

VÉRIFICATION DES THÉORIES SUR LA STABILITÉ DES LAMES DE SCIES CIRCULAIRES

par C. D. MOTE, Jr. (*)

SUMMARY

VERIFICATION OF SAW STABILITY THEORIES

The critical speed theory for circular saws predicts conditions of stability when a saw remains plane and cuts a straight path, and conditions of instability when the saw is no longer plane and no longer produces accurate cuts. This paper presents results of an experimental program on a production process which shows near perfect correspondence between the theoretical critical speed prediction and the measured product accuracy. The critical speed computation required measurement of the production blade temperature with a radiation thermometer and the product accuracy was independently evaluated as the standard deviation of the product thickness. The critical speed theory has direct application to both optimal design and optimal operation of circular saws.

RESUMEN

VERIFICACION DE LAS TEORIAS REFERENTES A LA ESTABILIDAD DE LAS HOJAS DE SIERRA CIRCULARES

La teoría de la velocidad crítica, aplicada a las hojas de sierra circulares, permite prever un campo de estabilidad en el cual la hoja permanece plana y puede efectuar un corte bien rectilíneo, y un campo de inestabilidad en el cual la hoja ya no es plana y no puede asegurar un corte preciso. Este artículo presenta los resultados del análisis de un proceso de producción que muestra una correspondencia casi perfecta entre lo que prevé la teoría de la velocidad crítica y los resultados de la medida de precisión del producto. Para poder calcular la velocidad crítica es necesario determinar, a partir de las radiaciones emitidas, la distribución de las temperaturas en la hoja durante el trabajo; la precisión del producto se evalúa de una manera completamente independiente en función de la desviación tipo y de sus variaciones de espesor. La teoría de la velocidad crítica puede ser utilizada también para mejorar tanto la concepción como las condiciones de empleo de las hojas de sierra circulares.

N. D. L. R. — Nous sommes heureux de publier, avec l'autorisation de l'auteur, cette communication présentée par Monsieur C. D. MOTE, en langue anglaise, au cours d'un séminaire sur l'usinage du bois tenu en décembre 1973 au Laboratoire des Produits forestiers de l'Université de Californie à Richmond.

INTRODUCTION

Le fonctionnement optimum des scies est une question d'un intérêt toujours croissant. D'un

point de vue assez large, la scie optimum est la scie la meilleure pour une opération particulière de coupe. La conception même de la scie et la définition de son mode d'emploi, doivent remplir cette condition. Il est implicite que chacun a une idée précise au sujet de ce qu'est la scie la « meil-

(*) Professeur au Département de Mechanical Engineering de l'Université de Californie-Berkeley.

leure » ou optimum pour son problème particulier. Par exemple, on souhaite minimiser la perte au trait, ou on souhaite réduire le temps où la machine est immobilisée par suite de panne, ou on peut être intéressé à porter au maximum le débit ou la durée de vie de l'outil ou toute autre combinaison de ces facteurs à définir. De façon générale, on peut diviser en trois chapitres le problème de la conception de la scie optimum : 1) l'objectif de conception, 2) les paramètres de conception et 3) les contraintes ou limitations dans la conception subies par ces paramètres. L'objectif est une mesure de qualité pour une conception particulière de scie, et on l'utilise pour comparer différentes conceptions. Communément, l'objectif aura la forme d'une expression mathématique qu'il faut maximiser. On doit entendre par là que cette expression mathématique ou « fonction objectif » prend une certaine valeur pour chaque conception et lorsque l'on compare deux conceptions, plus cette valeur est forte, meilleure est la conception. Les paramètres de conception sont en fait toutes les variables de conception du problème. Certains paramètres sont connus et on peut facilement agir sur eux, par exemple : vitesse de rotation, nombre de dents, géométrie de ces dents, nombre et géométrie des fentes et des trous, diamètre des flasques et diamètre de la lame, épaisseur et conicité de la lame, mais certains paramètres sont plus difficiles à spécifier de façon précise, par exemple : refroidissement ou échauffement de la scie, distribution initiale des contraintes dans la lame, c'est-à-dire tensionnage, guides lames, etc... Même avec cette simple liste abrégée d'exemples, on peut facilement se rendre compte que le nombre de conceptions et de spécifications de mode d'emploi possibles est infini.

Les contraintes de conception, qui constituent le troisième chapitre de notre problème d'optimisation, imposent des limitations provenant de la réalité physique et de la fonction de conception sur les variables de conception. Un exemple de contrainte physique est que l'épaisseur de la lame doit être supérieure en tout point à une certaine valeur minimum — on ne peut pas admettre une épaisseur négative —. Un exemple de contrainte imposée par la fonction de conception est que la différence minimum entre le diamètre de la lame et celui des flasques est imposée par la hauteur de coupe. Il n'est pas difficile de se rendre compte de ces contraintes ni de les introduire dans l'analyse. La contrainte imposée par la fonction de conception la plus difficile à introduire dans l'analyse en est une qui se présente dans tout problème de sciage, quel qu'en soit l'objet ou quel que soit le mode de sciage ; il s'agit de la planéité. La scie optimum doit demeurer plane pendant le travail si l'on veut obtenir une coupe droite et précise. Si le but de cette contrainte de planéité peut être évident, son

introduction dans toute conception proposée, satisfaisant déjà à toutes les autres conditions, peut être moins claire. C'est la pierre de touche dans le problème d'optimisation et c'est précisément le but des critères de stabilité, ils peuvent prévoir les conditions de stabilité ou de planéité pour la scie et les conditions d'instabilité ou de non planéité de cette scie.

En résumé, le problème de la conception est de définir une scie (choix des paramètres de conception) qui puisse produire des coupes satisfaisantes (satisfaction des contraintes de conception) et qui soit la meilleure possible pour l'utilisateur (optimisation de l'objectif). Dans une certaine mesure, chaque utilisateur d'une scie suit ce processus, mais la difficulté est qu'il est impossible d'étudier de nombreuses combinaisons des paramètres de conception en procédant par tâtonnement ou par une expérimentation détaillée. Ce problème ne peut que faire l'objet d'un compromis, du fait que certains paramètres sont difficiles à spécifier et à contrôler, c'est pourquoi il n'est pas facile d'effectuer des expériences précises. La méthode habituelle consiste à trouver un ensemble de valeurs des paramètres de conception qui semblent donner satisfaction, bien qu'elles ne soient visiblement pas les valeurs optima et d'en faire usage jusqu'à ce que l'on ne puisse plus les accepter. On détermine alors un autre ensemble de valeurs des paramètres et on répète le processus. C'est une bonne solution à court terme, mais le problème fondamental de la conception optimum n'est guère abordé par cette approche.

La clé du problème de conception est la contrainte de planéité ; il faut pouvoir prévoir la stabilité de la scie à partir des spécifications de conception et de mode d'emploi. Actuellement, on dispose de deux explications compatibles de l'instabilité de la scie, sous forme de modèles théoriques : l'un s'appelle le modèle à vitesse critique. Ces modèles ont retenu l'attention des chercheurs depuis des années, pendant lesquelles la recherche théorique et la recherche de laboratoire ont été orientées vers la discussion, la prévision et la vérification des phénomènes d'instabilité. On renvoie, pour la discussion de ces théories, aux références (1-6) en fin de cet article et on ne donne ici qu'un bref résumé de leurs conclusions :

Dans le modèle à flambement divergent, le bord périphérique de la lame affecte une forme harmonique ou ondulatoire qui est fixe par rapport à la scie et qui tourne avec elle. La scie flambe statiquement. Par exemple, si la scie dans son flambement, ne comporte qu'une onde complète avec un axe simple à la périphérie, il existe alors un diamètre de scie qui coïncide avec le diamètre stable d'origine. Ce diamètre bien défini constitue un diamètre nodal ou le lieu des points nodaux. On peut s'atten-

