

Le foramètre : un outil de reconnaissance mécanique du bois

F Le Naour, P Morlier *

*Université de Bordeaux, laboratoire de génie civil, GS rhéologie du bois,
UA 867 du CNRS, 33405 Talence cedex, France*

(Reçu le 9 mai 1989; accepté le 14 novembre 1990)

Résumé — La nécessité d'établir une estimation de la qualité du bois, dont la densité est souvent le critère explicatif unique, par des essais non destructifs (ou peu destructifs), nous a incités à mettre au point une méthode de reconnaissance du bois (le foramètre) issue de techniques utilisées en mécanique des sols.

Cette méthode est fondée sur la mesure des paramètres de perçage (poussée, couple, vitesse de rotation, vitesse de pénétration) et l'établissement d'un critère de forabilité : le travail spécifique, c'est-à-dire le travail nécessaire à forer l'unité de volume de bois (dans une zone définie, de fonctionnement correct de l'outil).

Le critère de forabilité est ensuite corrélé avec les propriétés mécaniques du bois sans défaut (résistance, module longitudinal, densité) pour différentes essences : pin maritime, balsa, peuplier. L'influence de l'humidité sur le critère de forabilité est également explicitée.

Il résulte de l'étude générale des corrélations que le critère de forabilité est meilleur indicateur de la résistance en flexion du matériau dans le cas du pin maritime et à égalité avec la densité dans le cas du balsa et du peuplier.

résistance mécanique / forabilité / contrôle non destructif / instrumentation / pin maritime / peuplier

Summary — A drilling measure: an apparatus for measuring the mechanical quality of wood.

The necessity of assessing the mechanical quality of wood, which is often related to density, led to a means of identifying wood by non-or very slightly destructive tests by adopting techniques similar to those used in soil mechanics (use of an apparatus for drilling measurements) (figs 1, 2, 3).

This method is based on the measurement of drilling parameters (thrust, torque, rotational speed, penetration rate) and the establishment of a drillability criterion: the specific energy, ie the energy required to drill a volume unit of wood (in a previously defined zone where the tool can function correctly).

The drillability criterion is then correlated with the mechanical properties of perfect wood (strength parallel to grain, modulus, density) for different species: maritime pine (figs 5, 6, table I), poplar (figs 8, 9, table II), balsawood (fig 10). The influence of moisture on the criterion is also detailed (fig 7).

After examining all correlations it can be concluded that the drillability criterion is the best indicator for the maritime pine. In the case of balsawood and poplar, this criterion is equivalent to the density criterion.

mechanical strength / drillability / non-destructive testing / instrument / maritime pine / poplar

* Correspondance et tirés à part.

INTRODUCTION

La nécessité d'établir une estimation de la qualité du bois, dont la densité est souvent le critère explicatif unique, par des essais non destructifs (ou peu destructifs) nous a incités à mettre au point une méthode de reconnaissance du bois (Le Naour, 1988).

Cette méthode est fondée sur la mesure de certains paramètres entrant en jeu dans le processus de perçage du bois et sur l'utilisation des corrélations entre les caractéristiques mécaniques (contraintes de rupture, module d'élasticité) et un nouveau paramètre : le critère de forabilité du matériau.

Ce moyen de reconnaissance est issu de techniques utilisées en mécanique des sols pour leur reconnaissance géotechnique (Girard, 1985).

Dans cette étude expérimentale, nous nous contentons d'utiliser le perçage du bois comme moyen de reconnaissance et non de présenter une étude détaillée et complète de ce mode d'usinage, comme l'a réalisée Thibaut (1988) pour le processus de coupe du bois par déroulage.

Diverses méthodes sont actuellement utilisées, aussi bien en forêt qu'en usine, pour caractériser la qualité du bois.

La tarière de sondage, dite tarière de Pressler (Polge, 1971), permet d'obtenir des échantillons qui servent non seulement à des calculs de production basés sur la largeur des accroissements annuels, mais aussi à des études plus approfondies permettant d'apprécier la qualité du bois.

Un complément à cette méthode est apporté par la mesure du couple lors du sondage grâce au torsiomètre; on connaît les liaisons étroites existant entre le couple de torsion et diverses caractéristiques mécaniques ou physiques, la densité en particulier (Nepveu, 1979).

Le dispositif Pilodyn permet d'étudier la qualité du bois en forêt ou celui des constructions existantes : une pointe métallique est enfoncée dans le bois avec une énergie définie. La profondeur de pénétration est mesurée et peut être reliée à la densité du matériau testé (Gorlacher, 1987).

La méthode mise au point par Nicholls (1985) est fondée sur la relation entre la densité du bois et la force maximale nécessaire pour arracher un clou enfoncé dans l'arbre avec un dispositif hydraulique portatif et peu coûteux.

Une méthode de reconnaissance mécanique du matériau bois, le perçage, est décrite dans cet article.

Dans la 1^{re} partie, nous présentons les paramètres considérés pour reconnaître le matériau percé, qui permettent d'introduire le critère de forabilité, ainsi que divers dispositifs expérimentaux (perceuse instrumentée, banc de perçage, foramètre, etc.).

L'expérimentation du fonctionnement de cet outil de reconnaissance sur diverses essences (pin maritime, peuplier, balsa) et l'étude des relations avec les caractéristiques mécaniques du bois montrent que le critère de forabilité, supposé intrinsèque au matériau, s'avère un moyen de reconnaissance de la qualité. Cette expérimentation ainsi que cette analyse des résultats sont présentés dans la 2^e partie.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour réaliser l'étude des différents paramètres entrant en jeu dans le processus de perçage du bois, une perceuse montée sur un banc de perçage a été équipée d'appareils de mesure. Les essais sont effectués à poussée (P) constante et à vitesse de rotation (W) imposée; les paramètres liés à la réponse du matériau –vitesse de pénétration de l'outil (V) ou vitesse d'avance, couple de perçage (C)– sont enregistrés graphiquement.

