvent varier. Les figures 7 et 8 illustrent les rapports existant entre la densité (plus exactement l'infra-densité), la teneur en eau et la résistance à la compression axiale des bois subfossiles. Etant donné la spécificité des caractéristiques que reflètent nos résultats, les données concernant l'infra-densité, la teneur en eau et la résistance à la compression axiale seront traitées séparément.

5.1. Densité (fig. 6 et 7)

En principe, l'infra-densité augmente de la périphérie vers le centre du tronc. L'augmentation est faible dans les troncs de petits diamètres (> 10 cm), tandis qu'elle est plus grande dans les troncs plus épais. Tous les échantillons subfossiles sont nettement plus légers que les échantillons de bois récent.

Les espèces montrent les particularités suivantes :

Frêne : le bois subfossile est généralement très léger. Il n'existe pas de différence notable entre l'aubier et le duramen ;

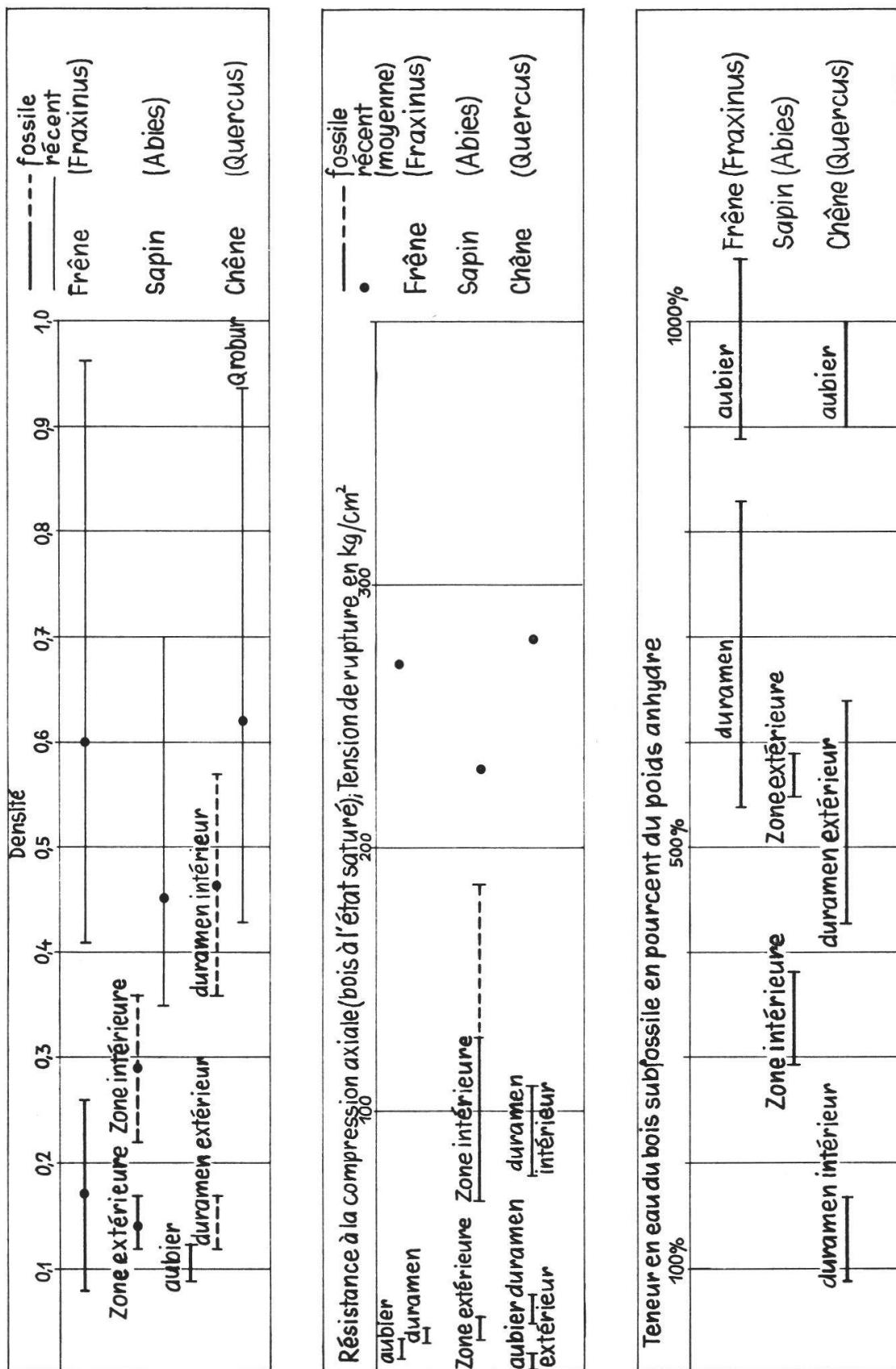


Fig. 6. Amplitude des variations des propriétés physico-mécaniques des bois subfossiles comparées à celles des bois récents, d'après KNUCHEL (1954) et LFEM (1955).

Sapin : dans la zone périphérique des pilotis le bois est très léger, dans la zone interne il est à peine plus léger que le bois récent ;

Chêne : les trois zones se distinguent nettement : l'aubier est très léger, la zone extérieure tendre du duramen est un peu plus pesante, alors que sa partie centrale est généralement un peu plus légère que dans le bois récent.