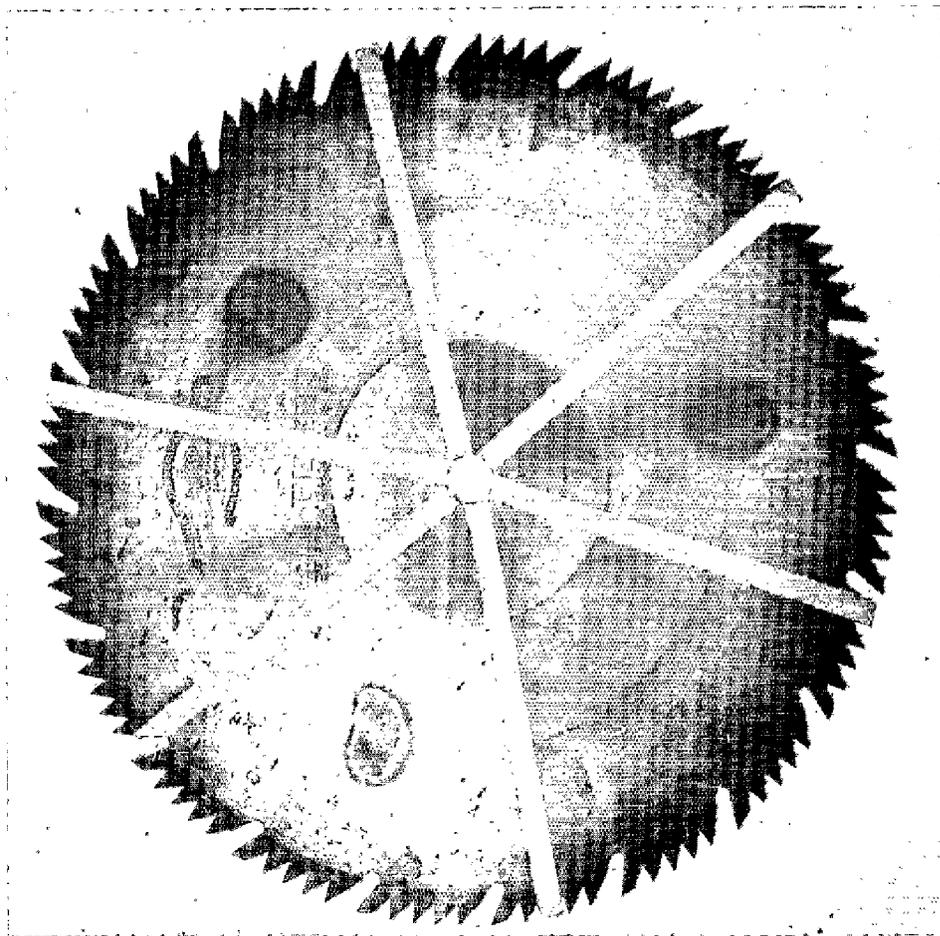


FIG. 1. — Mode de flambement à trois diamètres nodaux.
Les bandes sur la surface indiquent la position présumée des diamètres nodaux.

dre à ce que les types de flambement de la plupart des scies contiennent de 1 à 6 diamètres nodaux, suivant l'ambiance du travail, mais généralement, une scie de diamètre 400-500 mm présente un flambement du type à 3, 4, ou 5 diamètres nodaux (5). Par suite du flambement, les ventres qui se forment suivant le mode de flambement frottent souvent contre la pièce usinée, d'où échauffement par friction. Si la température locale dépasse approximativement 250 °C, des points bleus apparaissent à la surface. Un examen détaillé d'une telle scie révèle souvent que ces points sont disposés symétriquement comme le montre la figure 1. La trace à la surface de la scie indique la position approximative des trois diamètres nodaux qui semblent correspondre à son mode de flambement. Ce type d'instabilité peut être considéré comme une « instabilité finale » parce que (suivant la théorie des scies symétriques) elle se produit toujours après apparition de l'instabilité par vitesse critique. Les scies dissymétriques peuvent flamber aussi bien,

mais apparemment, elles ne donnent pas naissance à des ondes de forme stable de la même façon.

La question de savoir quel type de dissymétrie est suffisamment dissymétrique pour éviter l'instabilité par vitesse critique n'est toujours pas résolue. Lors de l'apparition de l'instabilité par vitesse critique, le déplacement de l'effort de coupe autour de la périphérie du disque met la scie en résonance en onde stable. Il s'agit d'une instabilité dynamique plutôt que de l'instabilité statique rencontrée dans le mode de flambement divergent. Dans ce cas, les diamètres nodaux ne sont pas fixes sur la scie, mais ils sont fixes dans l'espace et la scie symétrique tourne dans une configuration à diamètre nodal. Du fait que la scie est symétrique, tout diamètre est un diamètre nodal possible et on obtient facilement une excitation d'instabilité (1-5). Ces deux types d'instabilité peuvent se prévoir à partir des fréquences naturelles de la scie f_{nm} où n = nombre de diamètres nodaux et m = nombre de cercles nodaux du mode de vibration. Dans le

flambement divergent, le système est stable si

$$f_{nm} > 0 \quad (1)$$

pour tous les $n, m = 0, 1, 2, \dots$
et l'instabilité se produit si

$$\min. (f_{nm}) \rightarrow 0 \quad (2)$$

pour tous les $n, m \geq 0$
 n, m définit le mode de flambement statique.

Pour le mode à vitesse critique, le système est stable si les

$$f_{nm}/n > \Omega_{rot.} \quad (3)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$
pour tous les $m = 0, 1, 2, \dots$ où $\Omega_{rot.}$ est la vitesse de rotation de la scie.

L'instabilité se présente si

$$\Omega_{crit.} = f_{nm}/n \rightarrow \Omega_{rot.} \quad (4)$$

$\Omega_{crit.}$ étant la vitesse critique.

n = nombre de diamètres nodaux dans le mode à onde stationnaire, où la vitesse critique $\Omega_{crit.}$ est le minimum de f_{nm}/n pour tous les $n = 1, 2, 3, \dots$ et les $m = 0, 1, 2, \dots$

En comparant (2) et (4), il apparaît clairement que, dans les scies symétriques, l'instabilité par vitesse critique se produit avant l'instabilité par flambement divergent. La prévision de stabilité exige la mesure ou le calcul des fréquences caractéristiques de la scie f_{nm} .

Si $f_{nm}/n \gg \Omega_{rot.}$ pour tous les n, m , alors le système est stable avec la conséquence que l'on peut s'attendre à une bonne précision de coupe.

Si $f_{nm}/n \cong \Omega_{rot.}$ pour tout n, m , alors le système est instable, avec un déplacement transversal de la lame de grande amplitude, et on doit s'attendre à une précision inacceptable de coupe (7).

Toute modification de conception ou de mode d'emploi qui déplace les minima (f_{nm}/n) plus près de $\Omega_{rot.}$, diminue la stabilité de la scie et inversement.

Des procédés tels que la production d'auto-tensions par tensionnage et des effets thermiques peuvent être considérés comme procédés de réglage de la vitesse critique (5). Ces instabilités ont été mesurées en laboratoire et calculées théoriquement avec une bonne correspondance. Les déplacements du spectre de fréquence f_{nm} de la scie circulaire ont été mesurés et calculés et ils apparaissent responsables des variations observées de la stabilité de la scie. La conséquence en est que les variations de précision de coupe résultent directement des déplacements de la stabilité de la scie, mais on n'avait jamais pu le montrer précédemment.

Le maillon de raccordement entre la théorie et la pratique exige que la corrélation entre la stabilité théorique et la précision de coupe observée soit forte. Le but de cet article est d'offrir une discussion d'un programme de recherche conçu pour rechercher la corrélation entre la théorie de la vitesse critique et la précision de coupe dans un processus de production (7, 8).

EXPÉRIMENTATION

Tous les essais examinés ici ont été entrepris au Fosssum, Bruk Sag og Høvleri, près d'Oslo alors que l'auteur, en congé de l'Université de Californie, était l'hôte du Norsk Treteknisk Institutt. Le programme comportait deux opérations de mesures indépendantes. La première consistait à enregistrer les données nécessaires au calcul des fréquences caractéristiques f_{nm} de la vitesse critique $\Omega_{crit.}$ et

de la marge de stabilité $\Omega_{crit.} - \Omega_{rot.}$. La deuxième expérimentation consistait à examiner en même temps la précision du produit considérée comme une mesure de la stabilité apparente de la scie. Les résultats de ces deux mensurations indépendantes sont alors comparés pour déterminer s'il existe une correspondance entre la stabilité prévue et la stabilité apparente.

MESURES EN VUE DE LA PRÉVISION DE STABILITÉ

La plupart des variables nécessaires au calcul de la vitesse critique sont déterminées facilement et ne nécessitent aucune discussion. Il s'agit du diamètre des flasques et du diamètre de la lame, de son épaisseur et de sa conicité, des propriétés du métal, de la vitesse de rotation, des trous et des

encoches. Les paramètres plus difficiles à déterminer sont notamment : la répartition de la température, les contraintes initiales de tensionnage et la charge appliquée à la périphérie, ou effort de coupe.