L'étude de ces 2 derniers paramètres conduit à la mise en évidence d'un critère de forabilité pour des conditions de perçage données. Ce critère est représenté par le travail nécessaire pour transformer l'unité de volume de bois en copeaux avec un outil donné (T_s). Cette caractéristique spécifique au matériau est définie par la relation :

$$P_u = T_s \cdot V_b$$

P_u : puissance utile à la coupe,

V_b : volume du bois transformé en copeaux en 1 s,

T_s : critère de forabilité.

Ce paramètre est une mesure de la résistance du bois à la pénétration de la mèche.

Un prototype d'outil de mesure de ce critère est réalisé : par une mesure électrique, l'énergie nécessaire à forer une unité de volume de bois est déterminée. Les bons résultats obtenus à l'aide de ce prototype nous ont incités à créer un outil de reconnaissance de la qualité du bois, facilement utilisable et portatif, appelé foramètre. La description de ces dispositifs expérimentaux ainsi que les aspects techniques et instrumentaux font l'objet de cette 1^{re} partie.

Le banc de perçage

Le support, de type support universel de perceuse, assure le guidage de la perceuse lors des diverses opérations de perçage. Il est fixé sur un bloc de béton. La descente de la perceuse est commandée par un système pignon-crémaillère. La masse accrochée en bout de câble de l'ensemble poulie-câble-renvoi d'angle impose à l'outil une poussée P constante lors de l'essai. L'étalonnage préalable du système permet de déterminer précisément cette poussée en fonction de différentes masses. Une vue d'ensemble est présentée sur la figure 1.

De par sa conception, la perceuse a une vitesse de rotation W qui peut être imposée dans la gamme disponible et reste constante lors du perçage. En effet, un générateur tachymétrique incorporé et une stabilisation électronique et automatique de vitesse maintiennent celle-ci constante, depuis le fonctionnement à vide jusqu'au régime sous charge.

Les principales caractéristiques de la perceuse sont les suivantes :

- puissance absorbée : 1 010 W,
- puissance utile : 610 W,
- vitesse de rotation : 0-950/2 400 tr/min,
- capacité du mandrin : 1-13 mm.

Le type d'outil utilisé pour les essais de perçage est une mèche à bois hélicoïdale avec pyramide de centrage. Dans une gamme de diamètres 6, 8 et 10 mm, il est bien adapté à la coupe du bois et présente l'avantage d'être peu onéreux. L'outil est très fréquemment changé si bien que son usure reste négligeable.

Les paramètres

Les paramètres mécaniques

Seuls 2 des paramètres qui régissent le processus de perçage sont enregistrés :

- la vitesse de pénétration de l'outil au sein du matériau (V) ou vitesse d'avance,
- le couple de perçage (C).

Les autres paramètres, la poussée (P) et la vitesse de rotation (W), sont fixés lors des essais.

Pour la vitesse d'avance (V), l'enregistrement du signal fourni par un potentiomètre rotatif, sur lequel passe le câble reliant la poulie aux masses, donne la descente de l'outil dans le matériau en fonction du temps :

Pour le couple de perçage (C), le traitement du signal délivré par le couplemètre donne l'évolution du couple en fonction du temps. Le couplemètre peut être décrit de la façon suivante :

- l'éprouvette est fixée sur le plateau du couplemètre par des brides;
- ce plateau, initialement libre en rotation, voit son degré de liberté limité par une lame métallique semi-rigide;
- la flexion de cette lame, donnée par des jauges de contrainte, est proportionnelle au couple de réaction au perçage.

Un calibrage de la lame métallique, ainsi qu'un choix correct des jauges, permettent la mesure du couple (C) après un étalonnage du système.

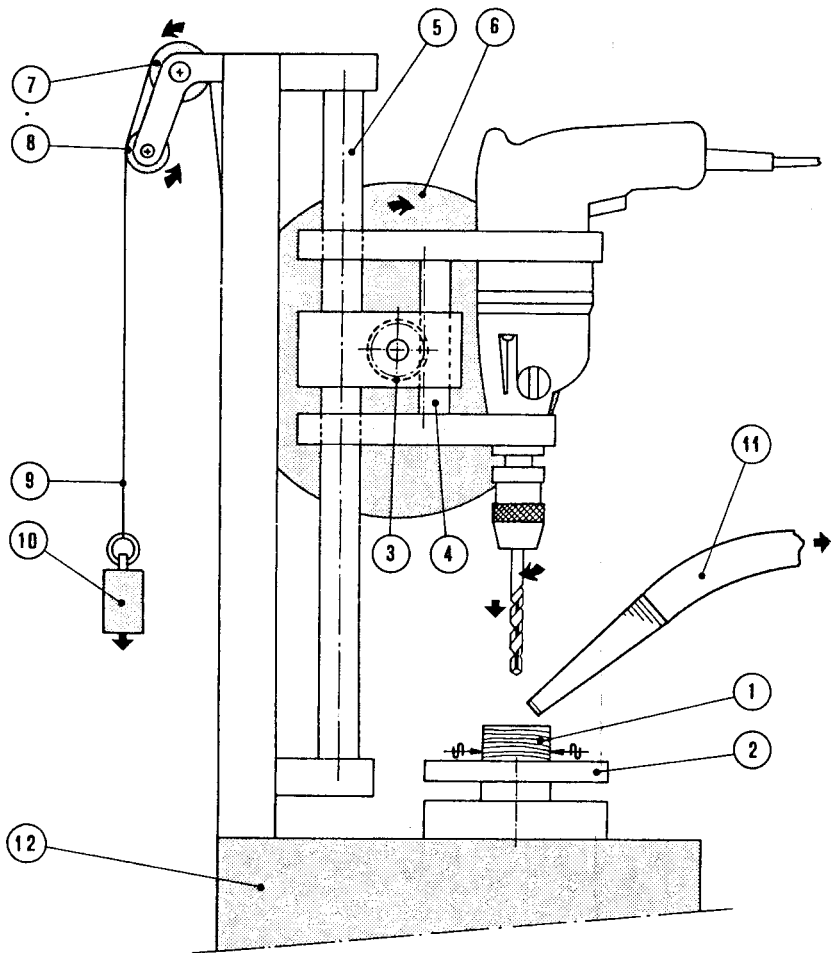


Fig 1. Vue d'ensemble du banc de perçage; 1 - Échantillon; 2 - Couplemètre; 3 - Pignon; 4 - Crémaillère; 5 - Colonne; 6 - Poulie; 7 - Renvoi d'angle; 8 - Potentiomètre; 9 - Câble; 10 - Masse; 11 - Aspiration; 12 - Socle.