5.2. *Teneur en eau en pourcent du poids anhydre (fig. 6 et 7)*

En principe la teneur en eau augmente avec la diminution de densité. Elle est extrêmement élevée dans l'aubier du frêne (900 à 1000%). Très humides sont aussi le duramen du frêne et l'aubier du chêne. La zone extérieure du bois parfait du sapin et du chêne possède une teneur en eau un peu plus faible. La partie centrale des troncs du sapin et du chêne montrent la plus faible humidité.

5.3. *Résistance à la compression (fig. 6 et 8)*

C'est avec l'essai de compression axiale qu'on peut le mieux mesurer le degré de conservation du bois. Les valeurs de résistance sont bien en dessous de celles des bois récents. En examinant la figure 8, on voit que l'allure des courbes de résistance du bois dans le tronc est pratiquement réciproque à celle de la teneur en eau. Les espèces se comportent comme suit :

Frêne : son bois montre une uniforme et très basse résistance à la compression. Dans le duramen les valeurs sont à peine plus élevées que dans l'aubier. Les substances de duraminisation retardent à peine le processus de décomposition.

Sapin : à part une zone périphérique étroite et tendre, la résistance à la compression est relativement élevée sur le reste de la section. Mais elle n'atteint toutefois que la moitié des valeurs du bois récent.

Chêne : dans la zone périphérique de l'aubier la résistance à la compression est très faible et dans la zone extérieure du duramen elle est un peu plus élevée. Après un brusque changement, la résistance à la compression augmente progressivement et lentement vers le centre, mais elle reste cependant bien en dessous des valeurs pour les bois récents.

A plusieurs reprises, les propriétés mécaniques des bois fossiles ont été testées par les chercheurs. Parmi ces derniers, nous retiendrons surtout BEDNAR et FENGEL (1974), DZBENSKI (1970), KOMMERT et WIENHAUS (1970). Du moment que les investigations ont surtout porté sur des échantillons peu désagrégés de duramen de chêne à l'état sec à l'air et anhydre, il n'est pas possible de comparer directement leurs résultats aux nôtres. Un ajustement des valeurs n'a même pas été tenté puisqu'on voulait donner une image des propriétés mécaniques des bois

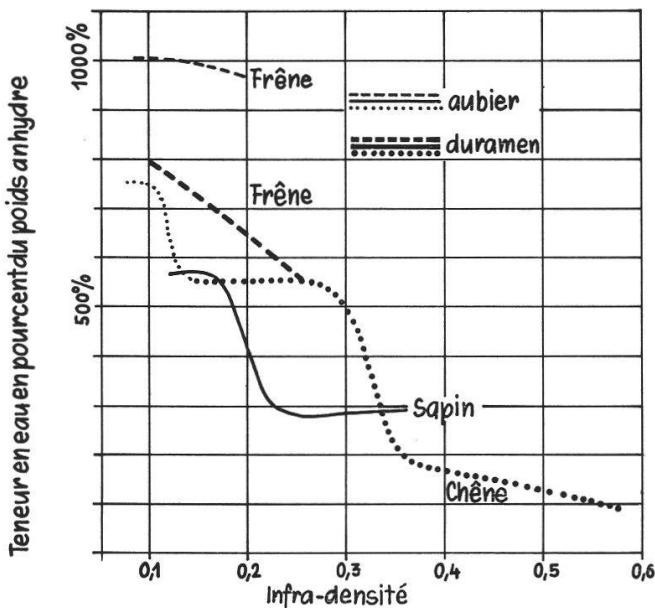


Fig. 7. Teneur en eau des bois subfossiles en fonction du poids anhydre.

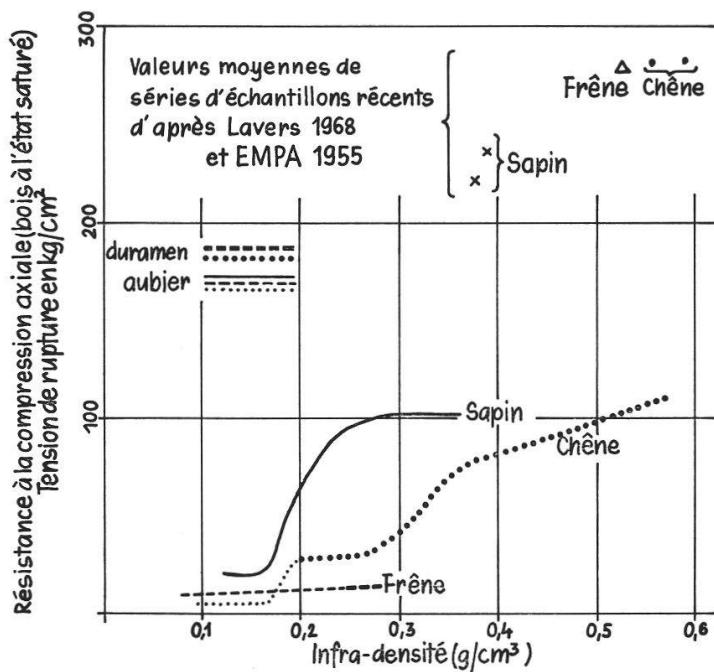


Fig. 8. Résistance à la compression axiale en fonction de la densité.

dans l'état où ils ont été trouvés au fond du lac. Les valeurs de résistance à la compression axiale indiquées par plusieurs auteurs pour des bois trouvés dans le sol se rapprochent de celles des bois récents ou leur sont supérieures. Cela s'explique par le fait que la part des parois cellulaires y est relativement plus élevée que dans les bois récents. En effet, les cellules altérées se rétrécissent à la suite des modifications auxquelles sont soumises leurs membranes.