La mesure de la distribution des températures dans la lame pendant le débit des bois est un pro-

blème important qui n'a pas été examiné précédemment, une description détaillée de ces mesures est donnée dans l'ouvrage indiqué à la référence (8). Une scie à refendre a été modifiée pour permettre de voir le diamètre horizontal de la scie pendant la coupe. Un appareillage d'exploration du rayonnement infrarouge appelé le Thermoprofil AGA Modèle THP=1 a été placé à 1 m de la scie expérimentale, face à la lame comme le montre la figure 2. Le système d'exploration balaye le diamètre horizontal à une fréquence de 16 Hz et mesure la radiation émise et réfléchi par une aire circulaire de 5 mm de diamètre sur la surface de la lame (fig. 3). Les surfaces des lames d'essais furent traitées à l'acide phosphorique pour augmenter le coefficient d'émissivité et diminuer les radiations réfléchies. Les évaluations de l'émissivité, faites au laboratoire, ont montré qu'après traitement, la surface se comportait presque comme un corps noir dans le spectre infrarouge. Le rayonnement réfléchi ne posait pas de problèmes et les variations du coefficient d'émissivité provoquées par des modifications de la surface au cours des essais, représentent une erreur inférieure à 2 % des températures mesurées. L'instrument fut étalonné pour toute la gamme des températures et l'on a tenu compte de la non-linéarité de l'étalonnage pour la correction des données. Les thermogrammes furent photographiés avec une caméra polaroïd à intervalles réguliers pendant l'essai (fig. 4). Les coordonnées d'environ 30 points par photographie furent perforées sur des cartes qui ont servi pour la correction automatique des données par ordinateur. Une table de température fut établie pour chaque photographie et l'ensemble de toutes les données d'un essai a servi à tracer un diagramme de référence.

Le tableau 1 donne la liste des lames expérimentales. Les sept premières lames — numéros 1 à 7 — ont été fabriquées spécialement pour ces essais. Les quatre lames plates — numéros 1 à 4 — ont été préparées pour être aussi identiques que possible. Sur l'une d'elles, on avait usiné 16 fentes périphériques de 26 mm, uniformément espacées, une autre a été tensionnée suivant une technique courante, à l'aide d'un tendeur à galet, après que les essais de la lame non tensionnée aient été achevés. Les trois dernières lames avaient un diamètre extérieur plus petit et différentes épaisseurs uniformes, elles ne comportent ni tensionnage ni fentes.

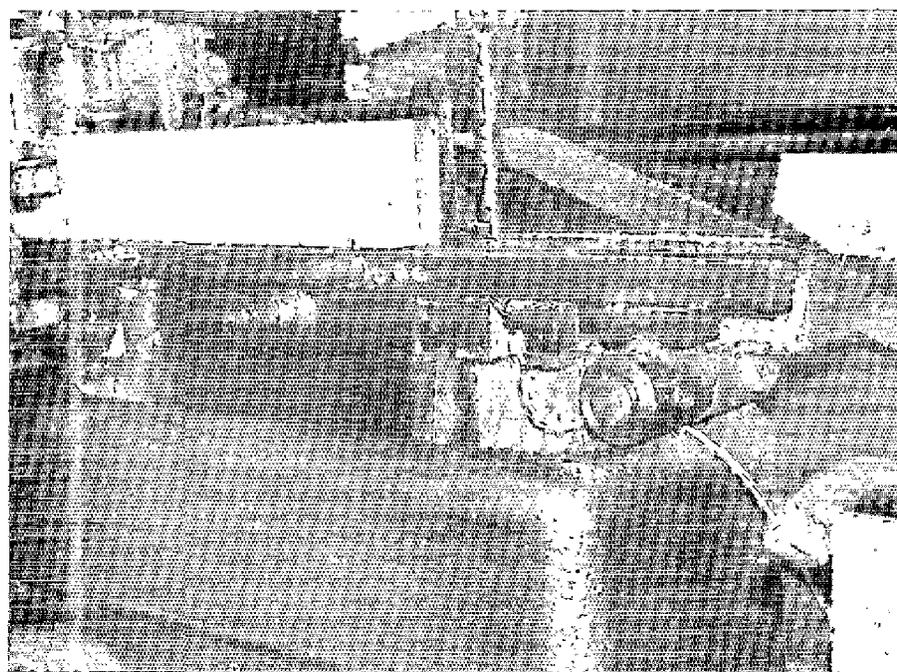
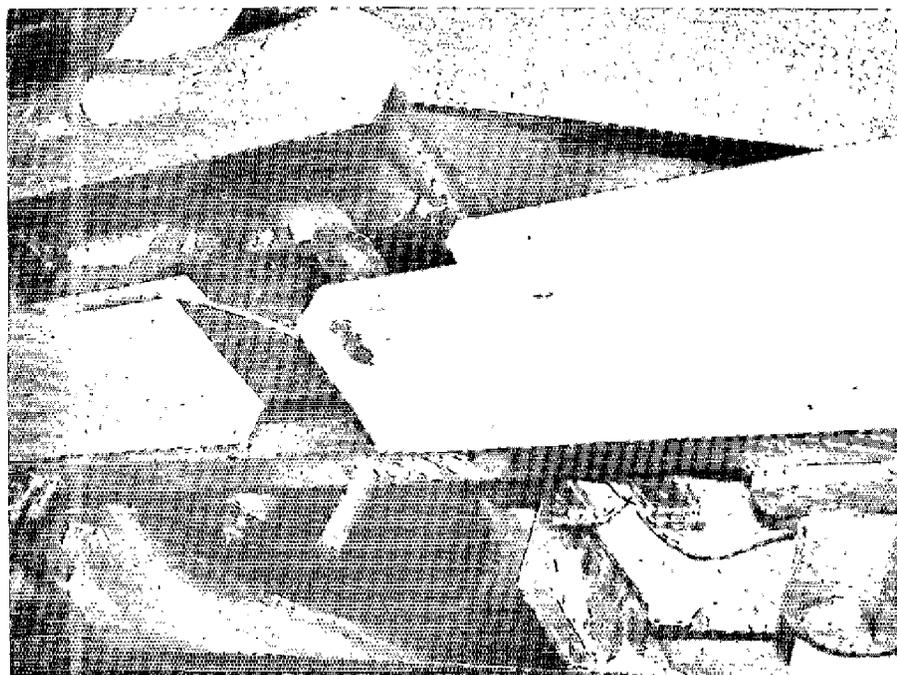


FIG. 2. — Installation expérimentale pour les mesures de température, montrant la ligne explorée par l'explorateur AGA et la modification de la scie.

Toutes ces lames furent préparées sans martelage et furent soumises à un traitement thermique après meulage pour éliminer toutes les autotensions. La dernière lame expérimentale — n° 8 — est un exemple de celles qui sont habituellement utilisées sur la scie. L'épaisseur est variable (presque linéai-

TABLEAU 1
SPÉCIFICATIONS RÉSUMÉES DES LAMES EXPÉRIMENTALES

Lame n°	Épaisseur en mm		Diamètre en mm		Remarques ²
	En fond de dent	Près des flasques	En fond de dent	Près des flasques	
1	2,06	2,06	483	140	Plate non tensionnée
2	2,07	2,07	482	140	Plate non tensionnée
2 T	2,07	2,07	482	140	Plate n° 2 tensionnée
3	2,02	2,04	483	140	Plate 16 fentes radiales de 26 mm
4	2,06	2,06	482	140	Plate non tensionnée
5	2,08	2,11	483	140	Plate non tensionnée
6	1,66	1,70	482	140	Plate non tensionnée
7	1,31	1,40	482	140	Plate non tensionnée
8	1,55	3,63	548	140	Conique avoyage par écrasement, tensionnée

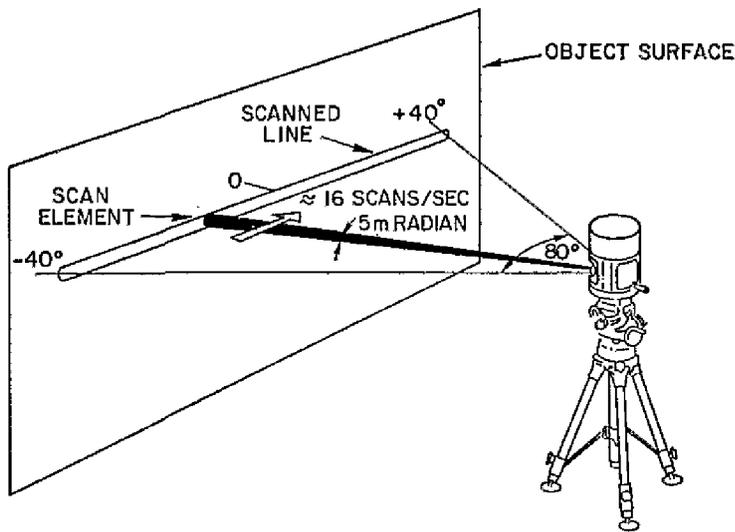


FIG. 3. — Schéma de la ligne balayée par l'explorateur A.G.A.

rement) et elle est tensionnée. Cette lame n'est pas utilisée dans l'analyse de stabilité, car son histoire n'est pas connue, mais on l'a incluse ici pour illustrer le profil de température très typique que l'on observe sur les lames d'épaisseur variable.