Les paramètres électriques

Pour une course d'outil donnée (environ 1 cm) sont mesurés simultanément :

- la vitesse d'avance moyenne de la mèche au sein du matériau : la longueur du perçage est fixe et le temps d'usinage est connu à l'aide d'un chronomètre à commande électrique; - le travail spécifique T_s obtenu au moyen d'une

mesure de la consommation d'énergie au cours de l'essai.

En effet, le travail spécifique T_s est directement lié à la puissance mécanique nécessaire à la coupe P_u (ou puissance utile) par la relation $P_u = T_s \cdot V_b$. La connaissance de la puissance consommée P_c nous permet de déduire la puissance mécanique grâce à un étalonnage correct entre ces 2 facteurs. Dans la gamme de puis-

sance enregistrée, la relation entre ces 2 termes, P_c et P_u , est linéaire et dépend uniquement de la vitesse de rotation employée.

Cette mesure nécessite l'utilisation des appareils suivants (fig 2) :

- un convertisseur de puissance (pour perceuse à courant alternatif) qui délivre un courant continu proportionnel à la puissance active à l'entrée,
- un intégrateur de comptage qui permet le calcul de la quantité d'énergie à partir de la mesure de puissance,

- un afficheur digital visualisant la valeur de la mesure.

La prise des mesures du travail spécifique (T_s) et de la vitesse d'avance de l'outil (V) ne s'effectue que sur une partie du perçage afin d'éviter les perturbations occasionnées par :

- l'attaque de la mèche sur l'échantillon au début du perçage : mise en place d'un régime stationnaire de perçage;
- l'arrivée de la perceuse en butée de fin de perçage où l'outil tourne à vide.

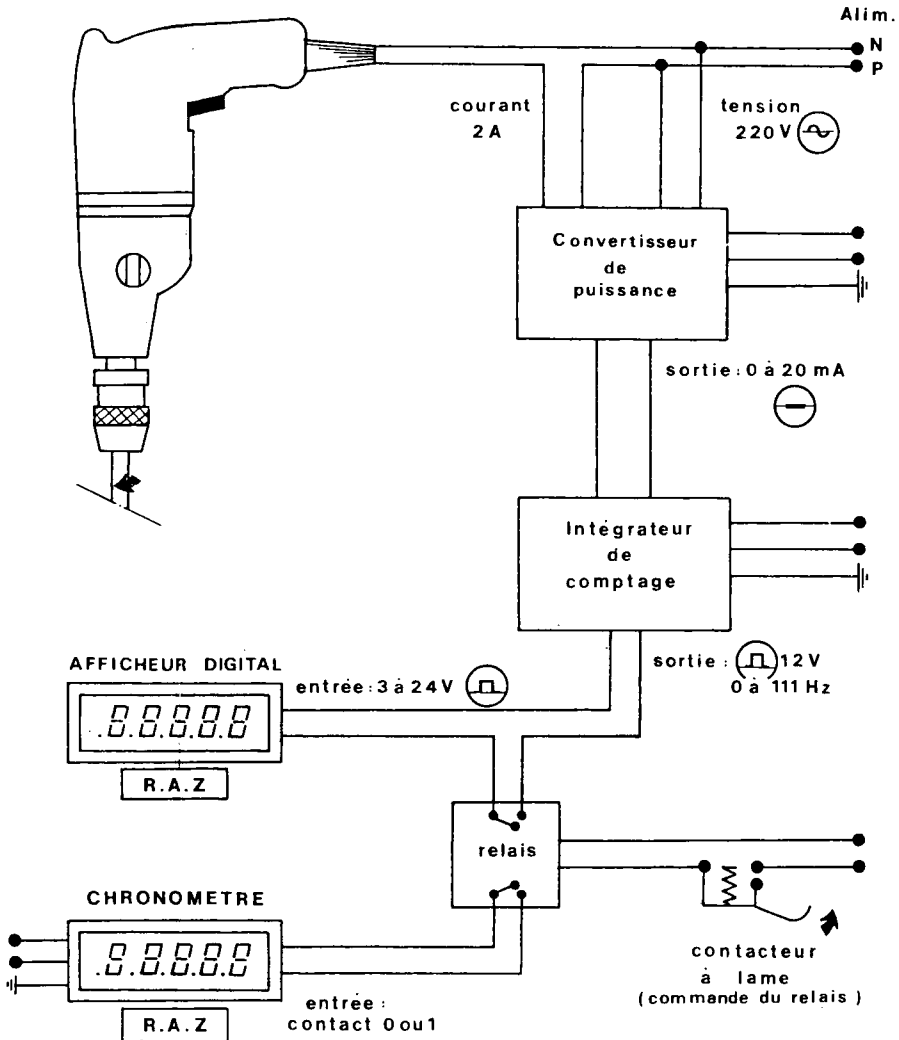


Fig 2. Schéma de l'instrumentation de la mesure du critère de forabilité.

Un contacteur à lame, fixé sur le bâti du banc de perçage, commande le début et la fin de prise de mesure (déclenchement des appareils). La position de ce contacteur dans le câblage électrique est indiquée sur la figure 2. Ce contacteur est actionné par une butée solidaire de la descente de la perceuse, donc de la pénétration de l'outil au sein de l'échantillon. Le réglage de la butée permet d'obtenir :

- la mise en place d'un régime correct de perçage (5 à 6 mm environ à partir du haut de l'échantillon),
- l'instant du début de mesure,
- la course (c) de l'outil, identique pour chaque échantillon percé (environ 1 cm),
- l'instant de fin de mesure.