5.4. Rétractibilité

Le rapport des différents taux de rétractibilité (tangentielle, radiale et longitudinale) entre eux reste le même dans le matériel subfossile et dans le bois récent (tangentielle > radiale > longitudinale), mais les valeurs absolues sont par contre bien plus élevées, notamment dans la direction tangentielle. Selon KOLLMANN (1951), tous les bois récents se rétrécissent de l'état saturé à anhydre en moyenne de 7,5 à 8,0% tangentiellement, de 4 à 5% radialement et de 0,1 à 0,4% longitudinalement.

Les différences de rétractibilité, dues à la décomposition, apparaissent clairement en examinant les sections des troncs fossiles après séchage à l'étuve (pl. IX, A et B). Du petit nombre de mesures (15 échantillons) effectuées sur ce matériel subfossile, il ressort que la rétractibilité tangentielle est de loin la plus élevée. C'est précisément dans cette direction que l'on constate les liaisons les plus étroites entre les propriétés physico-mécaniques et morphologiques cellulaires du bois. Les taux de rétractibilité reflètent même des différences minimes de la résistance à la compression axiale dans les troncs de chêne secs (pl. IX, A).

L'aubier de frêne et de chêne se rétrécissent tangentiellement à raison de 60 à 75% (bois récents 8%). La rétractibilité du duramen de chêne est moindre, mais les valeurs varient fortement (10 à 45%).

D'après les troncs secs (pl. XI, D et XII, A), on peut admettre que la majorité des taux sont compris entre 10 et 15%. La rétractibilité tangentielle la plus faible se rencontre dans le bois de sapin. Dans la zone externe tendre, elle varie de 35 à 45%, dans la zone interne dure elle est très faible — 4 à 10% — et pratiquement identique à celle du bois récent.

Les corrélations entre la rétractibilité radiale et les autres caractéristiques du bois ne sont pas claires. On ne constate par exemple pas de différence entre l'aubier et le duramen de chêne (17 à 25%). Le bois de frêne présente une forte rétractibilité radiale qui varie de 35 à 45%. Chez le sapin nous n'avons découvert aucune réciprocité entre la rétractibilité et l'état de conservation (rétractibilité 2 à 57%).

Les feuillus, qu'il s'agisse de bois dur ou tendre, se retirent dans le sens axial à raison de 3 à 15%. Dans le bois de sapin bien conservé, on n'a pratiquement pas observé de rétractibilité longitudinale.

Les modifications morphologiques de divers types de cellules n'ont pas été étudiées. Cependant, il ressort des premières observations que les membranes des vaisseaux des feuillus hétérogènes possèdent une résistance à la compression plus élevée que les tissus fibreux du bois d'été (pl. IX, D). Chez les résineux, le bois d'été travaille moins que le bois de printemps plus poreux.

6. Morphologie du processus de décomposition du bois

Les propriétés physico-mécaniques des bois fossiles subissent des modifications, et il reste à en définir les causes.

Au cours des trente dernières années, le phénomène de décomposition du bois a été maintes fois étudié (morphologie, biologie et chimie des parois cellulaires). Parmi de nombreux auteurs nous retiendrons : ADOLF et al. (1972), FENGEL (1971), MÜLLER-STOLL (1951), NARAYNANMURTI et al. (1960), SANDERMANN et al. (1958). Les résultats obtenus par HARMSEN et NISSEN (1965) sont pratiquement identiques aux nôtres.

Dans ce qui suit, nous insisterons surtout sur le caractère spécifique du processus de décomposition. N'ont toutefois pas été étudiés : les agents responsables de la décomposition, les relations biologiques entre organisme et matières contenues dans les bois, le type de sédiment en fonction de la vitesse de décomposition et enfin les modifications chimiques du matériel subfossile.

Des coupes microscopiques furent établies sur le matériel testé de sapin, de frêne et de chêne, puis colorées au bleu d'aniline picrique. Ce colorant s'est avéré le mieux approprié. Les différences dans la résistance à la compression axiale, constatées lors des essais mécaniques, ont leur cause dans l'état de conservation variable des parois cellulaires.

L'état de conservation des cellules est décrit ci-dessous.