L'expérimentation fut réalisée de la façon suivante. On choisissait d'abord les conditions d'essai, puis on commençait à scier dans des conditions de production en assurant l'alimentation continue de planches de qualité tout venant. Après environ 2-4 mn, on constatait que les conditions de fonctionnement étaient pratiquement stables et la phase de saisie des données commençait. On sciait approximativement 100 m de planches tout venant et les températures étaient enregistrées à des intervalles de 30 s ou d'1 mn, suivant la vitesse d'amenage. Les valeurs des températures étaient corrigées et utilisées pour calculer la vitesse critique (2,5).

Le calcul fournit une estimation de la vitesse critique correspondant au moment où la mesure de la température est faite. Cependant, les valeurs de la vitesse critique obtenues en utilisant les différents profils de températures relevées pendant le même essai n'étaient pas significativement différentes en raison de la stabilité de la distribution des températures mesurées.

Les effets du tensionnage de la lame n° 2 T furent déterminés en mesurant les variations de la fréquence caractéristique de la lame résultant du tensionnage. L'effet du tensionnage est de déplacer vers le haut les fréquences critiques et, en conséquence, d'augmenter la vitesse critique. Comme les contraintes critiques sont radialement symétriques et puisque la répartition des nœuds de vibrations, avec ou sans tensionnage, sont presque identiques, on peut utiliser l'expression suivante pour introduire le tensionnage.

$$(f_{nm})_{sI}^2 = (f_{nm})_s^2 + (f_{nm})_I^2$$

$(f_{nm})_{sI}$ = fréquence naturelle en tenant compte de toutes les contraintes.

$(f_{nm})_s$ = fréquence naturelle en tenant compte de toutes les contraintes, à l'exception des autotensions induites par le tensionnage.

$(f_{nm})_I^2$ = correction éventuellement négative à apporter à la fréquence naturelle en raison du tensionnage.

Dans l'analyse $(f_{nm})_I^2$ est déterminé au laboratoire à partir des essais de résonance effectués avant et après le tensionnage. Cette valeur est utilisée avec $(f_{nm})_s$ calculé en fonction des conditions opératoires, pour donner le $(f_{nm})_{sI}$ total qui est utile pour faire des prévisions de stabilité.

Fig. 4. — Enregistrement typique de températures.

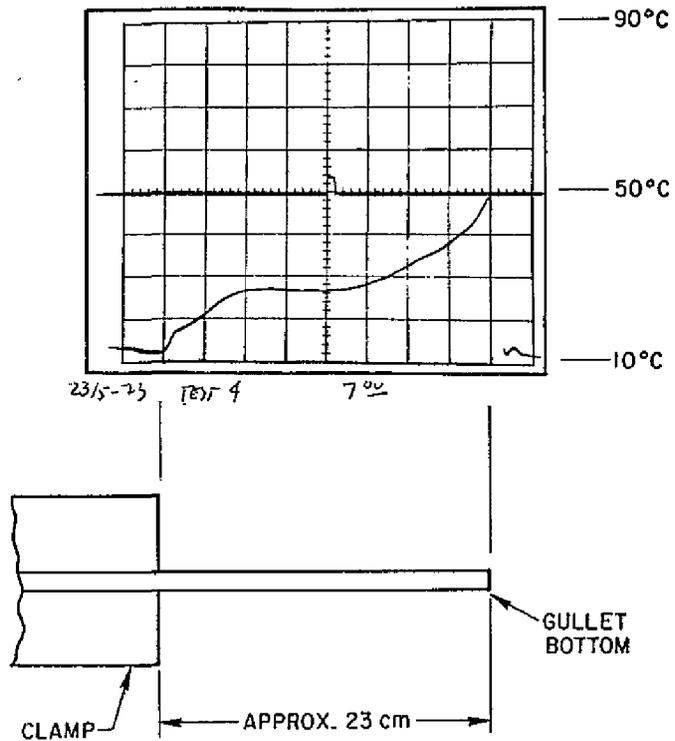
L'influence de la charge appliquée à la périphérie, ou effort de coupe sur la vitesse critique, n'est pas comprise dans l'analyse, car elle n'est pas connue. L'effet de cette charge périphérique sur la vitesse critique est présumé faible, comme dans toutes les recherches antérieures, mais on doit noter que cette affirmation n'est justifiée que par l'intuition. Une analyse plus détaillée des effets de la charge périphérique est nécessaire pour clarifier cette question.

EXPÉRIMENTATION POUR LA PRÉVISION DE LA PRÉCISION

Pendant la phase de saisie de données pratiquement stables, environ 20 pièces de 5 m ont été débitées sans interruption, sauf lorsque l'instabilité de la lame exige que l'on arrête l'essai avant qu'il ne soit achevé. On a utilisé pour la mesure de l'épaisseur des pièces d'essai un échantillonnage systématique en cinq points : au milieu, à 1,30 et 0,30 m de chaque extrémité. L'étude a montré que cette méthode d'échantillonnage est satisfaisante comme reproduction de la précision du sciage (9).

L'objectif ici était d'étudier la précision du sciage à partir d'une population de pièces standard et acceptables. Le problème consiste à obtenir cette population sans procéder à une élimination excessive des données ou de pièces du lot.

Tout d'abord, les échantillons qui appartenaient manifestement à une autre population (par exemple parce que fortement gauchis) furent enlevés du lot avant d'être sciés. Le nombre de pièces éliminées était inférieur à 1 % du nombre total des pièces débitées. Ensuite, quand tout le lot fut mesuré et analysé, des variances d'épaisseur au sein d'une même pièce qui étaient significatives à un niveau inférieur à 1 % par rapport à l'ensemble du lot, ont été considérées comme indiquant que la pièce appartenait à une population différente de la population normale et acceptable qui présente un intérêt. Comme on a utilisé une distribution binodale, dont les deux extrémités représentaient chacune 0,5 % les précisions de sciage supérieures et inférieures furent toutes deux considérées comme en dehors de la population normale. Si une pièce de caractéristiques supérieures est significative à un niveau de 0,5 %, une pièce sur deux cents seulement appartenant en fait à la population peut avoir cette qualité. Il semble plus probable que la pièce appartienne à une autre population. Le nombre des pièces éliminées du lot était en moyenne inférieur à une unité



par essai et n'a jamais dépassé deux pour un même essai. A un certain moment, on est obligé d'estimer ce qui dans la précision du sciage devient subjectif et dépend de facteurs tels que : la machine, le matériau, l'opérateur, les conditions de coupe, etc... Dans le cas présent, la norme de qualité a été établie en réalisant trois essais similaires avec des lames considérées actuellement comme excellentes, et en utilisant le même équipement et les mêmes produits.

Les intervalles de confiance au niveau de 95 % de l'écart type S_i des épaisseurs ont été pour ces trois scies :

$$0,39 \leq S_i \leq 0,53$$

$$0,57 \leq S_i \leq 0,78$$

$$0,41 \leq S_i \leq 0,55$$

En tenant compte du fait que l'intervalle de confiance de l'écart type est d'environ 0,2 mm, de ce que les trois lames étaient d'excellente qualité, et de ce que l'épaisseur de lame était d'environ 2 mm, les limites entre le produit acceptable et le produit inacceptable ont été estimées comme suit :

$$S_i < 0,5 \text{ mm} \text{ excellente,}$$

$$0,5 \text{ mm} < S_i < 0,7 \text{ mm} \text{ bonne,}$$

$$0,7 \text{ mm} < S_i < 0,9 \text{ mm} \text{ acceptable.}$$

Un résumé des 32 essais effectués est donné dans le tableau 2. Ces essais ont été choisis en vue d'apprécier la validité de la théorie de la vitesse critique

TABLEAU 2
RÉSUMÉ DES CONDITIONS D'ESSAI

Essai n°	Lame n°	Vitesse d'aménagement m/mn	Contraintes thermiques (*)
1	1	22	Non
2	1	29	Non
3	1	22	Oui
4	2	21	Non
5	2	26	Oui
6	2	30	Oui
7	2	39	Oui
8	2	25	Non
9	2	22	Non
10	3	18	Non
11	3	28	Non
12	3	25	Non
13	3	28	Oui
14	3	37	Oui
15	3	40	Oui
16	4	17	Non
17	4	40	Oui
18	2 T	19	Non
19	2 T	28	Non
20	2 T	39	Non
21	2 T	39	Oui
22	2 T	28	Non
23	5	18	Non
24	5	18	Oui
25	5	39	Oui
26	6	18	Non
27	6	18	Oui
28	6	39	Oui
29	7	18	Oui
30	7	39	Oui
31	7	18	Non
32	8	30	Non

. Vitesse de rotation nominale de la scie = 1.200 Tours/minute.
(*) Créées par friction ou par un autre mode de chauffage.

pour des lames tensionnées, non tensionnées, soumises à des contraintes thermiques intensionnelles-

ment créées, ainsi qu'à des lames avec fentes radiales.