Un outil de reconnaissance portable : le foramètre

En vue de la simplification de la mesure du critère de forabilité, nous avons mis au point une perceuse autonome et portable.

Son utilisation permet d'obtenir la mesure du critère de forabilité du bois suivant le même principe que celui de la perceuse de laboratoire : mesure de la consommation d'énergie nécessaire au perçage de 1 cm de matériau.

Cette mesure est disponible grâce à un appareillage électronique solidaire de la perceuse, à la fois compact et peu encombrant. Ce système d'acquisition comprend :

- un intégrateur de comptage qui calcule la quantité d'énergie nécessaire à forer le matériau sur 1 cm à partir de la puissance consommée par la perceuse,
- un seuil de mesure, associé à cet intégrateur, qui limite la prise en compte de la puissance à la seule puissance utile à la coupe,
- un afficheur digital qui visualise et mémorise la valeur de la mesure.

De plus, une pige amovible et réglable commande le départ et l'arrêt de la prise de mesure par l'intermédiaire d'un contacteur définissant ainsi la course utile de la mèche.

Un bloc batterie rechargeable assure l'autonomie de la perceuse et lui confère une grande facilité d'emploi d'où l'intérêt de son utilisation en forêt ou sur chantier.

Une vue de l'ensemble du foramètre est présentée sur la figure 3.

ANALYSE DES RÉSULTATS OBTENUS SUR DIFFÉRENTS BOIS AU LABORATOIRE

Au cours de cette 2^e partie, la validation de la méthodologie est réalisée sur le pin maritime (Le Naour et Morlier, 1987) qui sert de référence, ce matériau étant bien connu dans notre laboratoire.

De nombreux essais sont effectués afin d'étudier l'évolution des paramètres de perçage en fonction des caractéristiques du matériau testé. L'analyse de ces paramètres permet de mettre en évidence un critère d'énergie : le travail nécessaire pour réduire en copeaux l'unité de volume de bois (critère de forabilité).

Grâce à l'étude des relations avec les caractéristiques mécaniques du bois, le critère de forabilité, supposé intrinsèque au matériau, s'avère un moyen de reconnaissance de la qualité mécanique. L'application à 2 autres essences telles que le peuplier et le balsa est présentée à la suite.

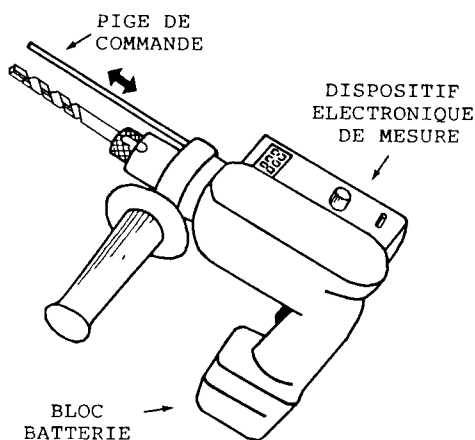


Fig 3. Le foramètre.

Essais sur le pin maritime (*Pinus pinaster*)

L'échantillonnage

Dans le cadre de l'étude sur la valorisation du pin maritime pour la construction, exécutée à partir de 1982, le CTBA (1984) et le CETE (1985) ont réalisé des programmes d'essais de flexion sur 4 points sur des bois en dimension de structure (charpente). Un des buts est d'établir un classement de cette essence régionale selon ses caractéristiques mécaniques.

Au sein du laboratoire de génie civil de Bordeaux, Delisée (1985) a effectué le même type d'essai sur des échantillons plus petits : ses éprouvettes, sans défauts et de pente de fil quasiment nulle, de section droite 50 x 30 mm², étaient issues du lot de bois de charpente testé par le CETE. Le lot provenait de 45 arbres prélevés dans 4 sites différents du massif forestier landais (Lande sèche, Lande humide, Marensin).

Les essais de perçage sont réalisés perpendiculairement aux cernes (radialement) dans la zone tendue de portions intactes d'éprouvettes d'un lot représentatif de l'échantillonnage de Delisée. Deux populations d'éprouvettes sont examinées :

- celles soumises à un changement radial (perpendiculairement aux cernes) lors de l'essai de flexion,
- celles soumises à un changement tangentiel (parallèlement aux cernes) lors de l'essai de flexion.

Différentes caractéristiques mécaniques sont connues : la contrainte de rupture (CR) et le module d'élasticité longitudinal (ME) pour les 2 modes de chargement. Les valeurs obtenues sont telles que :

- contrainte de rupture (CR) : 20 MPa < CR < 120 MPa;

- module d'élasticité longitudinal (ME) : 5 500 MPa < ME < 16 500 MPa;
- densité (D) : 0,48 < D < 0,68;
- taux d'humidité ($H\%$) : 12% < $H\%$ < 13%.

Les enregistrements graphiques

On remarque, lors de l'observation des courbes a et b de la figure 4, que le couple (C) augmente et la vitesse d'avance (V) diminue en traversant le bois d'été – bois dur – tandis que le couple diminue et la vitesse d'avance augmente en traversant le bois de printemps – bois tendre. On peut donc très facilement déterminer le nombre et l'épaisseur des cernes.

De plus, les variations du couple de perçage (C) sont un bon indicateur de l'hétérogénéité du matériau bois, car il restitue un meilleur profil de l'élément percé. Sur la courbe b , les pics visualisent les passages successifs de l'outil lors de sa descente au travers du bois d'été (fig 4).

Pour l'instant, ne seront pris en compte que la vitesse d'avance moyenne et le couple moyen pour un perçage d'une profondeur de l'ordre de 14 mm, ce qui correspond à 4 ou 5 cernes.

Les résultats

La vitesse d'avance (V)

Pour un outil donné (mèche à bois hélicoïdale d'un diamètre de 10 mm) et une vitesse de rotation fixée (W), nous avons tout d'abord regardé l'influence de la poussée sur l'outil (P) sur la vitesse d'avance (Le Naour et Morlier, 1987). Pour une poussée donnée, l'inverse de la vitesse d'avance est proportionnelle à la résistance du bois, et d'autre part, la pente de la droite $1/V = f(CR)$ est indépendante de P .