Sapin, *Abies alba*

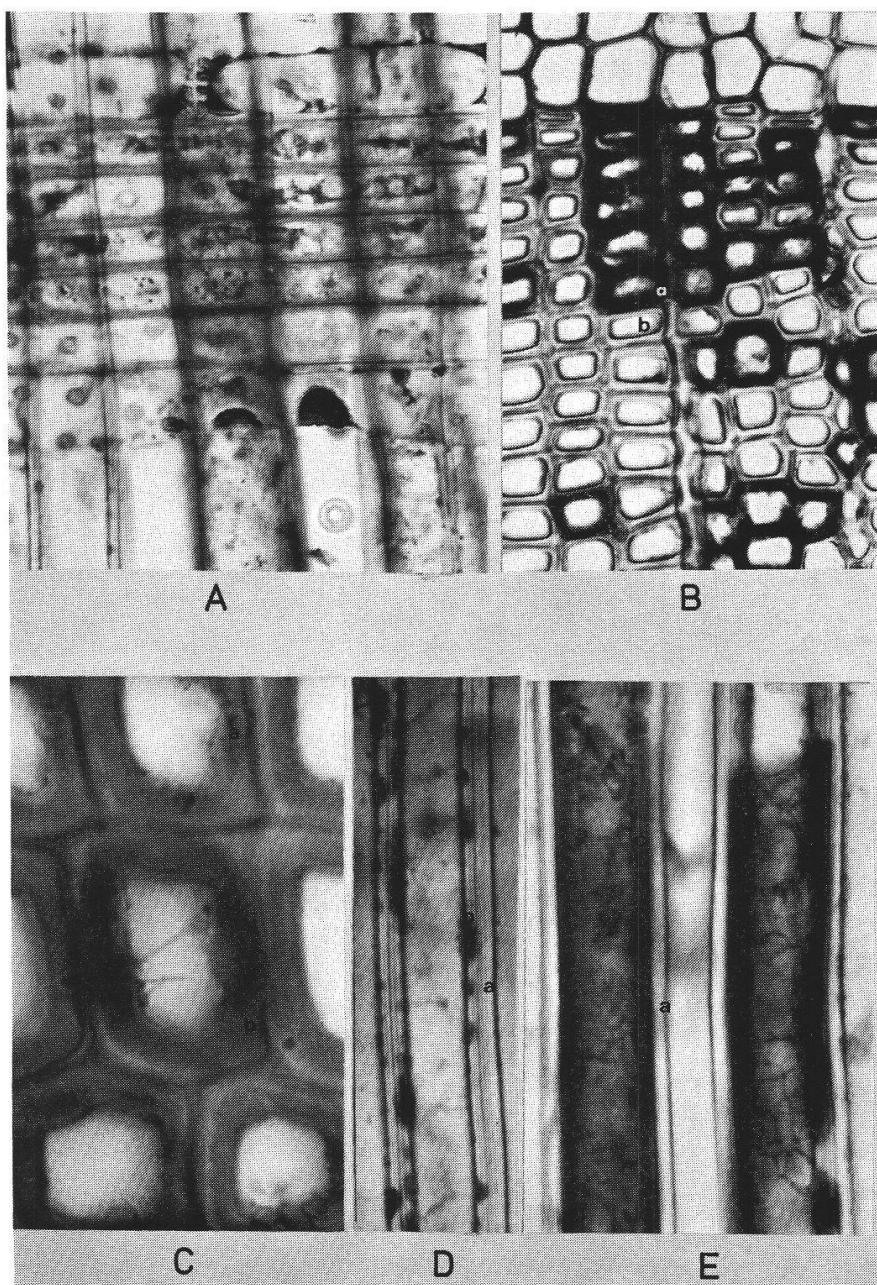
A. Zone centrale des troncs possédant une résistance maximum à la compression axiale.

Le bleuissement et un léger gonflement des membranes cellulaires laissent supposer qu'une altération du bois s'est déjà produite, bien qu'aucun organisme n'ait été trouvé dans les cellules. De faibles valeurs de résistance à la compression axiale et de densité le confirment. Il s'agit vraisemblablement d'un processus abiotique de décomposition, tel que l'a postulé VAROISSIEAU (1949). Déjà dans cette zone pas très éloignée de l'état sain s'amassent contre les membranes et dans le lumen des rayons ligneux des substances de duraminisation (pl. X, A) donnant au bois un aspect macroscopique brunâtre.

Dans les couches extérieures de la zone dure apparaissent premièrement des cellules altérées isolément, puis contre la périphérie, des groupes entiers de cellules détériorées (pl. X, B). HARMSEN et NISSEN (1965) ont étudié à Copenhague le déroulement de la décomposition dans des pieux de fondations vieilles de 90 ans. Selon eux, des bactéries et des actinomycètes détruisent les membranes cellulaires de manière très typique (pl. X, C-E et pl. XI, A).

En principe, le processus de décomposition se déroule à partir de l'extérieur contre l'intérieur des troncs. En fait, les organismes pénètrent dans une cellule et détruisent ses membranes tout à fait individuellement, sans influencer directement les cellules voisines. Ainsi, plusieurs stades de destruction d'intensités différentes se côtoient.

Le cheminement des organismes passe par le lumen des cellules à travers la paroi tertiaire. La paroi secondaire est ensuite dis-



A. —

Agglomération de substrats de duraminisation dans les rayons ligneux du sapin (*Abies alba*). Coupe radiale 500 : 1. Coloration : bleu d'aniline.