DISCUSSION DES RÉSULTATS CONCERNANT LA TEMPÉRATURE

Certains résultats des mesures de température sont discutés indépendamment du thème de la stabilité, parce qu'en eux-mêmes ils constituent un sujet important. Pour plus de détails on se reportera à la référence 8 de la bibliographie de cette étude.

Tout au long des essais, il y eut trois descriptions générales de la température qui revinrent régulièrement. Des résultats typiques de chacune sont présentés dans les figures 5 et 7. Le premier cas (fig. 5) est un exemple typique de scie plate, dont la coupe est satisfaisante. Le gradient thermique au voisinage de la périphérie est plus faible que celui qui est prévu par la théorie, en raison de l'interaction entre les faces latérales de la scie et la pièce travaillée

(cette interaction a toujours été négligée dans les modèles théoriques). Il se révèle difficile de trouver un modèle qui rend compte avec précision de la relation entre la production de chaleur et le déplacement transversal de la lame et il en résulte une sérieuse limitation des possibilités d'analyse théorique. Pour un même essai, la distribution de la température s'est révélée stable en ce qui concerne le gradient et le niveau. La deuxième distribution typique des températures (fig. 6) correspond à la lame d'épaisseur décroissante n° 8. Ces distributions sont toujours plus stables et reproductibles que celles des scies plates car l'interaction de l'outil et de la pièce usinée est plus constante. La tempé-

De haut en bas :

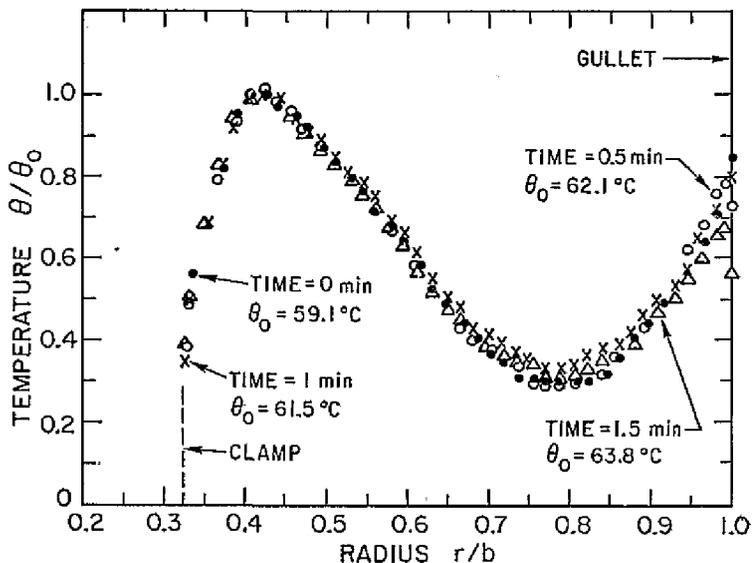
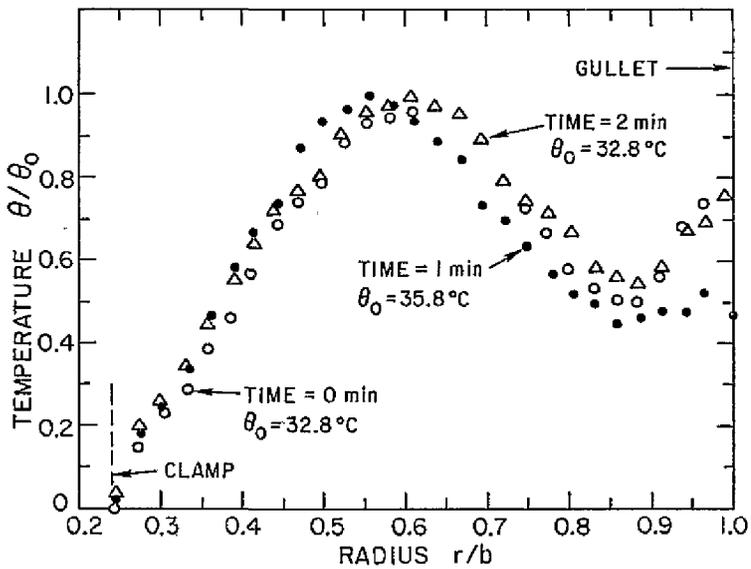
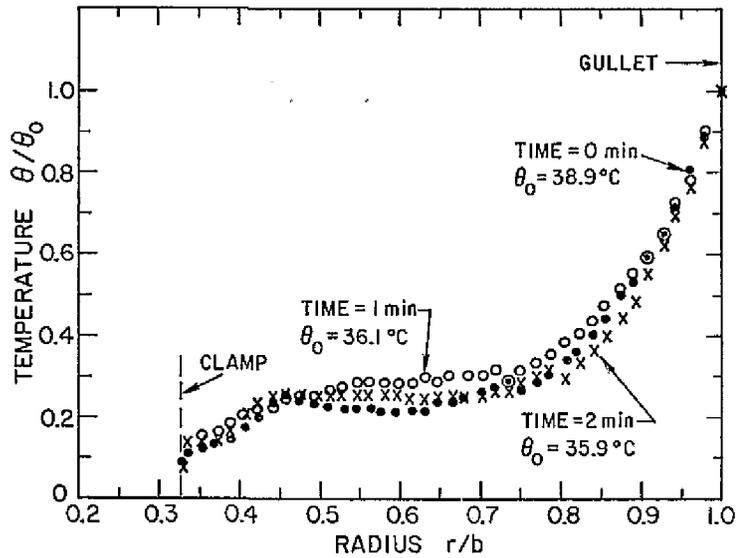
FIG. 5. — Distribution classique de température pour une lame plate.

FIG. 6. — Distribution classique de température pour une lame conique.

FIG. 7. — Distribution typique de température pour une lame chauffée au voisinage des flasques.

rature à mi-rayon atteint souvent un maximum ; Les difficultés à entreprendre une analyse thermique théorique sont évidentes. Le flux de chaleur est déterminé par le modèle de décroissance de l'épaisseur de la lame, son déplacement transversal et les caractéristiques de friction du bois et de l'outil. L'analyse et l'expérimentation indiquent toutes deux que la distribution des températures, telle qu'elle est représentée dans la figure 6, est préférable pour la stabilité de la lame à celle de la figure 5. La troisième répartition caractéristique des températures est présentée dans la figure 7, où un flux de chaleur près des flasques est provoqué à dessein, sur une scie plate, par friction. Cette classe de scie s'est révélée extrêmement stable quant au gradient et au niveau de température par rapport aux deux types précédents. Le flux de chaleur résultant de l'interaction entre la lame et la pièce masque souvent des effets subtils tels que des modifications de la forme des creux de dents ou de leur nombre, tellement la distribution de la température est essentielle pour le comportement de la lame. On peut s'attendre à ce que des modifications des caractéristiques de la lame, telles qu'une variation de sa conicité qui influence l'interaction, aient un effet important sur la température de la lame. Si des études de réponse dynamique des lames n'incluent pas cette genèse de chaleur par interaction, il ne faut pas s'attendre à ce qu'elles conduisent à des résultats directement applicables au sciage, car la réponse est beaucoup trop dépendante de la distribution de température.

Lorsque l'épaisseur de la lame est réduite, le rapport entre la surface de la lame et son volume augmente, ce qui entraîne une augmentation du transfert de chaleur



par convection de la surface de la lame vers l'air et des gradients thermiques plus élevés dans la lame.

Les contraintes thermiques deviennent plus sérieuses et les risques d'apparition de problèmes d'instabilité augmentent si l'on ne limite pas l'échauffement de la lame. La réduction de la rigidité en flexion est un problème compliqué lié à la

diminution d'épaisseur ; toutefois, ces gradients thermiques plus élevés permettent aussi de provoquer intentionnellement des contraintes thermiques élevées dans le but de contrôler la stabilité. On a pu montrer que cette technique est réaliste et raisonnable, elle mérite de faire l'objet d'une analyse poussée et d'être considérée à l'avenir.

DISCUSSION DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE STABILITÉ

Dans cette recherche, la principale question de stabilité concerne la possibilité d'appliquer la théorie de la vitesse critique à la prévision de la précision du sciage. La marge par rapport à la vitesse critique : $\Omega_{\text{critique}} - \Omega_{\text{rotation}}$ (Hz) est comparée à la précision S_1 (mm) pour l'ensemble des 25 essais concernant les lames plates sans fentes qui devraient toutes appartenir à la catégorie des problèmes de sciage qui relèvent de la théorie de la vitesse critique. On a analysé une ou deux distributions de températures dans chaque essai et ces résultats sont présentés dans le tableau 3. Les points sont portés figure 8 sur un diagramme de stabilité. La partie inférieure de cette figure, où $\Omega_{\text{critique}} - \Omega_{\text{rotation}} < 0$, est une zone d'instabilité théorique. Une condition de fonctionnement qui ferait apparaître un point dans cette région est présumée entraîner une précision faible, c'est-à-dire un S_1 important. Pour que la théorie de la vitesse critique soit acceptable, les points devraient se situer, ou bien dans la zone STABLE (théorie)-ACCEPTABLE (précision mesurée) notée SA et non hachurée, ou bien dans la zone INSTABLE-INACCEPTABLE (US-UA, doublement hachurée).