Mais cette zone de fonctionnement optimal pour l'utilisation du perçage comme moyen de reconnaissance est assez limi-

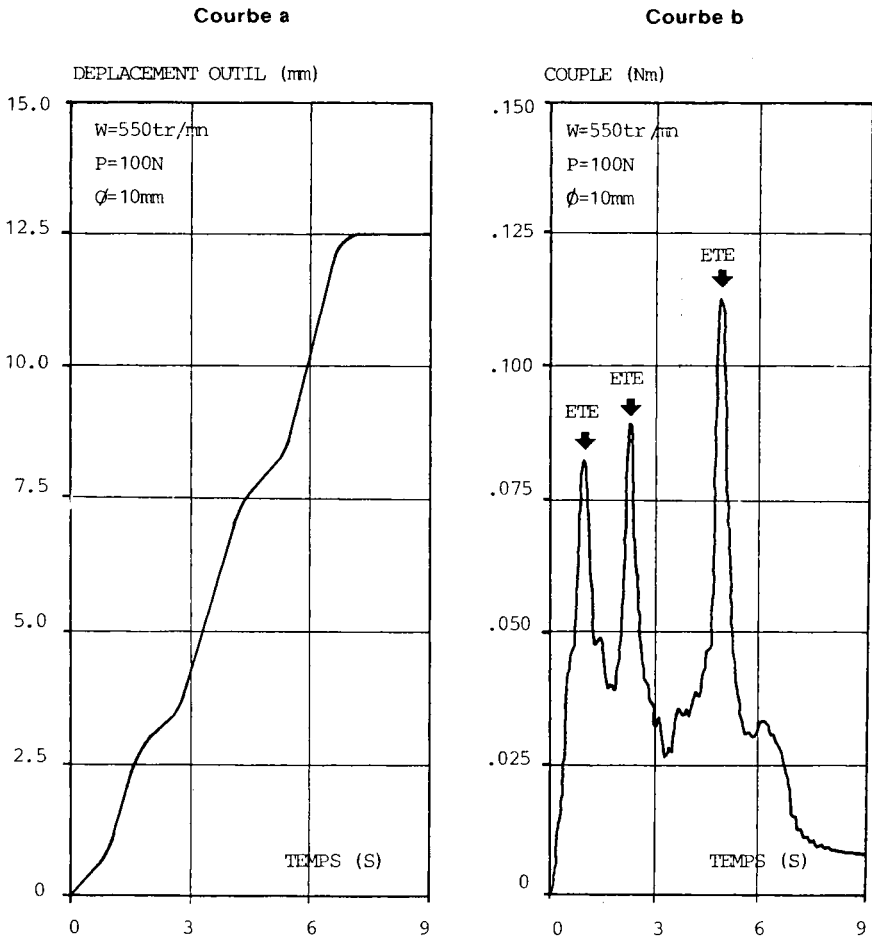


Fig 4. Exemple d'enregistrements graphiques obtenus pour un perçage d'une éprouvette en Pin maritime (outil : mèche hélicoïdale avec pyramide de centrage).

tée de par l'existence d'un seuil supérieur et d'un seuil inférieur. En effet, en considérant l'intervalle de résistance offert par l'ensemble des échantillons percés à poussée donnée, nous observons :

- un phénomène de refus de coupe (l'épaisseur du copeau est trop faible) sur des échantillons de résistance élevée : seuil supérieur;

- un phénomène d'avalement de l'outil (l'épaisseur du copeau est trop importante) sur des échantillons de résistance faible : seuil inférieur.

De plus, il apparaît que la relation entre les résultats des essais de perçage radiaux et de rupture radiale est identique à celle qui existe entre les résultats des essais de perçage radiaux et de rupture tan-

gentielle. Dans les conditions données de fonctionnement (outil, W , P) la lenteur de perçage est un meilleur indicateur de résistance que la densité.

Mise en évidence d'un critère d'énergie

Sur les même échantillons, des essais de perçage pour diverses poussées sur l'outil (P) ont été effectués. L'analyse des valeurs moyennes de la vitesse d'avance (V) ainsi que du couple de perçage (C) suggère un critère d'énergie régissant le processus de perçage.

Le travail nécessaire pour transformer l'unité de volume de bois en copeaux est spécifique au matériau (critère de forabilité) à condition de se situer à l'intérieur de la zone de fonctionnement correct de l'outil. Ce travail est appelé travail spécifique (T_s) défini par la relation :

$$P = T_s \cdot Vb$$

P : puissance utile à la coupe,

Vb : volume de bois transformé en copeaux en 1 s.

Par ailleurs $P = C \cdot W$;

C : couple de perçage;

W : vitesse de rotation de l'outil;

Il est aisé de déduire l'expression du travail spécifique T_s .

La vitesse de rotation (W) ainsi que la nature de l'outil sont fixées et restent identiques au cours de nos essais de perçage; l'énergie spécifique se réduit au rapport du couple (C) sur la vitesse d'avance (V).

Pour un même échantillon, nous avons remarqué la constance de ce rapport C/V en valeur moyenne et ceci quelle que soit la poussée (P) imposée sur l'outil.

L'utilisation du critère d'énergie permet donc :

– d'occulter l'influence de la poussée (P) au sein d'une zone de fonctionnement correct de l'outil,

– de mettre en évidence que les grandeurs physiques à mesurer, pour l'utilisation pratique de ce type de reconnaissance, sont la puissance de perçage et la vitesse d'avance (c'est-à-dire le travail nécessaire à l'usinage).

Le critère de forabilité du pin maritime

Des essais sur les 2 mêmes populations d'éprouvettes, en considérant la mesure du travail nécessaire à la coupe du matériau, fournissent une relation entre le travail spécifique T_s et la résistance du bois. Ce résultat (fig 5) conforte ceux énoncés au précédent paragraphe, à savoir que le travail spécifique T_s s'avère meilleur indicateur de la résistance du matériau que sa densité (fig 6).