B. —

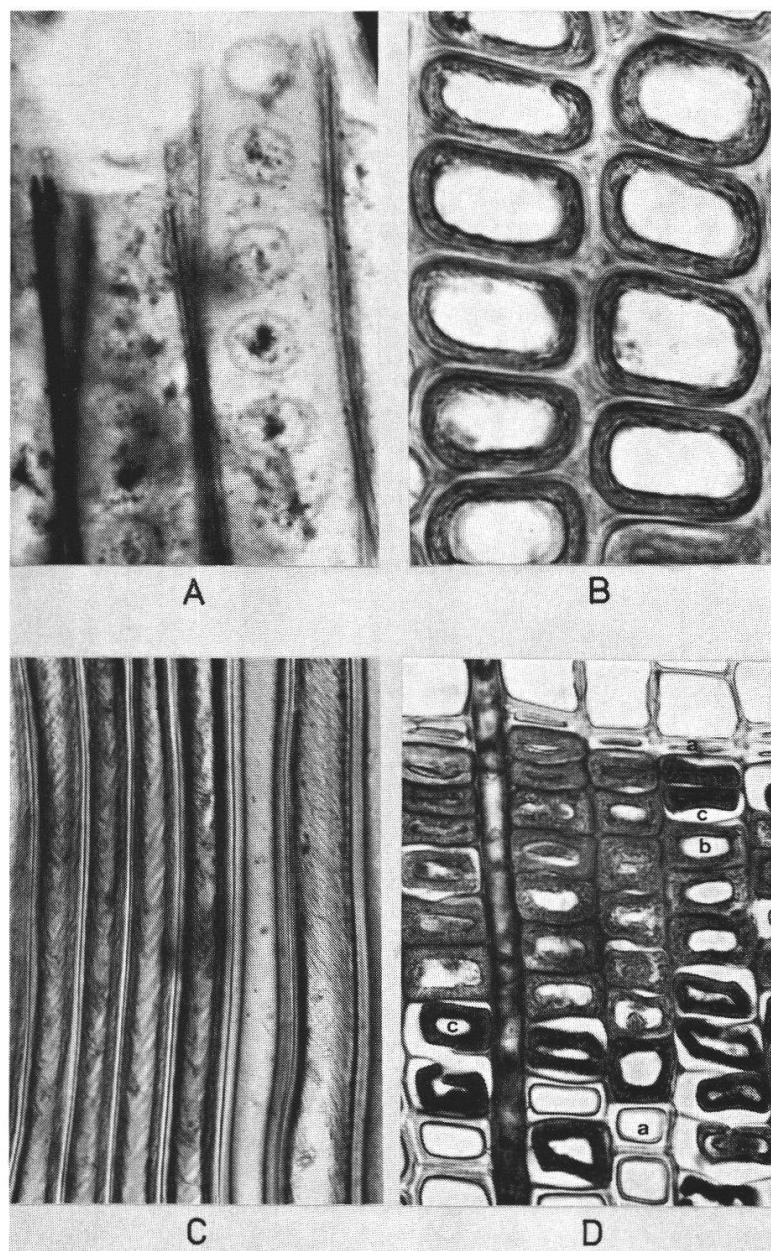
Mosaïque formée de cellules endommagées a) et de cellules intactes b) dans le bois d'été de sapin (*Abies alba*), à 5 cm de distance de la moelle. Coupe transversale 250 : 1.

C. —

Premières manifestations de décomposition par des actinomycètes dans les parois secondaires des trachéides du bois d'été de sapin. a) Premières attaques, b) paroi en partie envahie et détruite, c) coupe transversale 1250 : 1.

D et E. —

Comme pl. X, C, mais coupe longitudinale. a) Cellules intacte, b) les organismes attaquant la membrane cellulaire par points, à partir du lumen de la cellule, puis pénètrent c) et détruisent totalement la paroi secondaire. Les parois primaires ne sont pas touchées. Coupe radiale 500 : 1.



A. —

La structure fibrillaire des membranes cellulaires est attaquée par des bactéries et des actinomycètes, à l'exception des ponctuations aréolées. Sapin (*Abies alba*). Coupe radiale 500 : 1.

B. —

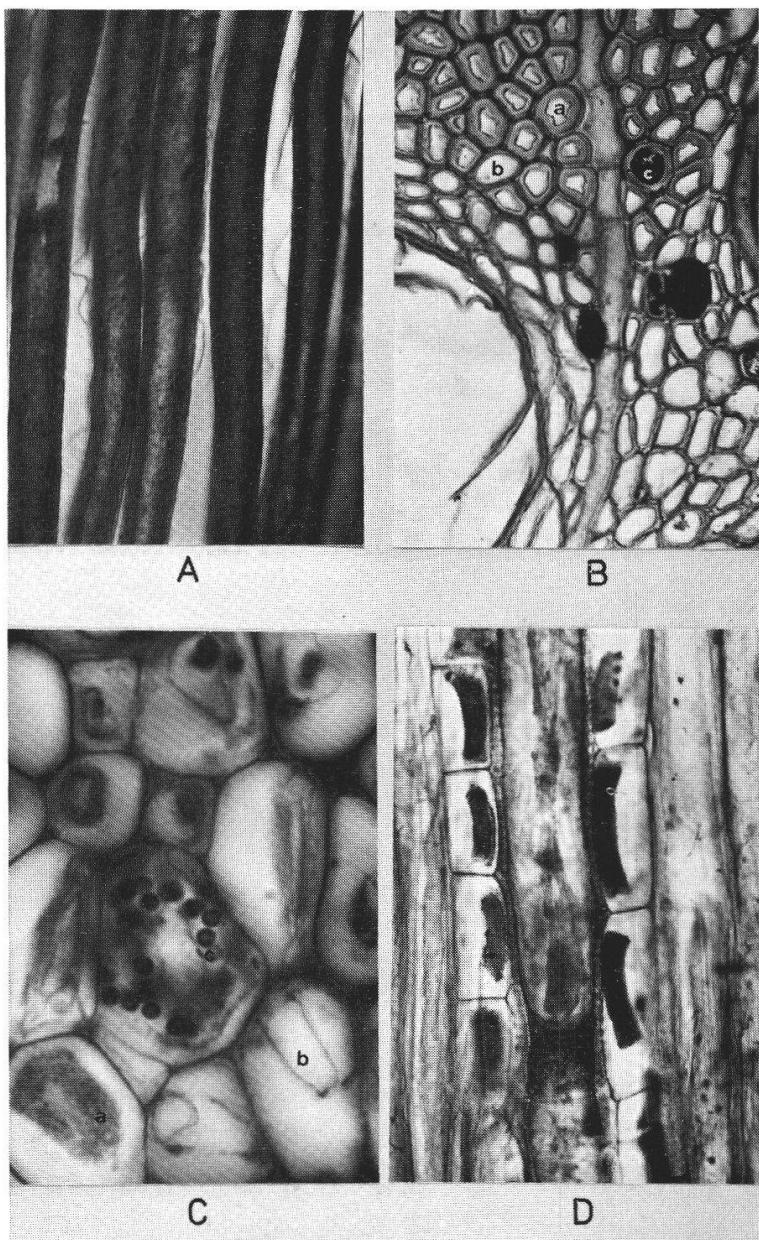
La décomposition du bois de réaction des conifères se déroule nettement plus lentement que dans le bois normal. La structure fibrillaire des parois cellulaires secondaires devient plus lâche mais le bois conserve sa stabilité en raison de la proportion élevée des parois primaires. Sapin (*Abies alba*). Coupe transversale 250 : 1.