Les points qui apparaissent dans les zones STABLE-INACCEPTABLE ou INSTABLE-ACCEPTABLE (S-UA ou US-A simplement hachurés) signifient un échec de la théorie. Les résultats présentés à la figure 8 apportent un bon soutien à la théorie de la vitesse critique comme moyen de prévision de la précision du sciage. Même un déplacement de la limite de la précision acceptable pourvu qu'il reste raisonnable, disons entre 0,85 et 0,95 mm, ne modifie pas la conclusion. Les points qui représentent un échec de la théorie dans les zones US-A et S-UA sont peu nombreux et ne sont que très peu en dehors des limites. Quand on examine cette figure, il y a deux choses à considérer : d'abord la vitesse critique et la mesure de la précision sont des estimateurs indépendants parmi un grand nombre de facteurs. Ensuite, les mesures de la précision ne sont pas des confirmations directes de la théorie de la vitesse critique. Il aurait fallu mesurer expérimentalement la vitesse critique pendant le sciage, comme on l'avait fait au laboratoire (1, 2, 4, 5). Les mesures actuelles de pré-

TABLEAU 3
COMPARAISON ENTRE LA PRÉCISION
DU SCIAGE ET LA VITESSE CRITIQUE

Essai n°	Marge théorique de Stabilité (Hz) $\Omega_{\text{crit.}} - \Omega_{\text{rot.}}$	Mode vibratoire (n, m)	Ecart-type expérimental des variations d'épaisseur S_1 mm
1	+ 9,5	(2, 0)	0,76
2	— 9,4	(2, 0)	0,95
2	flambage	(2, 0)	0,95
3	— 1,0	(3, 0)	1,01
4	+ 1,9	(3, 0)	0,91
5	+ 10,6	(2, 0)	0,75
5	+ 7,0	(2, 0)	0,75
6	+ 6,1	(2, 0)	0,60
6	+ 12,5	(2, 0)	0,60
7	+ 7,1	(2, 0)	0,62
7	+ 3,0	(3, 0)	0,62
8	— 6,3	(3, 0)	> 1,0
9	— 3,9	(3, 0)	> 1,0
10	— 5,5	(3, 0)	0,85
11	+ 2,7	(3, 0)	1,16
12	+ 3,8	(3, 0)	1,07
13	— 0,5	(3, 0)	0,68
13	flambage	(3, 0)	0,68
14	— 1,05	(2, 0)	0,90
14	+ 11,0	(2, 0)	0,90
15	+ 16,9	(2, 0)	0,79
15	+ 17,0	(2, 0)	0,79
16	+ 0,60	(3, 0)	0,94
16	— 3,10	(3, 0)	0,94
17	+ 11,3	(2, 0)	0,57
17	+ 11,0	(2, 0)	0,57
18	+ 9,4	(2, 0)	0,47
19	+ 8,0	(2, 0)	0,53
20	+ 15,5	(2, 0)	0,48
21	+ 7,6	(2, 0)	0,41
22	+ 5,9	(2, 0)	0,52
23	+ 16,2	(3, 0)	0,77
24	+ 18,3	(3, 0)	0,51
25	+ 17,7	(3, 0)	0,59
26	— 0,9	(3, 0)	1,31
27	+ 22,8	(2, 0)	0,57
28	+ 18,9	(2, 0)	0,76
29	+ 24,9	(1, 0)	0,60
30	+ 22,0	(2, 0)	0,84
31	— 6,2	(3, 0)	2,53

sion sont entreprises pour vérifier si la théorie s'applique bien à la précision du sciage qui est probablement la question pratique la plus importante.

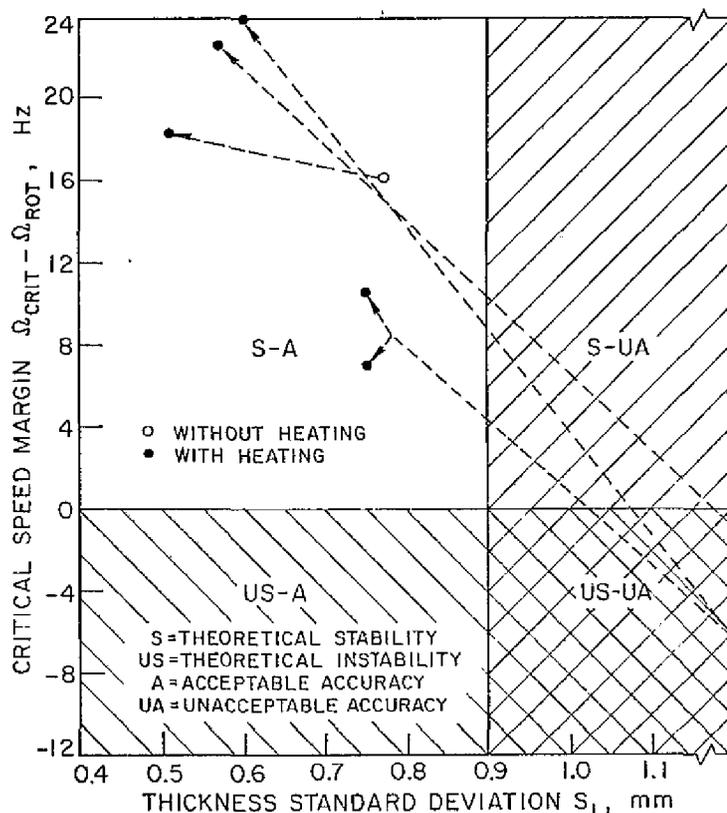
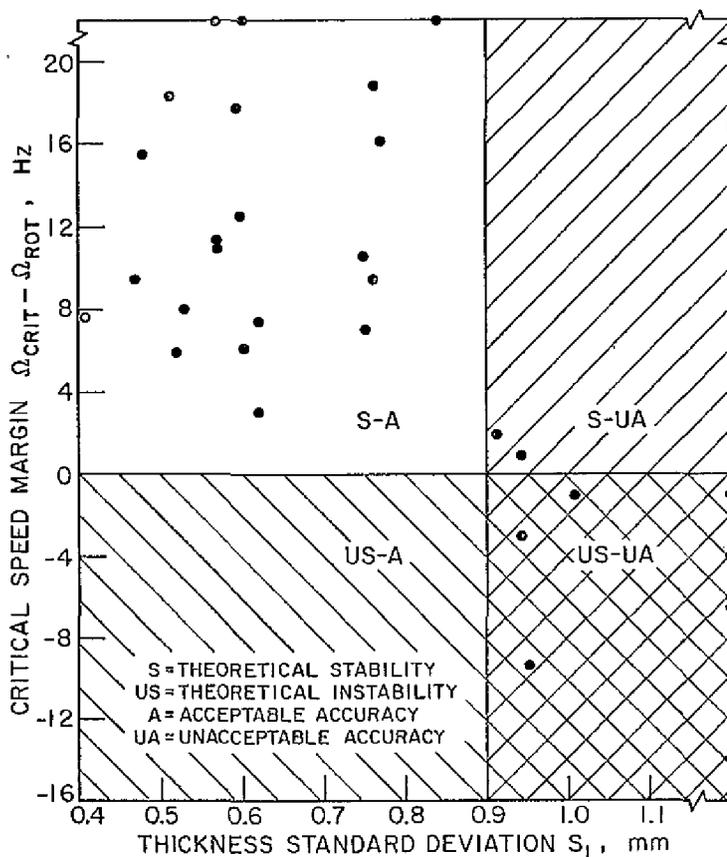
Une série d'essais a été entreprise pour évaluer l'efficacité d'une technique qui consiste à créer des contraintes thermiques pour augmenter la stabilité. Si la lame est chauffée au voisinage de l'arbre,

FIG. 8. — Diagramme de stabilité pour tous les essais de lames symétriques.
 Abscisse : Ecart-type des variations d'épaisseur en mm.
 Ordonnée : Marge par rapport à la vitesse critique, en Hz.

il en résulte une distribution de contraintes qui théoriquement devrait améliorer la stabilité de la lame ; cette technique a été utilisée dans les pays Scandinaves sous une forme dite « packing » et ses fondements théoriques ont pu être établis (cf. : Ref. 2-5-10-11-12). Sur la figure 9, les 4 cercles vides à l'extrémité droite des lignes en pointillés correspondent aux essais de 4 lames différentes dans lesquelles on n'a pas créé de contraintes thermiques ; les cercles pleins correspondent aux résultats pour ces mêmes lames toutes conditions égales, sauf modification des contraintes par apport de chaleur. Tous les points sont situés dans des régions telles qu'il y a accord avec la théorie de la vitesse critique. Dans chaque cas, la création de contraintes thermiques a amélioré la précision S_1 et elle a indépendamment augmenté la marge par rapport à la vitesse critique. Des lames qui n'étaient pas du tout utilisables, avec un $S_1 > 1,1$ mm, ont été transformées en d'excellents outils de coupe. Finalement, l'intérêt de cette étude sur la technique de chauffage ça n'est pas seulement qu'une amélioration de la précision du sciage ait été reconnue comme significative, mais c'est aussi que cette amélioration soit explicable dans le cadre de la théorie proposée. Les deux cercles pleins, qui sont reliés à un seul cercle vide, représentent les vitesses critiques calculées pour deux profils de température différents relevés au cours du même essai.