L'étude des valeurs de T_s obtenues pour des perçages le long d'échantillons de pin maritime (10 perçages à intervalles réguliers sur une longueur d'échantillon de 500 mm) montre que la dispersion des mesures reste faible : de l'ordre de 5% par rapport à la valeur moyenne de T_s (les

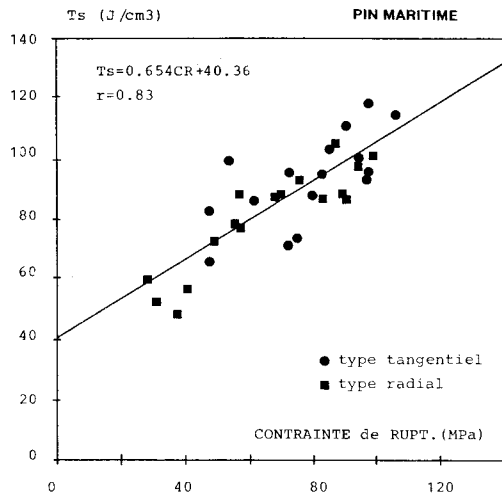


Fig 5. Relation entre le travail spécifique T_s et la contrainte de rupture Cr pour l'ensemble des deux populations d'éprouvettes testées.

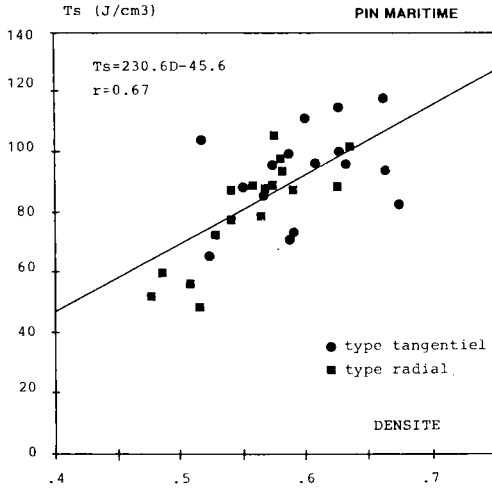


Fig 6. Relation entre le travail spécifique T_s et la densité D pour l'ensemble des deux populations d'éprouvettes testées.

échantillons percés sont sans défauts et de pente de fil quasiment nulle).

Pour chaque échantillon, la valeur de T_s , exploitée dans les résultats d'essais, sera une valeur moyenne sur 3 à 4 perçages.

Le tableau I présente les diverses corrélations obtenues entre les différentes caractéristiques mécaniques du matériau ainsi que le critère de forabilité. Il est à remarquer que pour les 2 populations d'éprouvettes réunies, c'est la relation entre T_s et CR qui offre le meilleur coefficient de corrélation.

De plus, pour l'ensemble des 2 populations d'éprouvettes, les relations entre la contrainte de rupture et la densité

$$(CR = 272,07 D - 85,01 \quad r = 0,62)$$

et entre la contrainte de rupture et le module d'élasticité longitudinal

$$(CR = 6,85 \cdot 10^{-3} ME - 7,85 \quad r = 0,82)$$

sont voisines de celles établies par Delisée :

$$CR = 300 D - 100,2 \quad r = 0,65$$

$$CR = 6,61 \cdot 10^{-3} ME - 6,9 \quad r = 0,83.$$

Ce fait valide la représentativité de notre échantillonnage vis-à-vis du lot d'éprouvettes testé par Delisée.

L'influence de l'humidité

Il est clair que, comme l'ensemble des propriétés mécaniques du bois, T_s dépend de la teneur en eau; nous avons comparé des mesures de T_s réalisées sur des échantillons de pin maritime à un taux d'humidité au-delà du point de saturation des fibres (ici $HP\% = 47,5\%$) et sur les mêmes échantillons à un taux d'humidité de 11%. Une excellente corrélation linéaire est obtenue :

$$T_s(47,5\%) = 0,54 T_s(11\%) + 15,6$$

$$r = 0,94.$$

Par la connaissance de ce type de relation, il est facile de déduire à partir du perçage du bois «vert» sa résistance à l'état «sec» (fig 7).

Il nous semble donc que cette méthode permet de justifier l'intérêt du foramètre en forêt; bien sûr l'étude devra être complétée par des essais supplémentaires afin de dégager de nouvelles corrélations du type de celles présentées sur la figure 7, à l'aide de mesures de T_s et de la teneur en eau. S'il s'avère qu'au-dessus du point de saturation des fibres, T_s est indépendant du taux d'humidité du bois (ce qui est hautement probable), des mesures sur arbres vivants seraient tout à fait justifiées, sans contrôle du taux d'humidité puisqu'en forêt celui-ci est toujours supérieur au point de saturation des fibres.

Tableau I. Equations des droites de régression linéaire de la forme $Y = AX + B$ obtenues avec les caractéristiques mécaniques du pin maritime et le critère de forabilité. *D* : densité; *CR* : contrainte de rupture (MPa); *ME* : module longitudinal (MPa); *Ts* : travail spécifique (J/cm³); *r* : coefficient de corrélation; *n* : nombre d'échantillons testés; * : test significatif au seuil de 5%; ** : test significatif au seuil de 1%; *** : test significatif au seuil de 1%; *R* ou *T* : type radial ou tangentiel.