C. —

Comme pl. XI, B, coupe longitudinale. Parois cellulaires secondaires détériorées mais montrant une structure fibrillaire spiralee. Sapin (*Abies alba*). Coupe radiale 250 : 1.

D. —

Différents stades de décomposition en mosaïque, dans la zone externe tendre d'un tronc de sapin (*Abies alba*). a) Cellules intactes, b) parois secondaires altérées, dilatées, toujours en contact avec les parois primaires, c) parois secondaires en voie de décomposition et de rétrécissement, séparées des parois primaires. Coupe transversale 250 : 1.



A. —

Comme pl. XI, D, coupe longitudinale. Dans les stades de décomposition b) et c), les parois secondaires ont l'aspect de tubes suspendus librement dans la cellule. La structure des membranes, ponctuation aréolées incluses, n'est plus visible. Coupe radiale 250 : 1.

B. —

Structure cellulaire de la zone interne du duramen d'un tronc de chêne (*Quercus spec.*), a) les parois secondaires des fibres ligneuses libriformes sont gonflées ; on remarque la forme étoilée de l'intérieur des cellules, b) les parois des cellules de parenchyme ne présentent encore aucune modification, c) des substances de duraminisation sont visibles dans quelques cellules de parenchyme. Coupe transversale 250 : 1.

C. —

Structure cellulaire de l'aubier du même tronc de chêne, a) les parois secondaires en voie de forte décomposition ou déjà, b) complètement détruites. Les parois tertiaires subsistent. Des spores fongiques sont parfois présentes dans la zone précédemment occupée par la paroi secondaire. Sont-ce des spores de type aérobie ou anaérobiose, on ne saurait le dire. Coupe transversale 1250 : 1.

D. —

Parois secondaires rétrécies dans les cellules de parenchyme circumvasculaire du bois d'été chez le frêne. Coupe radiale 250 : 1.

soutient à la façon d'une carie (pl. X, C). La paroi primaire et la couche intercellulaire ne sont pas attaquées. Les petits foyers d'infection dans la paroi secondaire s'y étendent rapidement et la détériorent (pl. X, D et E). Les organismes pénètrent sporadiquement par les ponctuations aérolées (barrière mécanique) ; il se forme ainsi des nids de cellules endommagées qui alternent avec des nids de cellules saines (pl. X, B). Dans les cellules normales, la structure fibrillaire de la membrane cellulaire disparaît en grande partie (pl. XI, A). La structure hélicoïdale des membranes cellulaires reste intacte seulement dans le bois de compression (pl. X, E et XI, C).

HARMSSEN et NISSEN (1965) supposent que les organismes détruisent la cellulose, la lignine restant alors sous forme d'une masse peu structurée.

B. Zone périphérique à faible résistance à la compression axiale. Ici la décomposition conduit à la perte totale de la résistance mécanique. D'abord, les parois cellulaires secondaires se dilatent fortement (pl. XI, D). Une structure grumeleuse apparaît simultanément dans la paroi, qui ne peut vraisemblablement être due qu'à la destruction complète ou partielle de la lignine par des organismes. Ensuite la paroi secondaire se sépare de la paroi primaire, formant alors à l'intérieur des cellules un tube étroit (pl. XII, A). Il est remarquable que même à ce stade, certaines cellules intactes soient présentes.

Chêne, *Quercus* spec.

Le processus de décomposition du chêne ressemble à celui du sapin avec cette différence cependant que dans l'aubier et dans la zone extérieure du duramen la destruction est encore plus avancée que chez le sapin.

A. Zone centrale à forte résistance à la compression axiale.

Les membranes épaisses des fibres ligneuses libriformes sont dilatées, d'où l'aspect étoilé de l'intérieur des cellules (pl. XII, B). Seul un léger bleuissement (bleu d'aniline) indique une faible destruction de la cellulose, ce qui explique les faibles valeurs de la résistance à la compression axiale.

Dans les cellules de parenchyme du bois d'été, on trouve quelques bactéries, mais on ne constate pas de destruction des membranes cellulaires, tant que l'on reste dans le domaine de la microscopie optique tout au moins. Des bandes portant manifestement des traces d'altération sont présentes localement, notamment dans les cellules de parenchyme du bois de printemps au voisinage des vaisseaux.

B. Zone périphérique de faible résistance à la compression axiale.

Exception faite d'une étroite zone endommagée de façon discontinue, toutes les membranes cellulaires du duramen sont en grande partie altérées.

Dans les parties denses du bois d'été, les parois secondaires des fibres ligneuses libriformes se séparent également de leurs parois primaires. Dans les zones poreuses du bois de printemps par contre, les parois secondaires sont déjà détruites et les parois tertiaires se trouvent libres dans le lumen. Quelques hyphes apparaissent déjà. Les parois secondaires du duramen sont presque sans exception détruites, et l'on voit de petites spores fongiques dans l'espace libre entre les parois primaires et tertiaires (pl. XII, C). Des réseaux denses d'hyphes croissent dans les vaisseaux du bois d'été.

Les substances de duraminisation exercent une action fongicide sur les ascomycètes et les basidiomycètes, semble-t-il. Les actinomycètes ne sont cependant pas influencés.

Frêne, *Fraxinus excelsior*

Il est impossible d'étudier le processus de décomposition dans le bois de frêne, puisque toutes les cellules du tronc, que ce soit dans le duramen ou dans l'aubier, sont dans un stade de destruction avancé.

Quelques cellules de parenchyme sont moins altérées. Les parois secondaires des cellules des rayons ligneux et des cellules de parenchyme circumvasculaires se sont détachées des parois primaires et ont l'aspect de petits blocs à l'intérieur des cellules. La plupart des parois secondaires sont pour ainsi dire totalement dissoutes et les parois tertiaires reposent librement dans le lumen comme chez le chêne. Cela explique la résistance à la compression axiale généralement très faible.

Les actinomycètes formant des spores observées par HARMSEN et NISSEN (1965) sont également présents dans le bois de frêne. La zone extérieure de l'aubier contient rarement d'épaisses hyphes de basidiomycètes.

Résumé

La « station Nord » d'Auvernier (canton de Neuchâtel), datant du Bronze final, est délimitée côté lac par une palissade en chêne (*Quercus* sp. ; A et B), complétée secondairement par la construction d'une palissade composée aux deux tiers de sapin blanc (*Abies alba* ; C). C'est plus de 170 m de palissades qui ont été ainsi topographiés en plongée. On remarque que les arbres destinés à fournir les pilotis ont été abattus selon le mode d'exploitation par assortiment.

Le calcul de la résistance mécanique des pilotis a donné des valeurs en relation directe avec l'état de dégradation de la structure cellulaire du bois et des essences étudiées. L'infra-densité (augmentant de la périphérie au centre du tronc), la teneur en eau (variant inversement à la densité) et la résistance à la compression axiale sont les paramètres étudiés. C'est la résistance à la compression axiale qui caractérise le mieux le degré de conservation du bois : très bas pour le frêne et l'aubier

du chêne, il peut atteindre la moitié des valeurs du bois récent pour le sapin et le cœur du chêne, ces derniers étant encore dans un état de conservation remarquable.

Si le processus de la décomposition du bois n'a pu être étudié chez le frêne où il a déjà atteint un stade terminal, le sapin et le chêne par contre présentent à peu près le même type de dégradation : le centre a subi une décomposition abiotique alors que la partie extérieure, l'aubier, a été initialement dégradée par des bactéries et des actinomycètes.

Zusammenfassung

Die « Station Nord » von Auvernier, Kanton Neuenburg, aus der späten Bronzezeit ist seeseitig durch eine Eichen-Palisade (*Quercus* sp.; A und B) abgegrenzt, die später mit einer weiteren — diese zu zwei Dritteln aus Tanne (*Abies alba*; C) — ergänzt worden ist. Durch Tauchgrabungen konnten mehr als 170 m der Palisade aufgezeichnet werden. Die bronzezeitlichen Menschen haben die Stämme zum Bau der Palisade nach den Durchmessern aus den Waldbeständen ausgesucht (Auslese nach Sortiment).

Mit der mechanisch-physikalischen Prüfung der Hölzer verschiedener Arten konnten direkte Beziehungen zu dem zellulären Erhaltungszustand aufgedeckt werden. Mit abnehmender Dichte fällt die Druckfestigkeit, der Wassergehalt und die tangentiale Schwindung nehmen zu. Am besten wird der Zustand des Holzes mit der Messung der Druckfestigkeit erfasst. Diese ist sehr gering beim Eschenholz und dem Eichen-Splintholz. Tannenholz und Eichen-Kernholz dagegen weisen noch bemerkenswert hohe Festigkeiten auf (Hälften der ursprünglichen Festigkeit).

Bei den Eschenstämmen haben die abiotischen und biotischen Abbauvorgänge bis ins Zentrum ein Endstadium erreicht. Tannen- und Eichenstämmen sind resistenter gegen Abbaumechanismen. Hier haben die inneren Stammteile dem Abbauprozess der Bakterien und Aktinomyceten weitgehend widerstanden und weisen entsprechende hohe Festigkeiten auf.

Summary

The « Station Nord » of Auvernier located on the shore of Lake Neuchatel in the Canton of Neuchatel, has been attributed to the Late Bronze Age. On its lakeside the site is delimited by two palisades, which together exceed 170 meters in length. Both were systematically mapped and sampled by a team of divers. Archeological evidence indicates that the two palisades were not contemporary. The older is largely composed of oak (*Quercus* sp.; A and B). During a later construction phase the second palisade was erected. Towards its western extremity it parallels the first palisade and in contrast to the first it is dominated by first (*Abies alba*; C); approximately two thirds of the posts belong to this

species. It has been shown that selective cutting of the forest was practiced in the Late Bronze Age.