On a réalisé aussi une série d'essais pour apprécier la valeur de la

FIG. 9. — Diagramme de stabilité pour les lames chauffées au voisinage des flasques.
 Abscisse : Ecart-type des variations d'épaisseur en mm.
 Ordonnée : Marge par rapport à la vitesse critique en Hz.



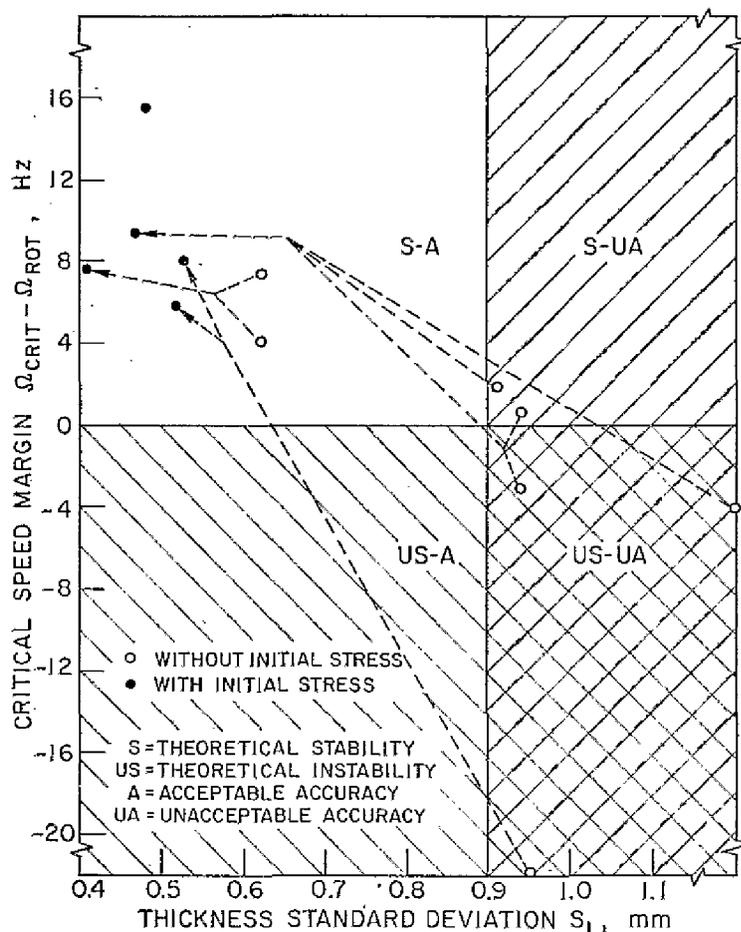


FIG. 10. — Diagramme de stabilité pour la lame tensionnée.

Abscisse : Ecart-type des variations d'épaisseur en mm.

Ordonnée : Marge par rapport à la vitesse critique en Hz.

théorie concernant les lames précontraintes, c'est-à-dire tensionnées. Les résultats de la figure 10 permettent de comparer les informations concernant trois lames non tensionnées et une lame tensionnée, toutes les conditions de coupe étant par ailleurs les mêmes. Le tensionnage améliore la précision du sciage. Le seul cercle plein auquel ne correspond pas de cercle vide correspond à une vitesse d'aménagement de 30 m/min, pour laquelle il n'a pas été possible d'utiliser une lame non tensionnée.

Les lames nos 5 à 7 étaient conçues par une méthode d'analyse pour être utilisées dans le cadre de cette étude. Le diamètre maximum a été réduit de 482 mm à 430 mm environ, ce qui pouvait suffire, compte tenu de la hauteur de coupe. La légère augmentation du rapport entre diamètre des flasques et diamètre de la lame est bénéfique, bien qu'un rapport plus élevé encore soit souhaitable. L'épaisseur d'une lame (n° 5) était approximativement celle des lames de référence (nos 1 à 4) et les deux autres présentaient des réductions d'épaisseur de 20 et 35 %. La réduction du diamètre augmente à la fois la vitesse critique et la précision comme l'indique ∇ et \circ dans la figure 11. Les lames plus minces symbolisées par Δ et \square , en l'absence de contraintes thermiques, présentent une instabilité théorique et une faible précision. Cependant, grâce à l'application de contraintes thermiques, les scies ont pu fonctionner avec un degré de précision acceptable. La méthode utilisée pour appliquer des contraintes thermiques n'est pas reproductible car la technique —

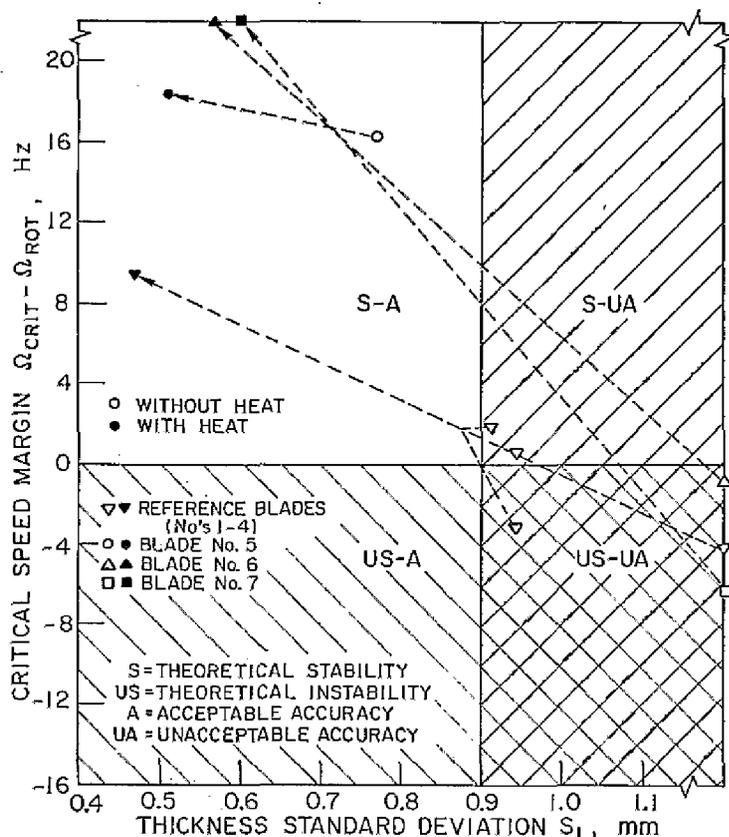


FIG. 11. — Diagramme de stabilité pour les lames d'épaisseur réduite.

Abscisse : Ecart-type des variations d'épaisseur en mm.

Ordonnée : Marge par rapport à la vitesse critique en Hz.

Fig. 12. — Diagramme de stabilité pour la lame garnie de fentes.

Abscisse : Ecart-type des variations d'épaisseur en mm.