Y	A	X	B	r	n	R-T
ME	53 370,66	D	-18 376,04	0,707 **	17	R
ME	7 778,44	D	7 345,36	0,223 ns	16	T
ME	27 244,17	D	-4 097,34	0,521 **	33	R et T
CR	428,50	D	-172,33	0,808 ***	17	R
CR	114,32	D	10,08	0,289 ns	16	T
CR	272,07	D	-85,01	0,623 ***	33	R et T
CR	63,3 10 ⁻⁴	ME	-5,91	0,901 ***	17	R
CR	77,6 10 ⁻⁴	ME	-14,69	0,685 **	16	T
CR	68,5 10 ⁻⁴	ME	-7,85	0,821 ***	33	R et T
Ts	332,97	D	-103,35	0,841 ***	17	R
Ts	112,82	D	26,07	0,354 ns	16	T
Ts	230,65	D	-45,58	0,671 ***	33	R et T
Ts	45,7 10 ⁻⁴	ME	29,89	0,872 ***	17	R
Ts	49,9 10 ⁻⁴	ME	33,63	0,545 *	16	T
Ts	46,0 10 ⁻⁴	ME	33,80	0,707 ***	33	R et T
Ts	0,669	CR	37,55	0,896 ***	17	R
Ts	0,549	CR	50,46	0,680 **	16	T
Ts	0,654	CR	40,36	0,831 ***	33	R et T

Essais sur le peuplier (*Populus sp*)

L'échantillonnage

A l'issue d'un programme d'essai de flexion en 4 points sur des pièces de bois de peuplier aux dimensions d'emploi (section droite 100 x 35 mm²) le CETE de Bordeaux a mis à notre disposition un lot d'éprouvettes testées, à partir duquel le même type d'essai a été effectué pour des dimensions plus petites, de section droite 30 x 30 mm².

Comme pour le pin maritime, les essais de perçage sont conduits perpendiculairement aux cernes, dans la zone tendue de

portions intactes de ces nouvelles éprouvettes. Les expériences ont donné :

- contrainte de rupture (*CR*) : 55 MPa < *CR* < 100 MPa;
- module d'élasticité longitudinal (*ME*) : 8 000 MPa < *ME* < 16 500 MPa;
- la densité (*D*) : 0,32 < *D* < 0,54;
- le taux d'humidité (*H%*) : 12% < *H%* < 13%.

Les résultats

A la différence des observations relatives au pin maritime, le perçage du peuplier révèle une excellente correspondance entre

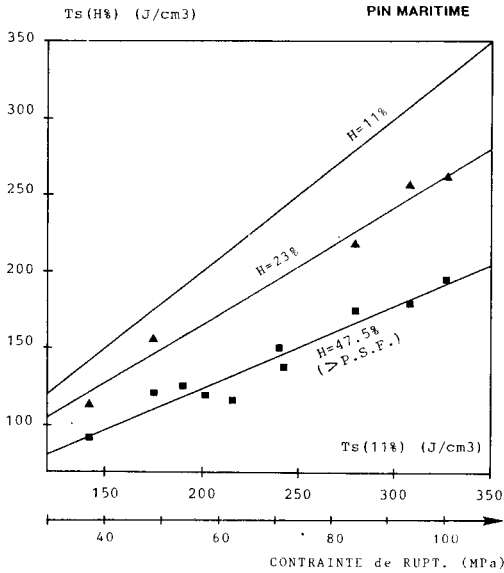


Fig 7. Relations entre mesures du critère de forabilité T_s pour des essais sur de mêmes échantillons de Pin maritime à divers taux d'humidité H%.

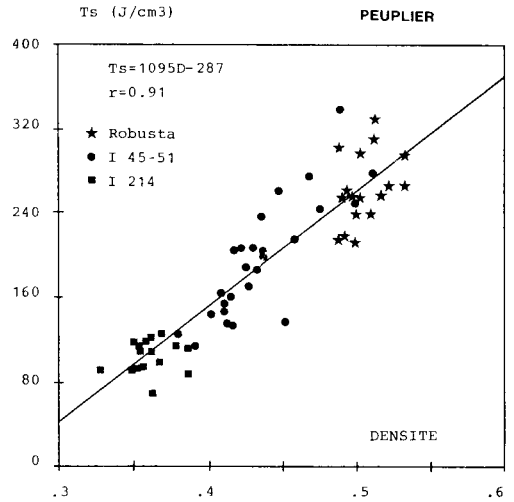


Fig 8. Relation entre le critère de forabilité T_s du peuplier et sa densité pour 3 clones différents.

le critère de forabilité de ce matériau et la densité (fig 8).

La relation entre T_s et la densité, à partir d'essais sur les éprouvettes préalablement soumises à un essai de flexion circulaire, est complétée par des essais de perçage sur de petits échantillons de densités variées. La densité est elle-même bien corrélée au module longitudinal comme le tableau II le montre.

Dans ce cas, les relations entre les diverses caractéristiques mécaniques du matériau offrent de meilleurs résultats que celles observées pour le pin maritime; on peut constater que critère de forabilité et densité sont tous deux reliés à la résistance dans le même ordre de grandeur (fig 9 et tableau II).

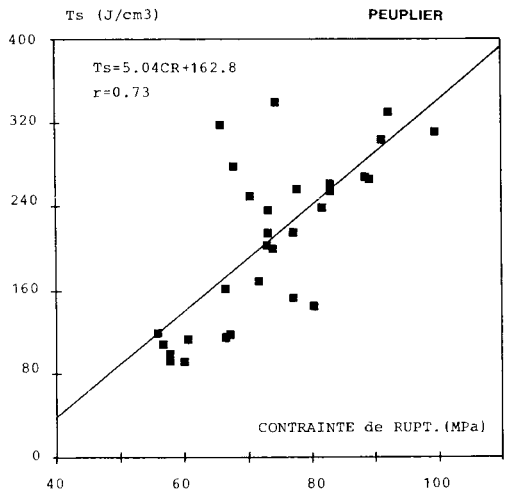


Fig 9. Relation entre le critère de forabilité T_s et la contrainte de rupture C_r pour des échantillons de 30 x 30 mm² de section.

Tableau II. Equations des droites de régression linéaire de la forme $Y = AX + B$ obtenues avec les caractéristiques mécaniques du peuplier et le critère de forabilité. D : densité; CR : contrainte de rupture (MPa); ME : module longitudinal (MPa); Ts : travail spécifique (J/cm^3); r : coefficient de corrélation; n : nombre d'échantillons testés; test significatif au seuil de 1%.