The mechanical resistance of the posts gave values directly proportional to the state of degradation of the cellular structure of the wood. The infra-density of the posts (increasing from the periphery to the center of the trunk), the capacity of water retension (varying inversely with the density), and the resistance to axial compression were the parameters studied ; it is the latter which provides the best indicator of the degree of conservation of the wood. While the values obtained for the ash and the sapwood of oak are very low, the posts of fir and the heartwood of oak may reach values which correspond to approximately half of the values recorded for recent wood ; thus revealing their remarkable condition of conservation. Both the fir and the oak present approximately the same type of deterioration in that, the heartwood had undergone abiotic decomposition, while the sapwood has been degraded by bacteria and actinomyces. The processes could not be studied in the ash because it had reached a terminal stage of degradation.

BIBLIOGRAPHIE

- ADOLF, P., GERSTETTER, E. et LIESE, W. — (1947). Untersuchungen über einige Eigenschaften von Fichtenholz nach dreijähriger Wasserlagerung. *Holzforschung* 26 : 18-25.
- BEDNAR, H. et FENGEL, D. — (1974). Physikalische und strukturelle Eigenschaften von rezentem und subfossilem Eichenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 32 : 99-107.
- DZBENSKI, W. — (1970). Kriterien für die Beurteilung der technischen Eigenschaften von Eichenholz aus Ausgrabungen. (En polonais avec traduction russe et anglaise). *Lesnictwo, Warzawa* (Zeszyty Naukowe SGGW) : 171-190.
- EGLOFF, M. — (1970). Découvertes récentes sur la station du Bronze final d'Auvernier. *Musée neuchâtelois* : 144-155.
- (1972). Recherches subaquatiques dans la baie d'Auvernier. *Helvetia archaeologica* 9 : 3-12.
- EIDGENÖSSISCHE ANSTALT FÜR DAS FORSTLICHE VERSUCHSWESEN. — (1966). Ertragstafeln, Tanne. *Birmensdorf*.
- EIDGENÖSSISCHE MATERIALPRÜFUNGSANSTALT FÜR INDUSTRIE, BAUWESEN UND GEWERBE, ZÜRICH. — (1955). Über den Einfluss von Wassergehalt, Raumgewicht, Faserstellung und Jahrringstellung auf die Verformbarkeit schweizerischen Fichten-, Tannen-, Lärchen-, Rotbuchen- und Eichenholz. Bericht 183, Zürich.
- FENGEL, D. — (1971). Chemische und elektronenmikroskopische Untersuchung eines fossilen Fichtenholzes. *Holz als Roh- und Werkstoff* 29 : 305-314.

- HARMSSEN, L. et NISSEN, T. V. — (1965). Bakterienangriff auf Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 23 : 389-393.
- KNUCHEL, H. — (1954). Das Holz. *Aarau*.
- KOLLMANN, F. — (1951). Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, t. I, 2^e éd., Berlin, Göttingen, Heidelberg, München.
- KOMMERT, R. et WIENHAUS, O. — (1970). Untersuchungen chemischer und physikalischer Eigenschaften von Holz aus Kulthöhlen. *Holztechnologie* 11 : 177-182.
- LAVERS, G. M. — (1969). The strength properties of timbers. *Ministry of technology, Forest Products Research. Bull.* № 50 (2^e édition, Metric Units), London.
- MÜLLER-STOLL, W. R. — (1951). Mikroskopie des zersetzen und fossilisierten, Holzes. In : Handbuch der Mikroskopie und der Technik (H. Freund, éd.). T. V (2) : 725-816, Frankfurt/M. (Umschau Verlag).
- NARAYANAMURTI, D., GHOSH, S. S., PRASAD, B. N. et VERMA, G. M. — (1960). Untersuchungen an altem Holz aus dem Flussbett des Ganga bei Mokameh, Bihar. *Holz als Roh- und Werkstoff* 18 : 55-58.
- ORTH, H. — (1973). Die Steinzeithölzer von Bad Wollishofen/Schweiz. Ein Beitrag zur Fossilchemie. *Holzforschung* 27 : 96-99.
- RYCHNER, V. — (1974). L'âge du Bronze final à Auvernier (NE). Note préliminaire sur le matériel des fouilles de 1969-1973. *J.S.G.U.* (= A.S.S.P.) 58 : 43-65.
- SANDERMANN, W., DIETRICHS, H. H. et GOTTWALD, H. — (1958). Untersuchungen frühgeschichtlicher Hölzer und deren Bedeutung für den Holzschatz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 16 : 197-204.
- VAROISSIEAU, W. W. — (1952). Ancient buried an decayed wood from a biological chemical an physico-mechanical point of view. *Proceed, 7th Internat. Bot. Cong. Stockholm*.
- WIEDEMANN, E. — (1957). Ertragstafeln wichtiger Holzarten bei verschiedener Durchforstung. *Hannover*.

Adresse des auteurs :

Béat Arnold, Musée cantonal d'archéologie, CH - 2000 Neuchâtel ;
Dr F. Schweingruber, Institut fédéral de recherches forestières, CH - 8903 Birmensdorf.