Ordonnée : Marge par rapport à la vitesse critique en Hz.

production de chaleur par frottement — n'est pas contrôlable avec une précision suffisante. Les signes pleins ne peuvent donc être comparés entre-eux. On peut seulement conclure que :

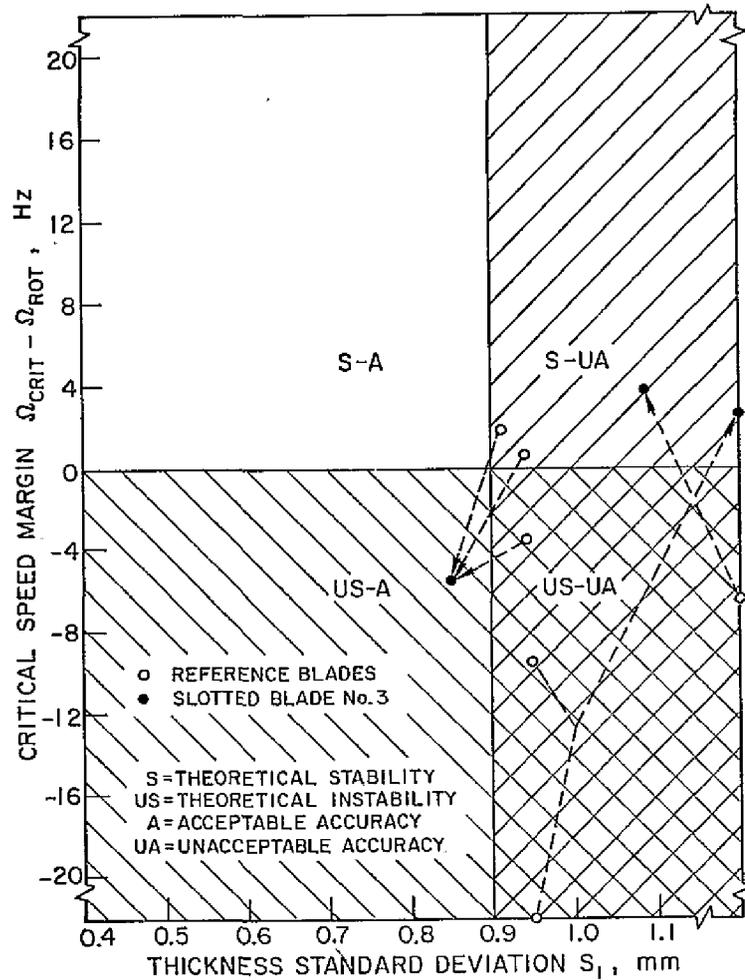
1) Une réduction de l'épaisseur de la lame d'au moins 1/3 est rendue possible par la création de contraintes thermiques. 2) L'augmentation du rapport diamètre-flasque/diamètre-lame améliore à la fois la stabilité théorique et la précision de sciage observée.

3) L'amélioration de la précision du sciage était dans chaque cas associée à une augmentation de la vitesse critique et

4) La théorie de la vitesse critique peut être utilisée pour prévoir la précision de sciage d'un nouveau modèle de lame.

L'analyse par la méthode de la vitesse critique a été aussi appliquée à la lame n° 3 comportant de grandes fentes radiales s'étendant jusqu'à la périphérie. La température a été mesurée suivant la méthode décrite plus haut et introduite dans l'analyse en supposant qu'elle présentait une symétrie radiale. La relation entre vitesse critique et précision obtenue pour cette lame est comparée, dans la figure 12, à celle obtenue pour des lames sans fentes, toutes les autres conditions étant équivalentes. Dans chaque cas, la précision de la lame garnie de fentes se révèle bien médiocrement prévue par la théorie, fait qui contraste nettement avec tous les résultats antérieurs. Les variations d'épaisseur et la vitesse critique croissent et décroissent simultanément en raison des fentes et la corrélation entre la théorie et l'observation est médiocre. Dans chacun des 25 essais précédents une augmentation de la vitesse critique était associée à une amélioration de la précision, mais ce n'est pas le cas ici.

L'explication la plus vraisemblable de ces résultats



est que la présente théorie n'est applicable qu'à condition que la lame et la distribution de température présentent une symétrie radiale. Tout rayon de la lame doit pouvoir s'identifier à un diamètre nodal. Une lame avec 16 fentes de 26 mm n'est pas suffisamment symétrique. La technique utilisée pour mesurer les températures ne peut s'appliquer qu'aux distributions radialement symétriques. C'est pourquoi on avait admis que la présence des fentes n'avait pas d'influence sur la symétrie radiale des températures. Ce qui est en fait apprécié ici c'est les limites des possibilités d'extension de la théorie en vue de son application. Manifestement, la présente théorie ne s'applique pas à ce type de lames et une théorie de la précision applicable aux lames non symétriques reste à proposer.

REMARQUES POUR CONCLURE

Dans l'analyse des lames à symétrie radiale travaillant dans des conditions pratiquement

stables, la théorie de la vitesse critique s'est révélée applicable à la prévision de précision du sciage.

Dans tous les cas étudiés, une variation de la vitesse critique a entraîné une variation correspondante de la précision du sciage. En modifiant la distribution des contraintes dans la lame, soit par tensionnement soit par apport de chaleur, il est possible d'améliorer la précision du sciage en augmentant la vitesse critique calculée. Pour les lames présentant une symétrie radiale insuffisante, telles que celles qui comportent des fentes radiales importantes, la théorie de la vitesse critique ne peut s'appliquer à la prévision de la précision du sciage.

L'importance pratique de ces résultats concerne à la fois la conception et l'utilisation des scies symétriques. Dans la phase de conception la vitesse

critique des lames de différentes conceptions possibles peut être calculée et le choix de la conception peut être fondé sur les prévisions de stabilité. En particulier, l'importance relative des paramètres de conception, tels que l'épaisseur et les diamètres en ce qui concerne la précision du sciage peuvent être calculés. De plus, il semble possible de prévoir dans quelle mesure on s'approchera en service de la vitesse critique en mesurant la réponse à des sollicitations transversales à l'aide d'un analyseur de spectre. Des actions correctives peuvent être entreprises si nécessaire et de cette façon le contrôle de la stabilité de la lame et de la précision du sciage par contre-réaction devient une réelle possibilité-

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. Charles BEROLZHEIMER de la CALIFORNIA CEDAR PRODUCTS COMPANY à Stockton ; Le Dr Herbert Mc KEAN de la POTLATCH CORPORATION à Lewiston (Idaho) ; M. Fred SOHN de la SUN STUDS Inc à Roseburg (Oregon) ; Mr. Robert HANSCOM de la HUDSON-LUMBER Co à San Leandro ; M. Warren BIRD de la CALIFORNIA SAW KNIFE AND GRINDING Inc. à San Francisco ; M. Henry P. SANDSTROM de la SIMPSON-TIMBER Co. Le Dr J. S. TAYLOR

de la Mc MILLAN BLOEDEL Ltd à Vancouver (Canada) ; Le Dr Wayne BENNETT de la WEYERHAEUSER COMPANY à Longview (Washington) ; L'INSTITUT ROYAL NORVÉGIEN POUR LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, le NORSK TRETEKNISK-INSTITUTT à Oslo (Norvège) et la Mc INTIRE STENNIS COOPERATIVE RESEARCH à Washington (D. C.) pour leurs nombreuses discussions et suggestions et la part prise au financement de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

1. MOTE (C. D.), Jr and NIEH (L. T.). — « On the Foundation of Circular Saw Stability Theory » (à paraître dans la Revue : Wood and Fiber).
2. LUTHER (T.), NIEH and MOTE (C. D.), Jr. — « Rotating Disc Stability-Spectral Analysis and Thermal Effects », Forest Products Laboratory Report, Univ. of California, July 1972, 137 pages.
3. MOTE (C. D.), Jr. — « Circular Saw Stability-Fundamental Considerations and Specific Research Results », Proc. Third Wood Machining Seminar, Forest Products Laboratory, Univ. of California, March 1971, 24 pages.
4. DUGDALE (D. S.). — « Stiffness of a Spinning Disc Clamped at its Centre » J. Mech. Physics Solids, Vol. 14, 1966, pp. 349-356.
5. MOTE (C. D.), Jr and NIEH (L. T.). — « Control of Circular Disc Stability with Membrane Stresses », Experimental Mechanics, Vol. 11, No. 11, Nov. 1971, pp. 490-498.
6. DUGDALE (D. S.). — « Effect of Internal Stress on the Flexural Stiffness of Discs », Int. J. Engr. Science, Vol. 1, 1963, pp. 89-100.
7. MOTE (C. D.), Jr and HOLØYEN (S.). — « Theory and Experiment on the Optimal Operation of Circular Saws », Norsk Treteknisk Institutt Medd. Nr. 48, Oslo 1973.
8. MOTE (C. D.), Jr and HOLØYEN (S.). — « The Temperature Distribution in Circular Saws During Cutting », Norsk Treteknisk Institutt Medd. Nr. 49, Oslo, 1973.
9. HOLØYEN (S.) and MOTE (C. D.), Jr. — « Research on Sawing Accuracy Measurement », Norsk Treteknisk Institutt Internal Report, Oslo, 1973.
10. MOTE (C. D.), Jr. — « Natural Frequencies in Annuli with Induced Thermal Membrane Stresses », Trans. ASME, 89 (B), Nov. 1967, 611-618.
11. MOTE (C. D.), Jr. — « Theory of Thermal Natural Frequency Variations in Disks », Int. J. Mech. Science, Vol. 8, 1966, 547-557.
12. MOTE (C. D.), Jr and ROKOWSKI (James E.). — « Thermally Induced Natural Frequency Variations in a Thin Disk », Exp. Mechanics, Vol. 9, No 1, 1969, pp. 1-8.