Y	A	X	B	r		n
ME	38 727,97	D	-4 199,10	0,958	***	22
CR	153,71	D	6,35	0,780	***	31
CR	$48,4 \cdot 10^{-4}$	ME	10,86	0,802	***	20
TS	1 129,04	D	-294,28	0,920	***	31
Ts	$29,56 \cdot 10^{-3}$	ME	-163,42	0,888	***	22
Ts	5,04	CR	162,81	0,731	***	31
Ts	1 094,73	D	-286,71	0,913	***	60

Essais sur le balsa (*Ochroma sp*)

Le balsa est connu pour sa faible densité qui varie dans une grande amplitude – 0,04 à 0,32 – selon sa provenance et par sa résistance mécanique qui est peu élevée dans l'absolu mais bonne rapportée à la très faible densité du bois (Easterling, 1982).

Ces essais ont été réalisés en complément d'une étude sur le comportement mécanique de bois de balsa de densité moyenne (0,15) à forte (0,30) entreprise par Castera (1988) au laboratoire.

Les perçages ont été effectués radialement sur 18 échantillons (11% de taux d'humidité). L'outil utilisé a un diamètre de 6 mm, sa vitesse de rotation était de 220 tr/min.

Le graphe de la figure 10, où sont représentés les points obtenus pour le perçage du balsa et du peuplier, présente l'évolution de Ts en fonction de la densité. Nous pouvons remarquer une continuité de cette évolution :

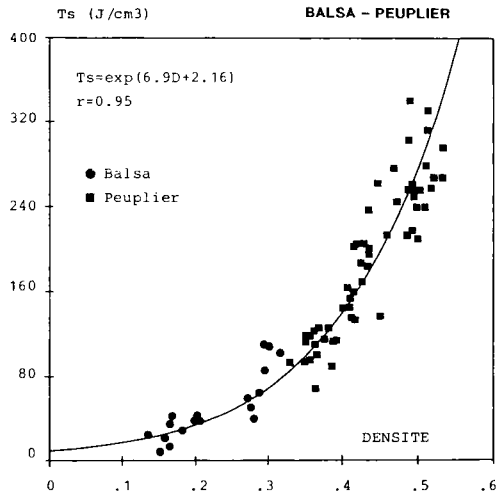


Fig 10. Évolution du critère de forabilité Ts en fonction de la densité du Balsa et du Peuplier.

– les 2 essais ont été réalisés dans les mêmes conditions (outil, vitesse de rotation, etc.),

– les 2 matériaux, relativement homogènes, sont de nature et de texture voisines.

De plus, la relation de type exponentiel obtenue offre une meilleure corrélation entre ces 2 termes qu'elle ne l'était pour des relations linéaires lorsque l'on considérait chaque bois séparément.

CONCLUSION

La réalisation d'un outil de mesure, le foramètre, et la mise en évidence d'un critère de forabilité T_s ont permis d'élaborer un procédé d'estimation de la qualité mécanique du bois; l'utilisation de ce procédé de reconnaissance est à la fois rapide, pratique et peu destructif.

Pour des raisons de commodité, la notion de la qualité mécanique du bois est souvent assimilée à la densité moyenne du matériau comme l'utilise Guitard (1986) dans son étude préliminaire du comportement du matériau bois.

Il est évident que les divers essais effectués sur le peuplier confortent cette notion : le tableau II révèle les excellentes relations entre les caractéristiques mécaniques du matériau et sa densité; mais ces relations sont aussi obtenues à partir de T_s : on a équivalence entre T_s et la densité (D) pour estimer la qualité mécanique du peuplier.

Par contre, les essais sur le pin maritime montrent que l'estimation de la résistance par T_s est meilleure que par la densité; en effet, les relations qui existent entre la densité et les autres caractéristiques mécaniques sont médiocres (tableau I). Cette estimation, si l'on considère le lot entier d'éprouvettes, a exactement la même qualité que celle établie par le module longitudinal (ME) (Stress grading) tout en étant beaucoup plus facile d'emploi.

Enfin, nous avons montré qu'il est possible de passer du perçage du bois «vert» (utilisation du foramètre en forêt) à la résistance du bois «sec à l'air» avec une bonne précision.

Les divers avantages que présente notre méthode, que ce soit sur du bois vert sur pied ou sur du bois d'œuvre (description des cernes annuels, évaluation de la résistance) font de ce procédé, face à des essais de laboratoire dont la mise en œuvre est souvent délicate, un excellent outil d'estimation des propriétés mécaniques du bois sans défaut en forêt ou dans l'industrie.

RÉFÉRENCES

- Castera P (1988) Identification d'une loi de comportement du balsa (*Ochroma* sp). Rapport interne, Laboratoire de Génie Civil, Bordeaux
- Delisée C (1985) Variabilité des propriétés du pin maritime. Thèse de l'université de Bordeaux I
- Easterling KE, Harrysson R, Gibson LJ, Ashby MF (1982) On the mechanics of balsa and other woods. *Proc R Soc London A* 383, 31-41
- Girard H (1985) Contribution à l'exploitation des paramètres de forage en Génie Civil. Thèse de l'université de Bordeaux I
- Gorlacher R (1987) Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein "in situ" Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 7, 273-278
- Guitard D, El Amri F (1986) Modèles prévisionnels du comportement élastique des bois massifs, feuillus et résineux. Le bois dans la construction, Colloque Scientifique International, Bordeaux
- Le Naour F (1988) Une méthode de reconnaissance du bois : le perçage. Thèse de l'université de Bordeaux I.
- Le Naour F, Morlier P. (1987) Reconnaissance mécanique du bois à partir de son perçage. *2^e Coll Sci Ind Bois*, Nancy

- Nepveu G (1979) L'utilisation du torsiomètre en forêt : influence de l'opérateur et de l'appareil. *Ann Sci For* 36, 347-351
- Nicholls JWP (1985) A new method for determining wood density in the standing tree. *Aust For Res* 15, 195-206
- Polge H (1971) Quelques conseils pratiques pour l'entretien et l'utilisation des tarières de Pressler. *Rev For Fr* 23, 273-278
- Thibaut B (1988) Le processus de coupe du bois par déroulage. Thèse d'Etat, université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier