



HAL
open science

**Etude des contraintes de croissance Deuxième partie :
Variabilité en forêt des contraintes de croissance du
hêtre (*Fagus sylvatica* L.)**

J.-C. Ferrand

► **To cite this version:**

J.-C. Ferrand. Etude des contraintes de croissance Deuxième partie : Variabilité en forêt des contraintes de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.). *Annales des sciences forestières*, 1982, 39 (3), pp.187-218. hal-00882276

HAL Id: hal-00882276

<https://hal.science/hal-00882276>

Submitted on 11 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude des contraintes de croissance

Deuxième partie : Variabilité en forêt des contraintes de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.)

J.-C. FERRAND

*I.N.R.A., Station de Recherches sur la Qualité des Bois
Centre de Recherches forestières,
Champenoux, F 54280 Seichamps*

Résumé

On a étudié la variation des contraintes de croissance (déformation potentielle longitudinale ϵ_L) à la périphérie du tronc des hêtres en forêt.

En moyenne, la déformation est maximale du côté tendu et décroît très rapidement lorsqu'on s'éloigne de celui-ci. Dans un même peuplement ϵ_L augmente avec l'inclinaison du tronc, tandis qu'elle diminue légèrement avec la surface du houppier.

Le module d'Young longitudinal E_L varie comme ϵ_L du côté tendu, ce qui fait augmenter encore la contrainte longitudinale et la dissymétrie des déformations pendant le sciage pour les arbres les plus contraints.

Dans une même forêt, on a trouvé que les arbres à fibre torse possèdent sur la face tendue une déformation potentielle longitudinale ϵ_L 30 p. 100 plus forte que les arbres droits de fil, et un module d'Young E_L 20 p. 100 plus élevé. Cependant, ils ne renferment ni plus ni moins de fibres de bois de tension.

En comparant sur des peuplement âgés quatre types de station et deux traitements sylvicoles dans le Nord-Est de la France, on a montré que la déformation ϵ_L diminue fortement lorsque la surface moyenne du houppier augmente ; cette variation est continue pour des surfaces de houppier allant de 20 à 110 m² ! C'est par conséquent la sylviculture passée (et non pas la station) qui semble responsable des contraintes de croissance élevées de certaines forêts de hêtre.

On a montré dans le premier article de cette série comment et pourquoi les contraintes de croissance du hêtre (*Fagus sylvatica*) et du peuplier (*Populus sp.p.*) peuvent être estimées en mesurant le diamètre tangentiel d'une carotte de sondage, ou son retrait longitudinal (FERRAND, 1982 b) : lorsque la tension longitudinale présente à la périphérie du tronc est élevée, le diamètre tangentiel est faible et le retrait longitudinal fort.

Le but du présent article est d'étudier les variations (à 1,30 m au-dessus du sol) des contraintes de croissance du hêtre sous l'influence des paramètres suivants :

- position autour du tronc ;
- caractéristiques dendrométriques de l'arbre ;
- fibre torse ;
- type de station ;
- traitement sylvicole.

Les connaissances actuelles sur ces problèmes se résument en deux points : la déformation potentielle longitudinale est très variable autour du tronc et passe par un maximum aigu du côté tendu (1) (GUENEAU & SAURAT, 1974) ; deuxièmement, les contraintes sont moins élevées en taillis sous futaie qu'en futaie (GUENEAU & SAURAT, 1974, *op. cit.*), et dans ce dernier cas, elles diminuent lorsque l'intensité des éclaircies augmente (POLGE, 1981).

1. - Matériel expérimental et méthodes

Le matériel expérimental et les méthodes de mesure ont été présentés précédemment (FERRAND, 1982 b, *op. cit.*) et sont rappelés dans le tableau 1. Seules les mesures dendrométriques n'ont pas encore été décrites.

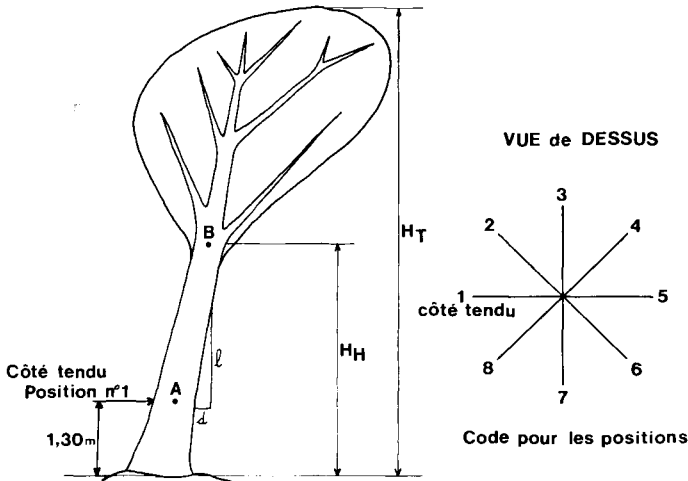


FIG. 1

Schéma des mesures dendrométriques, et code pour les positions autour du tronc
Diagram of tree dimensions measurements and code for positions around the stem,
the upper side being the reference

(1) Lorsqu'un arbre penche, on appelle côté tendu la face supérieure du tronc : position n° 1 sur la figure 1.

Il s'agit de la circonférence à 1,30 m ($C_{1,30}$) de la hauteur totale (H_T) et de la hauteur de la base du houppier (H_{II}). L'inclinaison du tronc est le rapport d/l (figure 1) où l vaut 2,50 m lorsque l'inclinaison est constante ; mais lorsque la tige est arquée, on est obligé de réduire l jusqu'à 1 m pour obtenir une estimation satisfaisante de l'inclinaison à 1,30 m. On a également mesuré les projections au sol du houppier dans 8 directions, à l'aide d'une équerre optique. Les positions des prélèvements de carottes et celles des mesures de houppier sont repérées ainsi : n° 1 pour le côté tendu, puis 7 rotations de 45° dans le sens horaire pour les numéros 2 à 8 (voir figure 1). Ces projections du houppier (HOUP1 à HOUP8) permettent de calculer la surface de la projection du houppier :

$$\text{SURF HP} = \frac{\pi}{8} \times \sum_{i=1}^8 (\text{HOUP}_i)^2$$

Dans certains cas, la largeur des cernes a été mesurée sur les carottes de sondage, depuis l'écorce jusqu'à 30 mm de celle-ci. Le volume de la grume a été estimé de manière très grossière en utilisant la formule fournie par L. SCHAEFFER (*in* ADRIAN, 1960) dans son barème à double entrée (circonférence, « hauteur corrigée »). Vu l'imprécision de cette méthode, elle n'a été utilisée que dans l'expérience n° 6 où un très grand nombre d'arbres est concerné, et on n'a prêté aucune attention aux valeurs individuelles de ce volume.

Enfin, dans certaines expériences, la fibre torse a été estimée selon une méthode qui sera discutée plus loin.

Tous les arbres sondés étaient dominants.

Dans la présentation des résultats, on utilisera les symboles habituels :

NS : non significatif ;

* : significatif au risque 5 p. 100 ;

** : significatif au risque 1 p. 100 ;

*** : significatif au risque 1 p. 1000.

2. - Variations dans l'arbre

2.1. Variation en fonction de la position autour du tronc

Dans tous les relevés qui ont été effectués, plus de 95 p. 100 des arbres avaient une inclinaison mesurable. C'est pourquoi le côté tendu (position 1) constitue une position de référence valable. Les expériences n°s 5 et 6 ont permis de comparer :

— sur 66 arbres, le côté tendu avec les positions 2 et 8 qui s'en écartent de 45° ;

TABLEAU 1
Présentation du matériel expérimental
Presentation of the experiments

Numéro de l'expérience	1	2	3	4	5	6
MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL						
Essence	hêtre	hêtre	peuplier	eucalyptus delegatensis	hêtre	hêtre
Lieu	laboratoire (simulation)	F.C. Epinal (Vosges)	Populetum national de Vineuil et F.D. Chambord (Loir-et-Cher)	Marysville vic. Australie	F.D. Lyons (Normandie)	Nord-Est de la France
Problèmes à résoudre	1 - 2	1 - 2 - 4	1 - 2 - 4	1	3 - 4	4 - 5 - 6
Modalités étudiées	traction longitudinale longitudinale tangentielle	arbres droits de fil arbres à fibre torse	3 clones			2 traitements 4 types de station 5 placettes 8 arbres par placette
Nombre total d'arbres	27	25	12	18	66	320
Nombre de carottes par arbre ...	2	2	2	1 ou 2	3	3
Nombre total de carottes	54	50	24	29	198	960
Position dans arbre ; hauteur (cm) (1)		1 ; 130 - 230	1 et 3 ; 130	1 et 3 ; 130	1, 2 et 8 ; 130	1, 5 et 7 ; 130
MESURES EXTENSOMÉTRIQUES						
Mesures extensométriques L et appareil (ε _L)	jauges	capteur	capteur	capteur	néant	néant
Mesures extensométriques T et appareil (ε _T)	jauges	néant	néant	néant	néant	néant

MESURES PHYSIQUES		3		1		1		4		1	
Diamètres tangentiel et axial, état saturé		5 - 15 ; 15 - 25 25 - 35		0 - 25		5 - 25		0 - 5 ; 5 - 15 15 - 25 ; 25 - 35		5 - 30	
— Nombre de zones		+		+		+		+		+	
— Coordonnées depuis l'écorce en mm		+		+		+		+		+	
Les mêmes diamètres, état sec à l'air (retraits RT et RL)											
Infradensité (Id)											
Densité RX											
Retrait radial (RR)											
Modules d'Young											
— EL											
— ET											
— ER											
Coefficients de Poisson											
— NU (LT)											
— NU (TL)											
MESURES ANATOMIQUES											
Gros rayons ligneux R											
Vaisseaux V											
Fibres normales N											
Fibres de bois de tension T											
Largeur des cernes											
MESURES DENDROMÉTRIQUES											
C _{L,30}											
H _T (hauteur totale)											
Hauteur de la base du houppier											
Inclinaison											
8 rayons du houppier											
Fibre torse											

(1) Position 1 : côté tendu ; positions 2 à 8 : rotations de 45° dans le sens horaire.

+ Mesures réalisées.

• Relevé approximatif

(+) Sur une partie des échantillons seulement.

TABLEAU 2

Diamètre tangentiel et retrait longitudinal des carottes prélevées dans différentes positions autour de l'arbre (voir figure 1)
Tangential diameter (TG) and longitudinal shrinkage (RL) of increment cores taken in several positions around the stem (see fig. 1)

	Expérience n° 5 - 66 arbres		Expérience n° 6 - 320 arbres	
	Valeurs en μm	Différences significatives	Valeurs en μm	Différences significatives
Diamètre tangentiel des carottes (valeur moyenne)	Position 1	4 892	Position 1	4 984
	Position 2	4 906	Position 7	5 001
	Position 8	4 903	Position 5	5 008
		1	2	1
		**		***
		*	N.S.	***
	Valeurs en %	Différences significatives	Valeurs en %	Différences significatives
Retrait longitudinal (valeur moyenne)	Position 1	0,42	Position 1	+ 0,24
	Position 2	0,16	Position 7	- 0,10
	Position 8	0,26	Position 5	- 0,17
		1	2	1
		***		***
		2		7
		8	N.S.	5

— sur 320 arbres, le côté tendu avec les positions 7 et 5 qui s'en écartent de 90 et 180° respectivement.

Le test statistique utilisé est celui des « moyennes appariées » (couples) dont la statistique est un aléa de Gauss. Les résultats sont présentés sur le tableau 2. (Note : deux tarières différentes ayant été utilisées, on ne peut comparer les valeurs des diamètres tangentiels entre ces deux expériences).

La position 1 (côté tendu) se différencie fortement des positions 2 et 8 situées à seulement 45°, mais ces deux dernières se ressemblent beaucoup, aussi bien pour le retrait longitudinal que pour le diamètre tangentiel des carottes. Lorsqu'on s'éloigne encore plus du côté tendu, les contraintes continuent de diminuer significativement, même si la différence est plus forte entre le côté tendu et la position 7 (à 90°) qu'entre cette dernière et le côté opposé au côté tendu (position 5). L'ensemble de ces résultats est synthétisé sur la figure 2 ; celle-ci donne une estimation de la répartition moyenne de la déformation potentielle longitudinale autour du tronc des hêtres, telle qu'elle ressort du tableau (1 158 carottes prélevées dans 386 arbres).

On doit remarquer que la contrainte longitudinale est généralement très faible du côté opposé au côté tendu, même dans les arbres les plus contraints. Il s'ensuit que la variabilité des contraintes est beaucoup plus faible en position 5 qu'en position 1, comme le montre le tableau 3.

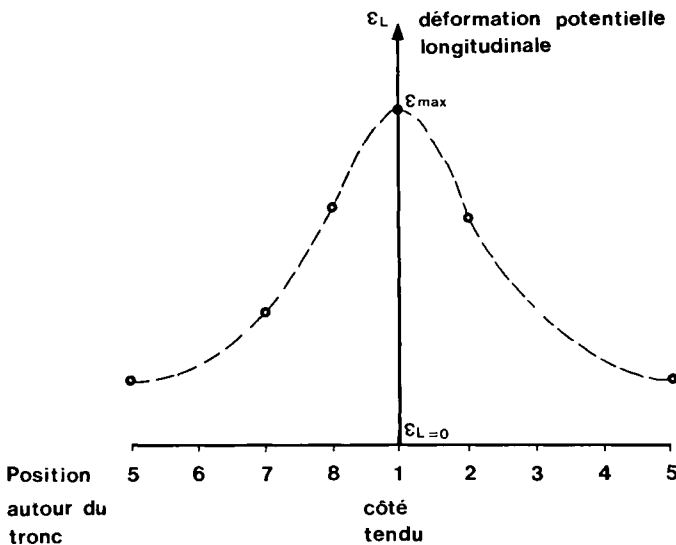


FIG. 2

Distribution moyenne (à la périphérie du tronc) de la déformation potentielle longitudinale du hêtre d'après les résultats du tableau 2
 ϵ_L vaut le plus souvent entre 300 et 2 500 10^{-6}

Mean distribution of the longitudinal growth strain of beech around the stem (from table 2).
 The value of ϵ_L is most often between 300 and 2 500 10^{-6}

TABLEAU 3

Expérience n° 6 : Ecarts-type du diamètre tangential et du retrait longitudinal
(Niveau arbre, 280 degrés de liberté)

Experiment n° 6. Standard deviation of the tangential diameter (TG)
and longitudinal shrinkage (RL) of increment cores
(at « error » level, 280 degrees of freedom)

	Position 1	Position 7	Position 5
Diamètre tangential μm	22,0	12,6	8,6
Retrait longitudinal %	0,39	0,32	0,24

2.2. Liaisons avec l'inclinaison

L'inclinaison ne se contente pas d'introduire une dissymétrie dans la répartition autour du tronc de la contrainte longitudinale. Elle fait également augmenter la valeur maximale de cette contrainte comme le montre le tableau 4. Son influence s'étend jusqu'à plus de 45° de part et d'autre, c'est-à-dire à environ un tiers de la circonférence.

TABLEAU 4

Corrélations ($r \times 1000$) entre l'inclinaison du tronc
et les variables qui mesurent les contraintes de croissance
Correlation coefficient ($r \times 1000$) between lean of the stem
and variables measuring growth stresses

	Expérience n° 2 47 degrés de liberté			Expérience n° 5 63 degrés de liberté		Expérience n° 6 Niveau arbre = 280 degrés de liberté	
	ε_L	TG	RL	TG	RL	TG	RL
Position 1	519***	-471***	501***	-332**	447***	-263***	217**
Position 2				-254*	220 NS		
Position 8				-286*	158 NS		
Position 7						-11 NS	73 NS
Position 5						73 NS	0 NS
Moyenne 1 + 7 + 5						-175**	158**

ε_L : Déformation potentielle longitudinale.
Longitudinal growth strain.

TG : Diamètre tangential des carottes.
Tangential diameter of the increment cores.

RL : Retrait longitudinal des carottes.
Longitudinal shrinkage of the increment cores.

Note

Dans l'expérience n° 2, on peut remarquer que les coefficients de corrélation diamètre tangentiel - inclinaison et retrait longitudinal - inclinaison sont du même ordre de grandeur que celui entre ϵ_1 et l'inclinaison.

2.3. *Liaisons avec les dimensions du houppier*

Les 8 projections du houppier permettent de se faire une idée de la forme et de la surface de celui-ci. Elles ont été mesurées avec comme origine l'axe du tronc à 1,30 m (point A sur la figure 1) ; c'est la méthode la plus simple, mais lorsque l'arbre est très penché (et qu'il ne se redresse pas à partir d'une certaine hauteur), la projection du houppier est tout entière déportée par rapport à l'axe du tronc à 1,30 m. C'est pourquoi, en toute rigueur, on pourrait prendre comme origine la projection au sol de la base du houppier (point B sur la figure 1). Cependant, on peut penser raisonnablement que l'erreur introduite ainsi sur la surface du houppier est faible.

Toujours est-il que tels qu'ils ont été mesurés, les rayons du houppier ne sont pas tous statistiquement égaux. En moyenne, il peut y avoir 1,50 m d'écart entre le rayon du côté tendu et celui du côté opposé. Le tableau 5 donne, à titre d'exemple, les résultats de l'expérience n° 5.

TABLEAU 5

Expérience n° 5 : Variation du rayon du houppier avec la position autour du tronc (test de moyennes appariées)

Experiment n° 5. Variation of the radius of the crown with the position around the stem (paired variables test)

Positions	1	2	3	4	5	6	7	8	1
Rayon moyen (mètres)	3,71	3,73	3,88	4,08	4,96	5,12	4,52	4,09	3,71
Différences non significatives (5 %)	-----				-----				

Il est normal que le rayon du houppier soit minimal en position 1 et maximal en position 5 ou 6 car si l'arbre penche vers la position 5, c'est souvent parce qu'il est gêné par un voisin du côté 1, et qu'il s'est développé vers le côté 5 où les voisins étaient plus éloignés. De plus, il se trouve dans cette expérience que la direction d'où viennent les vents dominants est peu éloignée de la position moyenne du côté tendu, ce qui ajoute une cause probable supplémentaire à la dissymétrie du houppier telle qu'elle a été constatée.

D'autre part, le tableau 6 montre que la surface du houppier possède aussi certaines corrélations avec les diamètres tangentiels des carottes ; une grande surface

de houppier peut faire diminuer le niveau de contraintes. Mais il n'apparaît pas clairement si cet effet s'étend à toute la circonférence ou bien s'il est localisé à une partie de celle-ci, et laquelle.

Il ressort de ces résultats que des mesures supplémentaires seraient nécessaires pour mieux connaître les relations qui lient la surface du houppier des hêtres et les contraintes de croissance à l'intérieur d'un même peuplement.

TABLEAU 6

*Corrélations ($r \times 1\,000$) entre la surface du houppier
et le diamètre tangentiel (TG) des carottes*

*Correlation coefficients ($r \times 1\,000$) between crown area and tangential diameter
of the increment cores*

Expérience n° 5 63 degrés de liberté		Expérience n° 6 niveau arbre : 280 degrés de liberté		
Position 1 (TG1)	214 NS	Position 1 (TG1)	190**	
Position 2 (TG2)	412***	Position 7 (TG7)	132*	
Position 8 (TG8)	199 NS	Position 5 (TG5)	71 NS	
Après reclassement des 3 valeurs de TG	Valeur la plus petite de TG (TG min)	Moyenne (TGM)	214***	
	Valeur intermédiaire de TG (TG méd)			
	Valeur la plus grande de TG (TG max)			

2.4. Liaison avec les modules d'Young

Dans l'expérience n° 2, où les trois modules d'Young ont été mesurés sur les carottes de sondage, il apparaît une corrélation assez forte entre la déformation longitudinale ϵ_L et le module d'Young longitudinal E_L : $r = 0,453^{**}$ (43 ddl). Si l'on ne considère en première approximation que l'équation ($\sigma = \epsilon E$), le résultat ci-dessus montre que la contrainte longitudinale σ_L augmente encore plus vite que la déformation ϵ_L , à cause de la liaison entre ϵ_L et E_L .

Cela constitue également un handicap supplémentaire lors de l'abattage et du sciage des bois fortement tendus ; en effet, on peut penser que les zones du tronc à faibles contraintes se déformeront d'autant plus qu'elles auront un module d'Young plus faible que celui des zones à fortes contraintes. Ce point mériterait d'être étudié plus en détail.

Note

Comme pour la liaison avec l'inclinaison (§ 2.2), la valeur absolue de la corrélation entre le diamètre tangentiel TG et E_L ($r = -0,430^{**}$) est proche de celle entre ϵ_L et E_L . Cela souligne bien l'intérêt de la méthode de mesure sur carottes de sondage.

2.5. Conclusion

Ces résultats confirment les connaissances antérieures sur la dissymétrie de la répartition de la déformation potentielle longitudinale ε_L , liée à l'inclinaison du tronc chez le hêtre. Ils révèlent de plus une augmentation de la valeur maximale de ε_L lorsque l'inclinaison augmente ⁽¹⁾. D'autre part, à l'intérieur d'un même peuplement, les arbres à houppier plus grand semblent avoir un niveau moyen de contraintes plus faible, même si la valeur maximale de ε_L (côté tendu) semble influencée par la seule inclinaison du tronc. Enfin, le module d'Young longitudinal E_L est plus élevé là où la déformation ε_L est elle-même plus forte.

Puisque plus de 95 p. 100 des hêtres rencontrés au cours de ces expériences ont une inclinaison mesurable, la répartition habituelle de la déformation potentielle ε_L est celle qui est représentée sur la figure 2. On peut en tirer trois sortes de conclusions :

1) Pour l'étude des contraintes de croissance à la périphérie du tronc, il faut systématiquement tenir compte de la position du côté tendu.

2) Pour la pratique sylvicole, les contraintes de croissance sont une raison supplémentaire d'éliminer les arbres très penchés.

3) Pour le sciage des grumes présentant un niveau de contraintes élevé, la dissymétrie de la répartition de ε_L et de E_L est une donnée à prendre en compte.

3. - Contraintes de croissance et fibre torse

Faisant remarquer que beaucoup d'arbres ont la fibre torse, ARCHER (1979) a calculé l'incidence dans un repère lié à l'axe du tronc du « changement d'axes » que constitue l'inclinaison du fil du bois. A la périphérie de la tige, il a montré que, à contraintes égales relativement au fil du bois, la tension dans l'axe du tronc diminue lorsque l'inclinaison du fil augmente, tandis que la compression « tangentielle » (mesurée perpendiculairement à l'axe du tronc) diminue et peut même devenir une tension.

3.1. Matériel et méthodes

Un des objectifs de l'expérience n° 2 était de vérifier l'hypothèse selon laquelle les arbres à fibre torse possèdent une déformation potentielle longitudinale *dans l'axe du fil du bois* (ε_L) supérieure à celle des arbres droits de fil. Cette hypothèse était le résultat d'observations antérieures réalisées par THIERCELIN (communication personnelle, 1978) sur le hêtre, et par FERRAND (1980) sur le châtaignier (*Castanea sativa*, Mill.) et le hêtre.

A cette fin, les mesures de ε_L ont été faites dans deux lots de 25 hêtres de la forêt d'Epinal (Vosges). Ces deux lots ont été constitués de telle sorte que dans l'un les arbres aient la fibre très torse, et que dans l'autre ils aient le fil le plus droit possible. De plus, on a choisi les hêtres dans les zones où le peuplement avait

(1) Une partie de cette augmentation peut être attribuée à l'action du poids de l'arbre sur la face supérieure du tronc, qui joue alors le rôle d'un hauban.

TABLEAU 7

Expérience n° 2 : Différences entre arbres droits de fil et arbres à fibre torse
Experiment n° 2. Differences between straight grained and spiral grained trees

Variables	Parcelles 63 et 40 : 2 × 25 hêtres					Parcelle 40 : 2 × 15 hêtres			
	Déformation ϵ_L	Fibre torse $\text{tg } \alpha \mid \times 100$	Module d'Young E_L MPa	Diamètre tangential IG	Retrait longitudinal RL	Déformation ϵ_L	Retrait longitudinal RL	Dimensions du houppier (rayons)	
							Position 4 HOUP 4	Position 5 HOUP 5	
Moyenne : arbres droits de fil	1 088 10 ⁻⁶ s.d.	3,16	10 070 MPa	4 910 μm	0,26 %	1 161 10 ⁻⁶ s.d.	3,36 m	3,82 m	
Moyenne : arbres à fibre torse	1 406 10 ⁻⁶ s.d.	12,78	12 160 MPa	4 908 μm	0,41 %	1 579 10 ⁻⁶ s.d.	4,39 m	4,90 m	
Test F	4,29*	45,3**	16,5**	NS	3,2 NS	4,78*	5,08*	4,15*	

un aspect homogène, et en respectant dans chaque lot la même répartition des circonférences et des inclinaisons à 1,30 m dans le but d'éviter un possible artefact.

La fibre torse a été mesurée sur le côté tendu (position 1) de la manière suivante : on a enlevé l'écorce sur environ 15 cm de haut et quelques centimètres de large ; puis on a tracé sur le bois un trait représentant le fil du bois en respectant la direction indiquée par la trace des rayons ligneux, qui est très apparente chez le hêtre. On traçait ensuite un second trait, en s'aidant d'un fil à plomb si l'arbre était dans un plan vertical, ou parallèlement à la direction locale du tronc si l'arbre était tordu. La valeur absolue de la tangente de l'angle α formé par les deux traits était retenue comme valeur de l'inclinaison du fil du bois ; le sens de cet angle était noté également. Cette méthode rapide est peu précise, mais l'objectif était seulement de constituer deux groupes de hêtres se distinguant nettement du point de vue de la fibre torse, et non pas de faire une mesure précise de cette dernière.

3.2. Résultats

On a mesuré toutes les variables qui sont portées dans le tableau 1, et réalisé un test de comparaison de moyennes (F) entre les deux populations pour chacune de ces variables. Une des deux parcelles où se trouvaient les arbres était en cours d'exploitation, et les mesures de houppier n'ont pas pu être réalisées ; c'est pourquoi, le tableau 7, qui présente les résultats, est divisé en deux parties.

Toutes les variables qui ne figurent pas dans le tableau 7 ne sont pas significativement différentes entre les deux lots. On note un accroissement de 30 p. 100 de la déformation potentielle longitudinale ε_L (1) pour les arbres à fibre torse. De plus, leur module d'Young longitudinal E_L (1) est 20 p. 100 plus élevé, ce qui permet de prédire une contrainte σ_L (1) multipliée par 1,55 environ. Cet accroissement énorme de la contrainte n'est pas dû à une modification de la proportion du bois de tension ou des vaisseaux, car les mesures anatomiques (réalisées selon les méthodes exposées par FERRAND, 1982 b, *op. cit.*) n'ont montré aucune différence entre les deux lots. Il semble donc qu'il s'agisse d'une propriété particulière des arbres à fibre torse. Cette observation permettra peut-être des progrès dans la compréhension des causes des contraintes de croissance.

D'autre part, l'influence néfaste de la fibre torse est confirmée par sa corrélation positive avec ε_L (1) : $r = 0,311^*$. De plus, la valeur de la fibre torse (du côté tendu) ne semble pas complètement indépendante de l'inclinaison du tronc ($r = 0,258$ significatif au risque 10 p. 100), mais des mesures plus nombreuses seraient nécessaires pour conclure. En outre, le fait que les arbres à fibre torse aient un houppier beaucoup plus développé du côté opposé au côté tendu (tableau 7), mais une surface de houppier non significativement différente, suggère deux réflexions :

1) Il est compréhensible que ces arbres déséquilibrés par un houppier très dissymétrique soient plus tendus sur la face supérieure du tronc.

2) La fibre torse, que l'on sait être sous contrôle génétique assez étroit chez

(1) Mesuré dans la direction du fil du bois.

le hêtre (BIROT *et al.*, 1980) semble aussi répondre à des facteurs environnementaux liés à la concurrence (taille du houppier, inclinaison).

Ainsi, cette expérience apporte une confirmation éclatante du fait que les hêtres à fibre torse possèdent des contraintes de croissance plus élevées que les hêtres droits de fil. Au cours de l'expérimentation, on a noté de plus que certains arbres avaient le fil très incliné du côté tendu mais droit (et même parfois incliné dans l'autre sens) du côté opposé ; on en trouve un exemple dans FERRAND (1982 a) et la même observation a été faite avec les peupliers (en particulier, *P. trichocarpa*) et avec *Eucalyptus dalrympleana*. Il serait particulièrement intéressant de mesurer les variations de la fibre torse d'une part, et de ϵ_L d'autre part autour du tronc, afin de chercher si ces variations sont concomitantes. Si tel était le cas, la fibre torse apparaîtrait comme un facteur très étroitement lié aux contraintes de croissance.

TABLEAU 8

Corrélations ($r \times 1000$) entre la valeur de la fibre torse et les rayons du houppier
Correlation coefficients ($r \times 1000$) between the value of spiral grain angle and radii of the crown

Rayon du houppier	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6	Position 7	Position 8
Expérience n° 2 30 arbres	— 76	123	195	403*	344	226	— 33	9
Expérience n° 5 30 arbres	541**	374**	32	— 181	— 440*	— 117	362*	496**

— Expérience n° 2 : fibre torse mesurée du côté tendu.

— *Experiment no. 2 : spiral grain measured on the upper side of the stem.*

— Expérience n° 5 : fibre torse mesurée dans une position variable, dépendant des facilités de mesure.

— *Experiment no. 5 : spiral grain measured in a variable position, depending of measurement facilities.*

Par ailleurs, le tableau 8 donne quelques corrélations assez étonnantes entre la valeur de la fibre torse et les 8 rayons du houppier ; mais on a vu que ces rayons ne sont pas répartis au hasard, et il serait nécessaire d'entreprendre une expérimentation spéciale pour étudier correctement la fibre torse et la forme du houppier en relation avec les conditions de concurrence.

Note

Dans cette expérience, le diamètre tangentiel des carottes se montre inapte à détecter la différence de déformation potentielle (tableau 7), ce qui est compréhensible puisqu'on sait qu'il varie surtout avec la proportion de bois de tension, qui est la même dans les deux populations. C'est plutôt la sensibilité du retrait longitudinal à la fibre torse qui est difficile à comprendre ! L'hypothèse la plus vraisemblable est que l'angle des microfibrilles de cellulose est différent chez les arbres à fibre torse, ce qui entraîne une différence de retrait longitudinal, en agrément avec les calculs de BARBER & MEYLAN (1964).

TABLEAU 9

Description des traitements sylvicoles et des types de station étudiés dans l'expérience n° 6
Silvicultural treatments and types of soil studied in experiment n° 6

Traitements sylvicoles		Types de station			
T	F	1	2	3	4
Taillis sous futaie	Futaie régulière	Rendzine (ou rendzine brunifiée) à mull calcaire	Sol brun calcique à mull eutrophe	Sol lessivé (ou brun lessivé) à mull mésotrophe	Sol brun acide à mull acide ou mull moder
Nature de la roche-mère					
		calcaire	calcaire	placages de limons épais	siliceuse (grès du Rhétien)

4. - Effets du traitement sylvicole et du type de station

L'expérience n° 6 avait pour but de mettre en évidence l'influence sur les contraintes de croissance du traitement sylvicole et du type de station. A cette fin, on a sélectionné quatre types de station bien représentés dans le Nord-Est de la France ; les mesures ont été faites dans des placettes expérimentales installées par le laboratoire de Phyto-écologie Forestière du C.N.R.F., sous l'égide de J. TIMBAL qui doit être vivement remercié ici.

Tous les peuplements étudiés étaient âgés, de sorte qu'on peut supposer que les relations de concurrence entre les arbres étaient définitivement établies ; d'autre part, les huit arbres de chaque placette étaient choisis de manière à respecter la répartition des diamètres à 1,30 m dans le peuplement.

Dans chaque type de station (voir tableau 9), on a utilisé cinq placettes en futaie et cinq en taillis sous futaie, huit arbres par placette, et trois prélèvements par arbre (positions 1, 7 et 5). Les mesures qui ont été réalisées sont portées dans le tableau 1 : elles concernent les diamètres des carottes, les retraits, l'infradensité et la largeur des cernes, ainsi que les caractéristiques dendrométriques. En tout, 960 carottes ont donc été prélevées dans 320 arbres.

4.1. Analyse de la variance

Dans un premier temps, les résultats ont été dépouillés selon les méthodes habituelles d'analyse de la variance. Les sommes de carrés ont été décomposées comme dans le tableau 10. On a testé les effets traitement, station, interaction traitement-station, et enfin « placette dans station ».

Note

En convenant d'appeler « cases » les huit combinaisons traitement-station, on peut tester l'hypothèse de différence nulle entre les cases grâce à un test $F_7 = (F_1 + 3F_2 + 3F_3)/7$, à 7 et 32 degrés de liberté. La valeur de F_7 est portée à la dernière ligne du tableau 11. Son intérêt apparaîtra lors de la présentation graphique des résultats. En effet, la façon la plus lisible de représenter l'influence du traitement et de la station est de placer sur un même axe les valeurs moyennes que prend une variable dans chacune des huit cases, et d'indiquer les différences significatives entre cases. Celles-ci sont testées grâce à un test de Tukey (avec 32 ddl, 8 populations, risque 5 p. 100, les différences supérieures à $4,58 \sqrt{\sigma^2}$ placette/40 sont déclarées significatives). Cette représentation (figure 3) n'est pas toujours celle qui prend le mieux en compte les résultats de l'analyse de la variance faite selon le tableau 10, mais elle a l'avantage d'être la même pour toutes les variables. De plus, ce niveau case (= un traitement donné sur un type de sol donné) est immédiatement « parlant » pour le lecteur.

L'examen du tableau 11 révèle un effet du traitement sur toutes les variables sauf l'inclinaison, le retrait tangentiel et la largeur des cernes. La station influence moins de variables : seuls la circonférence, la hauteur totale, la largeur des cernes, le volume de la bille, l'inclinaison, l'infradensité et le retrait tangentiel sont concernés. Enfin, il n'y a que trois fois interaction, et encore s'agit-il de trois variables très liées entre elles (circonférence, surface du houppier et volume de la grume).

TABLEAU 10

Expérience n° 6 : Analyse de la variance avec deux facteurs croisés (traitement et station) et deux facteurs hiérarchiques (placette, puis arbre)

Experiment n° 6. Analysis of variance with two crossed factors (silvicultural treatment and type of soil) and two hierarchical factors (plot, tree)

Ligne	Carré moyen au niveau	Degrés de liberté	Test F	et nombre de degrés de liberté
(1)	Traitement	1	F = (1)/(4)	1,32
(2)	Station	3	F = (2)/(4)	3,32
(3)	Interaction traitement-station	3	F = (3)/(4)	3,32
(4)	Placette	32	F = (4)/(5)	32,280
(5)	Erreur (arbre)	280		

Quant au niveau placette, il montre une très forte variabilité puisque seul le retrait longitudinal échappe à une influence significative. Ce fait est particulièrement remarquable. On peut lui attribuer de nombreuses raisons : au niveau « environnement », la définition d'un type de sol est loin de cerner toute la variabilité possible ; au niveau « sylviculture », futaie et taillis sous futaie recouvrent chacun une infinité de régimes d'éclaircie ; enfin, des placettes éloignées les unes des autres ont certainement entre elles des différences « génétiques » non négligeables. Ainsi, les trois sources de variation possibles sont présentes au niveau placette, et il n'est donc pas étonnant qu'on y constate une forte variabilité.

4.11. *Caractéristiques dendrométriques*

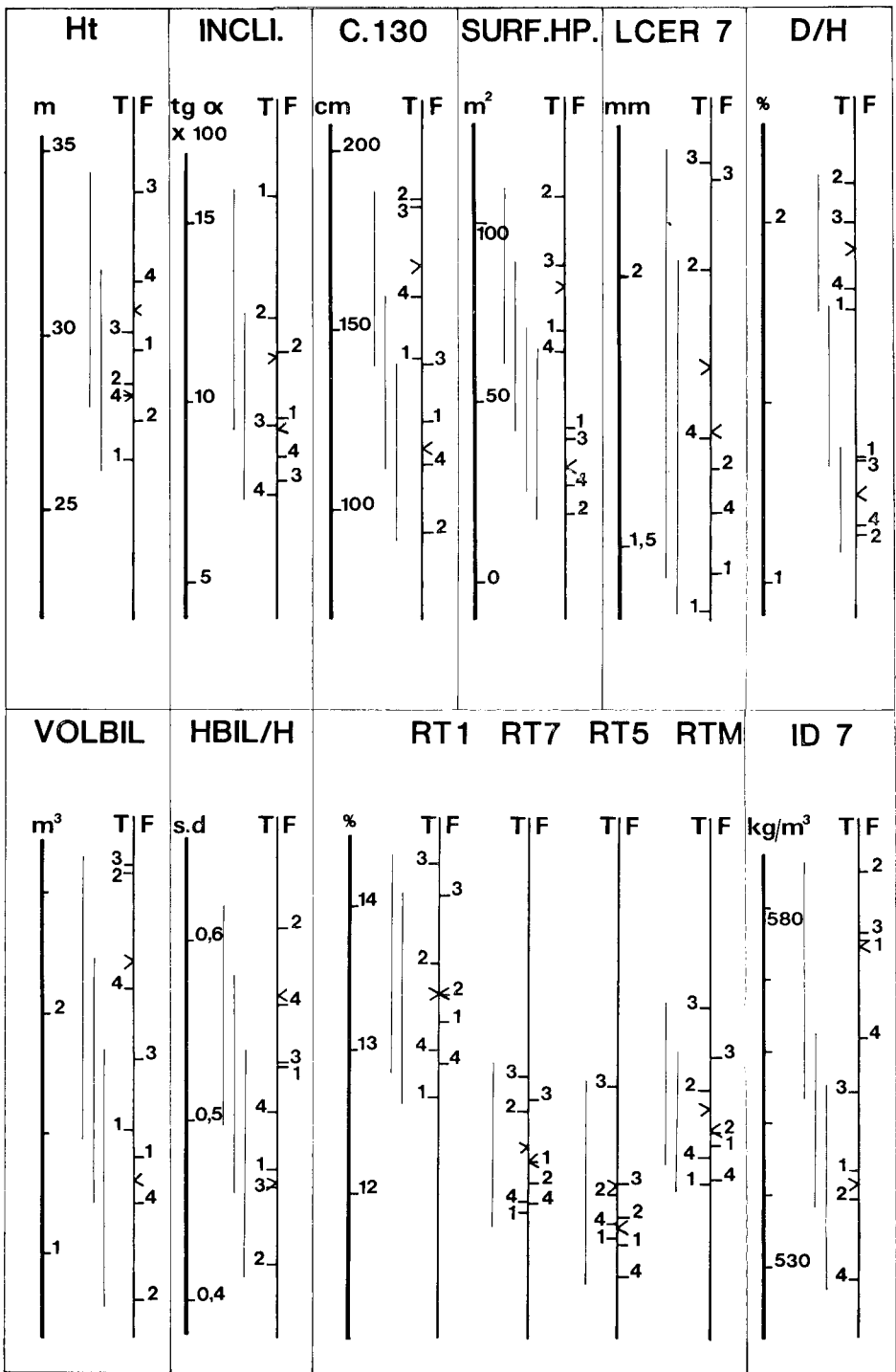
Le traitement a une influence énorme sur la plupart des caractéristiques dendrométriques : circonférence (C130), surface du houppier (SURF. HP), rapport D/Ht, hauteur de la grume (HBIL), rapport HBIL/Ht, volume de la grume VOLBIL et une influence moindre sur la hauteur totale Ht. Ces résultats étaient tous attendus et correspondent à la différence d'aspect entre les hêtres de futaie minces et élancés, et ceux de taillis sous futaie gros et courts. En revanche, on attendait moins l'absence de différence sur les largeurs de cernes et l'inclinaison. (La figure 3 confirme cependant que les inclinaisons les plus fortes se rencontrent en T.S.F.). Pour la largeur des cernes, il faut rappeler que ceux-ci n'étaient mesurés que dans les 30 derniers millimètres ; comme les coupes de T.S.F. sont pratiquées de moins en moins et que beaucoup de peuplements sont gérés en vue d'une future conversion, il est possible que la compétition soit quand même assez élevée dans les peuplements de T.S.F. De plus, les arbres sont âgés et leur vigueur est peut-être sur le déclin.

TABLEAU 11
Expérience n° 6 : Résultats de l'analyse de la variance (valeurs du test F)
Experiment n° 6. Results of the analysis of variance (F values)

Niveau	Caractéristiques dendrométriques									
	Hauteur totale Ht	Inclinaison INCLI	Circonférence C 130	Surface du houppier SURF.HP.	Largeur des cernes position 7 L CER. 7	Diamètre/ Hauteur D/Ht	Hauteur de la bille HBIL	HBIL/Ht	Volume de la bille VOLBIL	
Traitement	4,99*	NS	46,2**	46,9**	NS	90,1**	22,9**	23,0**	25,3**	
Station	3,45*	5,54**	3,07*	NS	7,69**	NS	NS	NS	3,23*	
Interaction	NS	NS	4,34*	3,40*	NS	NS	NS	NS	3,65*	
Placette	23,4**	1,70*	4,69**	5,17**	2,68**	4,52**	4,69**	2,77**	4,65**	
Case	2,70*	3,93**	9,78**	8,72**	3,72**	14,5**	4,15**	4,68**	6,54**	

Niveau	Estimation des contraintes de croissance									
	Diamètre tangentiel des carottes					Retrait longitudinal				
	Position 1 TG 1	Position 7 TG 7	Position 5 TG 5	Moyenne TGM	Position 1 RL 1	Position 7 RL 7	Position 5 RL 5	Moyenne RL M		
Traitement	22,1**	6,47*	NS	11,74**	11,56**	NS	NS	7,11*		
Station	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
Interaction	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
Placette	3,43**	7,25**	11,18**	9,44**	NS	NS	1,69*	NS		
Case	4,17**	NS	NS	NS	2,64*	NS	NS	2,82*		

Niveau	Propriétés physiques du bois									
	Infradensité Position 7 ID 7	Retrait tangentiel			Retraits en position 7			Diamètre axial moyen des carottes AX M		
		Position 1 RT 1	Position 7 RT 7	Position 5 RT 5	Moyenne RT M	Radial RR 7	Volumique RV 7			
Traitement	43,7**	NS	NS	NS	NS	5,82*	NS	NS		
Station	3,47*	6,85**	3,16*	3,36*	5,12**	NS	NS	NS		
Interaction	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
Placette	2,21**	1,68*	2,20**	2,32**	3,10**	1,56*	2,20**	22,1**		
Case	8,05**	NS	NS	3,19*	2,48*	NS	NS	NS		



Mais l'explication principale se trouve dans l'effet station qui est plus fort sur la largeur des cernes que sur toutes les autres variables. L'examen de la figure 3 montre que cette largeur n'est pratiquement pas affectée par le traitement dans la station 1 (la moins fertile) et dans la station 3 (la plus fertile). En revanche, dans les stations 2 et 4, de fertilité intermédiaire, les cernes sont beaucoup moins épais en futaie qu'en T.S.F. Finalement, il faut retenir surtout les différences entre stations : la largeur des cernes augmente dans l'ordre des stations 1, 4, 2, 3, tout comme la fertilité.

4.12. *Contraintes de croissance*

Les contraintes de croissance peuvent être estimées grâce au diamètre tangentiel TG et, à un moindre degré, grâce au retrait longitudinal RL. On voit dans le tableau 11 que ces deux indicateurs donnent un très fort effet traitement en position 1 (côté tendu), et pas d'effet station. Dans la position intermédiaire (n° 7), le diamètre tangentiel est encore influencé par le traitement, mais plus faiblement, tandis que le côté opposé (position 3) ne subit aucune influence significative (sauf au niveau placette, voir § 4.1). Les variations du côté tendu sont cependant suffisantes pour que l'effet traitement subsiste sur la moyenne des trois positions (TGM et RLM). La figure 4 montre le sens de ces variations : les contraintes de croissance sont beaucoup plus élevées en futaie qu'en taillis sous futaie. Cela confirme le résultat obtenu par SAURAT & GUENEAU (1974, *op. cit.*) sur un échantillonnage très différent. Il ne faut pas redouter une influence parasite de l'inclinaison des troncs sur ce résultat puisque la différence d'inclinaison entre les deux traitements est, d'une part non significative, et d'autre part défavorable au taillis sous futaie (figure 3). Ainsi par exemple les stations 1 et 2 de T.S.F. ont à la fois les contraintes les plus faibles (1) et l'inclinaison la plus forte de tout l'échantillonnage.

Il est intéressant de noter qu'aucun effet station n'apparaît.

4.13. *Propriétés du bois*

Le tableau 11 et la figure 3 montrent aussi les résultats relatifs à l'infradensité (2) (en position 7) et aux retraits.

L'infradensité est fort influencée par le traitement, et vaut en moyenne 40 kg/m³ de moins en taillis sous futaie qu'en futaie. Cet écart est énorme et montre que la mauvaise réputation faite au bois de hêtre des peuplements de futaie n'est pas dénuée de fondement, au moins pour les contraintes de croissance et l'infradensité. En revanche, l'influence du traitement est faible sur les retraits radial et longitudinal, et surtout non significative sur les retraits tangentiel et volumétrique, ce qui infirme absolument l'opinion répandue selon laquelle les bois de futaie sont beaucoup plus « nerveux » que ceux de T.S.F.

(1) Rappel : quand les contraintes de croissance sont fortes, TG est petit et RL est grand.

(2) Les valeurs d'infradensité, retrait radial et largeur de cernes nous ont été aimablement communiquées par J.-P. PREISS qui en est vivement remercié.

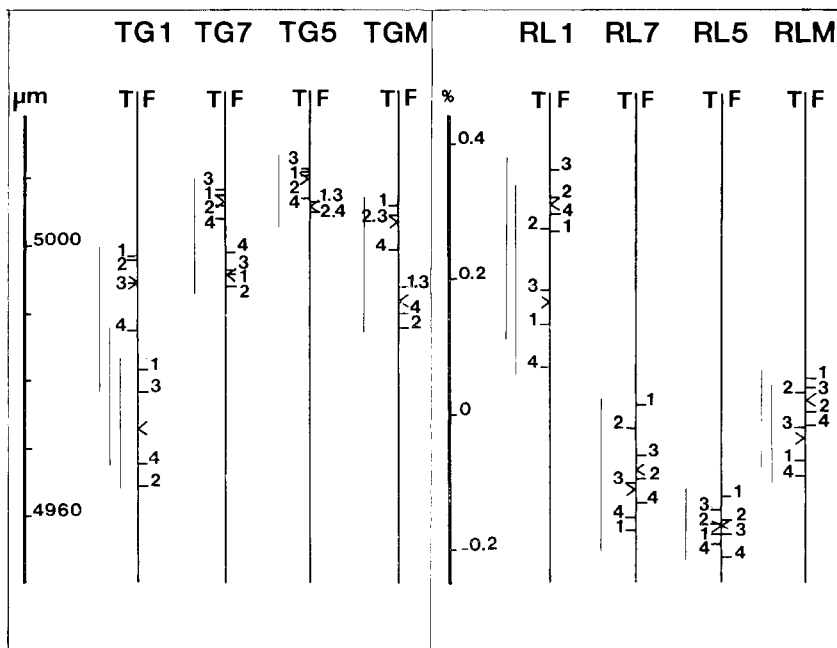


FIG. 4

Expérience n° 6 : Résultats (suite de la figure 3)

Experiment n° 6. Results (Continuation of fig. 3)

L'influence de la station ne manque pas d'intérêt non plus puisqu'elle s'exerce sur l'infradensité et le retrait tangentiel (dans les trois positions et la moyenne) qui augmentent tous dans l'ordre des stations 4, 1, 2, 3. Ainsi, une autre réputation est injustifiée, qui veut que les hêtres sur sol silicieux aient un bois lourd et « nerveux » : c'est tout le contraire qui est vrai !

On doit remarquer encore que la position 1 possède un retrait tangentiel bien plus élevé que les positions 7 et 5 (respectivement 1,1 et 1,5 p. 100 de plus). Cela souligne que le retrait tangentiel, aussi bien que les contraintes de croissance (voir § 2.1) sont très variables autour du tronc des hêtres. Le bois est donc de beaucoup plus mauvaise qualité du côté tendu, et va en s'améliorant à mesure qu'on s'approche du côté opposé.

4.2. Corrélations

Les résultats ci-dessus sont déjà très intéressants pour la pratique forestière ; néanmoins, on peut tirer encore plus d'informations pratiques de l'étude des corrélations entre les caractères de qualité d'une part et « dendrométriques » d'autre part. Celles-ci sont résumées dans le tableau 12 et ont été étudiées à trois niveaux (cf. tableau 10 et § 4.1) :

TABLEAU 12
 Corrélations ($r \times 1\ 000$) entre propriétés du bois et variables dendrométriques
 Correlation coefficients ($r \times 1\ 000$) between wood properties and dendrometric variables
 at the three levels of the hierarchical analysis

		Variables dendrométriques									
		Ht	INCLI	C 130	SURF HP	LCER 7	D/Ht	HBIL/Ht	VOLBIL		
Contraintes de croissance	TG 1	— 343	445	861**	923***	216	921***	— 955***	775*		
		— 244	37	280	213	156	533**	— 386*	113		
		99	— 263***	251***	190**	111	252***	— 106	219***		
	TG 7	— 352	369	833**	873**	222	908***	— 871**	754*		
		— 237	166	199	111	103	405*	— 297	42		
		38	— 11	158**	132*	103	160**	— 164**	88		
	TG 5	— 333	540	829**	908***	313	895**	— 918***	742*		
		— 250	278	154	84	85	372*	— 178	133		
		120*	73	160**	71	206***	139*	— 34	172**		
	TGM	— 353	450	872**	932***	237	938***	— 953***	785*		
		— 271	163	243	160	133	497**	— 333	106		
		122*	— 175**	294***	214***	183**	290***	— 156**	245***		

Propriétés du bois	ID 7	395	— 179	— 703*	— 731*	— 16	— 796*	727*	— 636
		— 97	205	— 478**	— 319	— 445**	— 453**	259	351*
		— 59	82	— 252***	— 202***	135*	— 269***	38	— 230***
	RTM	441	— 277	561	407	927***	383	— 346	640
		— 232	175	64	162	— 9	259	— 61	374*
		110	61	92	108	341***	— 52	— 47	101
	RLM	482	— 149	— 148	— 154	286	— 306	134	— 79
		— 117	82	— 110	143	266	— 40	157	— 91
		— 59	158**	— 42	— 2	156**	— 24	— 15	— 65
	RR 7	— 4	— 16	— 622	— 562	— 178	— 613	607	— 581
		— 60	30	— 17	— 41	— 26	13	21	— 33
		— 204***	— 47	— 210***	— 175**	— 218***	— 162**	62	— 210***
RV 7	468	— 240	333	239	733*	148	— 204	417	
	— 198	115	6	88	— 32	154	— 18	287	
	6	28	16	57	243***	16	21	21	

1. Ligne du haut : niveau « case », 7 degrés de liberté.
Top line : 7 degrees of freedom (level called « case » in french - see text).
2. Ligne du milieu : niveau « placette dans case », 32 degrés de liberté.
Middle line : 32 degrees of freedom (« plot within case » level).
3. Ligne du bas : niveau « arbre dans placette », 280 degrés de liberté.
Bottom line : 280 degrees of freedom (« tree within plot » level).

- le niveau « case » (corrélations « inter » pour les 8 cases, conformément à l'usage, on fixe le nombre de degrés de liberté à 7) ;
- le niveau « placette dans case » (corrélations « intra » ; 32 ddl) ;
- le niveau « arbres dans placette » (corrélations « intra » au niveau « erreur », c'est-à-dire 280 ddl).

4.21. *Contraintes de croissance*

On remarque que les coefficients de corrélation significatifs se rencontrent surtout aux niveaux case et erreur, et très rarement au niveau placette. On peut donc faire les mêmes remarques qu'au § 4.1 à propos de la forte variabilité « placette ».

Pour les contraintes de croissance, le diamètre tangentiel des carottes montre qu'elles sont très influencées par un ensemble de paramètres tous liés à la grosseur de l'arbre. Ainsi les contraintes diminuent lorsqu'augmentent la surface du houppier, le rapport D/Ht, la circonférence ou (à un moindre degré) le volume de la grume, ou bien que diminue le rapport HBIL/Ht. La figure 5 montre, à titre d'exemple, les relations au niveau case entre les diamètres tangentiels et la surface du houppier. Celle-ci explique la quasi-totalité des variations des diamètres tangentiels. On comprend bien pourquoi l'effet traitement est aussi fort (§ 4.12). De plus, l'examen des résidus permet d'essayer de juger l'influence du type de station. On remarque principalement que la station 1 possède des contraintes très inférieures à ce que laisserait prévoir la surface du houppier, surtout en taillis sous futaie. Si l'on se reporte à la figure 3, on voit de plus que les arbres de cette station possèdent l'inclinaison la plus forte, ce qui devrait leur conférer des contraintes élevées. Par conséquent, les rendzines (éventuellement brunifiées) semblent réellement favorables au développement de hêtres peu tendus. Au contraire, les sols bruns calciques (type 2) engendrent des contraintes plus élevées que prévu. Mais l'inclinaison des arbres est importante (voir figure 3), si bien que l'on ne peut décider s'il faut accuser la station ou l'inclinaison (ou les deux à la fois !).

Revenant au tableau 12, on peut donc dire que plus les arbres sont gros, trapus, avec un houppier large et commençant bas, moins on a de contraintes. On s'attendrait donc à ce que la largeur des cernes soit très corrélée elle aussi avec les diamètres tangentiels. Mais ce n'est guère le cas. Cela tend à confirmer que, dans notre échantillonnage, la largeur des cernes est plutôt un indicateur de fertilité (cf. § 4.11). Cependant, on pourrait dire que la plupart des caractères de grosseur cités ci-dessus augmentent fortement avec l'âge, et qu'il y a là un possible artefact ; celui-ci est d'autant moins impossible que la diminution des contraintes avec l'âge est une idée admise par de nombreux forestiers, bien qu'elle n'ait jamais été vérifiée scientifiquement. Néanmoins, il nous semble qu'il faille comprendre ces corrélations comme marquant l'influence de la *compétition* sur les contraintes de croissance : plus la compétition entre les arbres est élevée, plus ils développent des contraintes. Cette interprétation est confirmée par le fait que la circonférence et le volume de la bille, qui sont *a priori* les plus directement liés à l'âge, sont moins bien corrélés avec TG que la surface du houppier (au niveau case) et HBIL/Ht (qui indique la hauteur relative du houppier par rapport à la hauteur totale). De plus, des mesures faites dans des plantations expérimentales d'eucalyptus montrent clairement que, à âge égal, une plus faible compétition s'accompagne de contraintes de croissance beaucoup plus faibles (FERRAND, 1982 c). De même, POLGE (1981, *op. cit.*) a montré que le

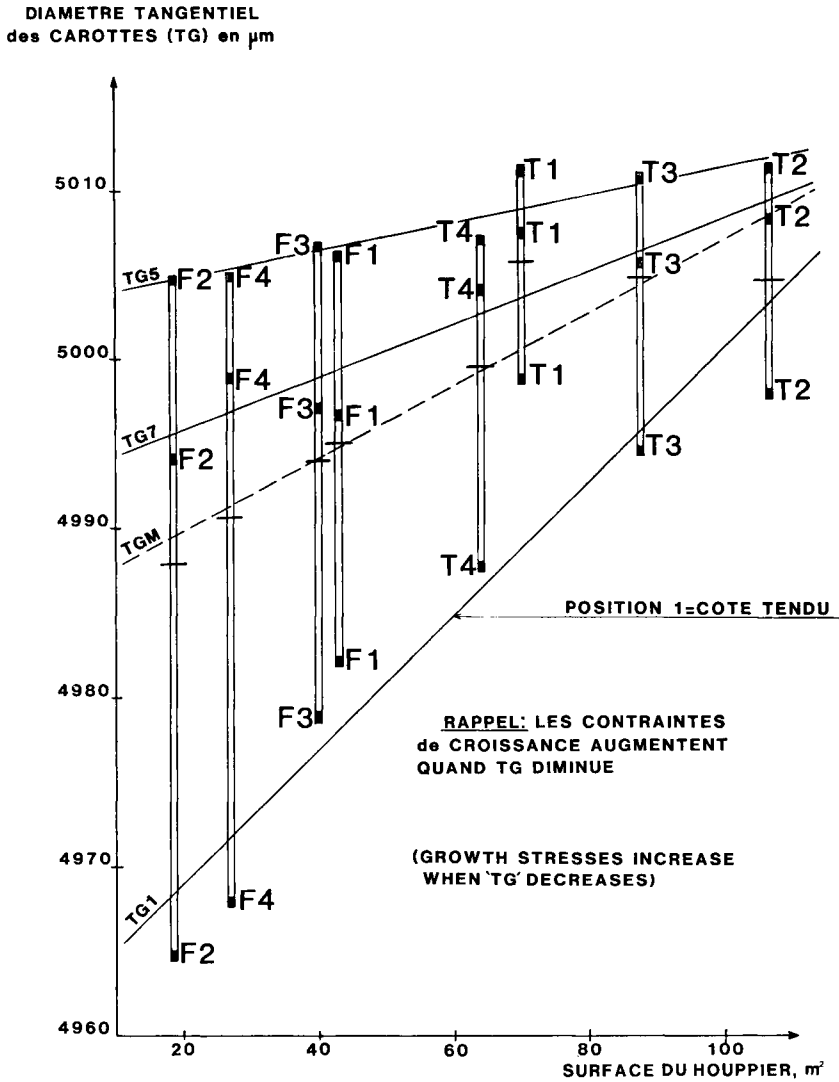


FIG. 5

Expérience n° 6 : Liaisons entre le diamètre tangentiel des carottes (TG) et la surface de la projection du houppier (SURF-HP) pour les positions 1, 5 et 7 (TG1, TG5, TG7) et la moyenne (TGM)

Experiment n° 6. Relationship between tangential diameter of the increment cores (TG) and crown area (SURF-HP), for positions 1, 5, 7 (see fig. 1) and their mean (TGM)

Corrélations : TG1 : 0,923*** ; TG7 : 0,873** ; TG5 : 0,908*** ; TGM : 0,932***.

Correlations : with TG1 : 0.923*** ; TG7 : 0.873** ; TG5 : 0.908*** ; TGM : 0.932***.

diamètre tangentiel des carottes augmente avec l'intensité des éclaircies dans un essai d'éclaircie de hêtre.

4.22. Propriétés du bois

Le tableau 12 apporte aussi quelques renseignements sur les propriétés physiques du bois. En montrant que l'infradensité a un comportement très similaire aux contraintes de croissance et diminue lorsque les arbres sont plus gros, cette étude apporte ainsi un prolongement utile aux travaux de KELLER *et al.* (1976, *op. cit.*) sur la densité du bois de hêtre. Ce résultat est extrêmement positif puisque tout effort réalisé pour obtenir de plus gros arbres amènera à la fois une amélioration des contraintes de croissance et de la densité (donc certainement de la dureté).

De plus, le retrait tangentiel est très lié à la largeur des cernes et augmente avec celle-ci. Cela semble défavorable, d'autant plus que la corrélation existe aussi au niveau arbre. Cependant, il faut se rappeler que dans cette expérience la largeur des cernes est surtout apparue comme un critère de fertilité ; il serait donc hasardeux d'affirmer qu'une accélération de croissance d'origine sylvicole doit faire augmenter nécessairement le retrait tangentiel, même s'il y a lieu de le redouter.

4.3. Analyse en composantes principales

Pour terminer l'analyse des résultats de cette expérience, il nous a paru intéressant de réaliser une analyse en composantes principales (ACP) dont le but était d'obtenir une représentation plus synthétique (en non contingente d'un modèle) de l'ensemble des résultats.

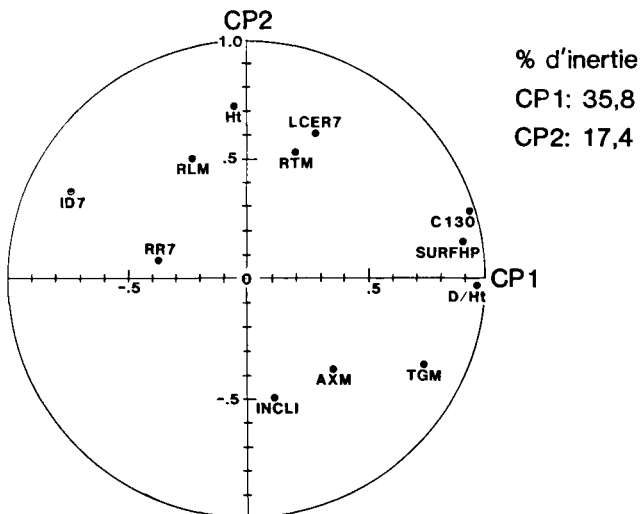


FIG. 6

*Expérience n° 6 : Analyse en composantes principales.
Dans l'espace des variables, projection des variables de départ
sur le plan des deux premières composantes principales*

*Experiment n° 6. Principal components analysis. Projection of the initial variables
on the plane of the two first principal components.*

Cette ACP a été réalisée au niveau « placettes » et est condensée ici sur les figures 6 et 7 qui représentent respectivement :

— dans l'espace des variables, la projection des variables de départ dans le plan des deux premières composantes principales ;

— dans l'espace des individus, la projection des 40 placettes sur le plan des deux premières composantes principales.

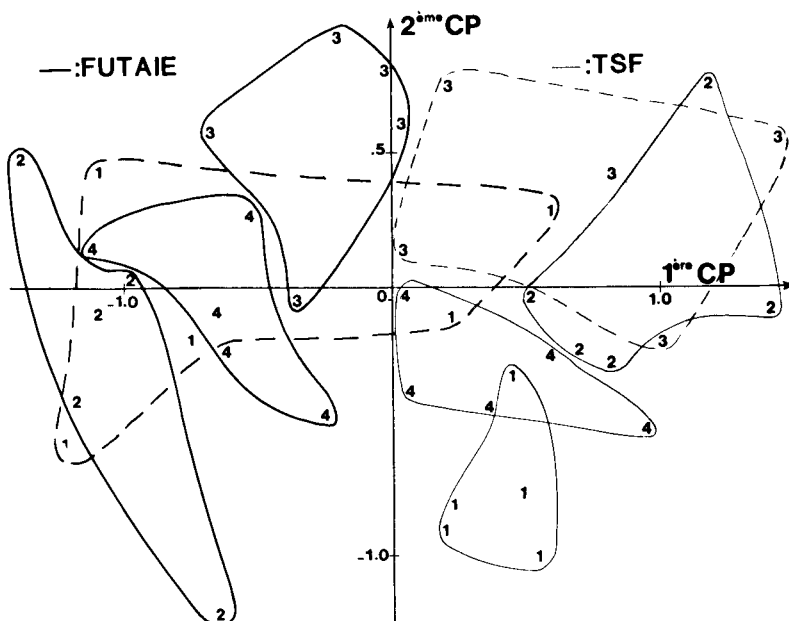


FIG. 7

*Expérience n° 6 : Analyse en composantes principales.
 Dans l'espace des individus (placettes) projection des placettes
 (repérées par leur type de station, voir tableau 9)
 sur le plan des deux premières composantes principales*

*Experiment n° 6. Projection of the plots (coded with their soil type number)
 on the plane of the two first principal components
 (Futaie = Highforest. TSF = Coppice with standards)*

Sur la figure 6, le premier axe peut être interprété comme un axe de grosseur de l'arbre et de son houppier, de faibles contraintes et de faible infradensité. L'axe 2 est plus difficile à interpréter mais apparaît comme une direction de grandes hauteur totale et largeur de cernes et, dans une certaine mesure de fort retrait tangentiel. Il est donc intéressant de retrouver les deux grands pôles mis en évidence dans l'analyse de la variance et de constater leur indépendance.

La figure 7 montre que futaie et taillis sous futaie se séparent de manière quasi parfaite au long de l'axe 1, ce qui est satisfaisant, mais n'apporte pas beaucoup plus d'information que l'effet traitement dans l'analyse de variance. En revanche, l'examen de la répartition des placettes selon leur type de station montre que dans

chaque traitement, trois des quatre types se séparent très bien, tandis que le quatrième est assez mal caractérisé, et se projette selon un nuage très vaste et recoupant certains autres. Le regroupement des placettes en types de station d'après le seul examen du type de sol apparaît donc comme justifié *a posteriori* dans six cas sur huit, ce qui n'est pas si mal. En revanche, dans les deux cas restants, il se peut, soit que le type de station soit homogène, mais qu'il existe une hétérogénéité due à la gestion sylvicole ou à la génétique, soit que le regroupement des cinq placettes dans une même catégorie stationnelle soit peu justifiable. Mais, de toute façon, cette dispersion observée dans deux cas sur huit est de nature à participer à la forte variabilité « placette dans station » soulignée au § 4.11.

5. - Discussion

Au terme d'un exposé ayant abordé des sujets aussi variés, il est sans doute utile d'essayer de dégager des points forts. Trois catégories de résultats nous semblent particulièrement importantes. Les deux premières concernent la méthodologie des expérimentations en forêt, et la troisième est plus spécifique aux conséquences des contraintes de croissance du hêtre.

5.1. Variabilité des propriétés du bois autour du tronc

Il s'avère que toutes les propriétés du bois (TG, RT et RL) mesurées en 3 positions autour du tronc sont très dépendantes de la position. Il est regrettable que l'infradensité et le retrait radial n'aient été mesurés que sur une des trois carottes, car l'information eût été intéressante. Néanmoins, des contraintes de croissance souvent doubles et un retrait tangentiel supérieur de 1,5 p. 100 suffisent amplement à distinguer le côté tendu du côté opposé. Cela a une conséquence immédiate pour la recherche : si on sonde les arbres « au hasard » autour du tronc, ou toujours au Nord, etc., on n'est pas toujours dans la même position par rapport à l'inclinaison de l'arbre et on augmente ainsi terriblement la variance, au moins pour les trois caractères : contraintes, retrait tangentiel et retrait longitudinal. Cela peut donc amener des erreurs dans les calculs statistiques. Avec un peu de malchance on peut même sonder toujours au Nord une placette à vents dominants (et donc, dans une certaine mesure, côté tendu) au Nord, et une autre à vents d'Ouest dominants. On attribuera alors aux placettes des différences dues à des positions de prélèvement différentes par rapport au côté tendu.

La conclusion doit être que, au moins avec le hêtre, il faut absolument tenir compte de la position du côté tendu pour effectuer des prélèvements. Faut-il rappeler que, au cours de ces expériences, la proportion d'arbres ayant une inclinaison décelable avec un simple fil à plomb était toujours entre 90 et 100 p. 100.

5.2. Variabilité au niveau « placette »

La variabilité importante au niveau placette est une constante de ce genre d'expériences en forêt (voir par exemple RINGARD, 1980). Même si on peut dire

que le choix des types de station reposait ici sur des critères un peu trop simplifiés, cette variabilité « placette » doit être considérée avec attention. Elle montre que — lorsqu'on n'est pas dans le cas exceptionnellement favorable d'un peuplement d'origine génétique contrôlée dans une région où le milieu est très homogène, avec une sylviculture bien suivie — pour comparer deux modalités (sylvicoles ou environnementales), il est dangereux d'installer un dispositif expérimental en forêt à *un seul endroit*, même avec toutes les répétitions voulues. En effet, le fort effet placette signifie que, si l'on installait le même nombre n de répétitions dans n peuplements *distincts*, dans la même région, et correspondant tout aussi bien aux modalités à étudier, alors on trouverait une variabilité « placette » plus forte, et donc moins d'effets significatifs. Cela signifie qu'on a le choix — mais en est-ce un ? — entre des expériences très concentrées donnant plus de résultats, mais dont on ignore s'ils peuvent être extrapolés, et des expériences plus « éclatées » où apparaissent moins de résultats significatifs, mais dont la validité s'étend à une large gamme de peuplements. Encore reste-t-il à éviter l'écueil inverse où une définition trop large des modalités étudiées masque tout effet significatif...

5.3. *Qualité du bois de hêtre et sylviculture*

Bien qu'il soit rarement employé pour les usages les plus nobles (produits de tranchage), le bois de hêtre peut atteindre une valeur élevée. De plus, la productivité moyenne de l'essence et les longues révolutions habituellement pratiquées rendent nécessaires l'obtention de bois d'une qualité aussi bonne que possible afin d'améliorer le rendement financier de la sylviculture, d'autant plus que le prix d'un m³ de hêtre varie dans une proportion d'au-moins 1 à 10 selon la qualité du bois. L'enjeu est simple mais crucial : il y va du maintien de l'espèce ou de son remplacement par d'autres jugées plus rémunératrices. Ce remplacement est largement engagé sur les sols silicieux de l'étage montagnard, mais pas seulement là.

Or, les résultats présentés ici et tous ceux déjà acquis en matière de qualité du bois de hêtre (voir par exemple POLGE, 1973, *op. cit.*) montrent que celle-ci est extrêmement sensible à de nombreux facteurs, en particulier la sylviculture. Tout converge pour constater que :

— telle qu'elle a été pratiquée, la gestion des futaies de hêtre — principalement issues de la conversion des taillis sous futaie — a eu des conséquences très néfastes sur la qualité du bois (au moins pour les contraintes de croissance et la densité - dureté) ;

— mais ce n'est pas le régime de la futaie lui-même qui est en cause. En effet, il est clair que les meilleurs arbres et les meilleurs peuplements sont ceux qui sont dotés d'un gros houppier, ce qui signifie qu'ils ont subi une concurrence moins forte. POLGE (1979, *op. cit.*) a même vérifié l'influence favorable des éclaircies fortes sur les contraintes de croissance en futaie.

Il est donc urgent d'aider les gestionnaires à repenser complètement la gestion des hêtraies. L'objectif doit être simple : production accélérée, ce qui sera synonyme de qualité intrinsèque du bois améliorée. Cependant, il conviendra de définir comment arriver à pratiquer en futaie des éclaircies très précoces et intenses sans que la forme des tiges ne se dégrade trop. La tâche est immense car il faudra non seulement faire des essais d'éclaircie nombreux et audacieux — donc difficiles — mais encore chiffrer, d'une part les gains financiers dus à l'amélioration de la qualité

intrinsèque du bois et au raccourcissement de la rotation, et d'autre part les coûts et pertes associés aux travaux à réaliser, à la diminution du nombre de tiges à l'hectare et à une éventuelle dégradation de la forme. Seule la balance de ces gains et de ces pertes permettrait de fournir les indications nécessaires pour un choix de gestion véritablement réfléchi.

Il convient également de peser avec soin les implications de ces résultats en matière génétique. En effet, il est très probable que les problèmes de forme pourraient être résolus avec une certaine efficacité par la sélection. Cela pose la question de savoir si une grande espèce indigène sociale doit être améliorée ou, au contraire, conservée dans son aire d'origine. Il s'agit d'une question très épineuse, car chacune des deux solutions a des avantages et des inconvénients très importants, et notre but n'est certes pas de la résoudre en quelques lignes. En revanche, un autre aspect génétique est très intéressant. Il concerne les mélanges d'essences. Une fois reconnue l'influence de la sylviculture sur la qualité du bois de hêtre, il n'est plus question de cultiver délibérément en mélange le chêne et le hêtre, sauf à y considérer ce dernier comme tout à fait secondaire. En effet, les exigences des deux espèces en matière d'éclaircie apparaissent maintenant comme contradictoires. Si le renouvellement à l'identique de certains peuplements purs et très serrés de hêtre est à proscrire, la sylviculture que nous préconisons peut très bien tolérer l'association au hêtre, selon le type de station, de nombreuses espèces naturelles (fruitiers, frênes, érables, ormes) dont l'élimination progressive par la gestion habituelle de la futaie de hêtres risquait de causer à terme un appauvrissement génétique préjudiciable. Ces essences seraient tout à fait à leur place dans une hêtraie gérée de manière plus dynamique, et participeraient à la production sans la perturber.

Reçu pour publication le 16 octobre 1981.

Remerciements

Une partie de cette étude a été financée par la D.G.R.S.T. (contrats n° 76 7 0531, 77 7 1141, 78 7 2547 et 79 7 0690).

Nos remerciements s'adressent également à :

— l'Office National des Forêts, grâce auquel nous avons pu accéder aux peuplements forestiers ;

— G. NÉPVEU pour ses conseils en statistiques ;

— ainsi qu'aux nombreux membres de la Station de Recherches sur la Qualité des Bois et de la Station de Biométrie qui ont participé à ces travaux.

Summary

Study of growth stress

2nd Part : Variations in the forest of growth stresses of beech (Fagus silvatica, L.)

Experiments have been performed in the forest to study the variation of the longitudinal growth strain (ϵ_L) around the stem of beeches.

Growth strain is maximum on the upper side of the stem and decreases dramatically when moving away from this position. Within a same stand, ϵ_L increases with stem lean, and decreases slightly with crown area.

On the upper side, the longitudinal Young's modulus E_L varies like ϵ_L : this increases even more the longitudinal growth stress on the upper side and the dissymetry between the upper side and the opposite one, which causes problems during sawing of stressed stems.

Within a same forest, spiral grained trees exhibit a 30 p. 100 higher value of ϵ_L and 20 p. 100 higher one of E_L than straight grained trees (on the upper side), although they contain the same proportion of tension wood.

Finally two silvicultural treatments and four types of soil were compared in old beech forests of North-east France. The longitudinal growth strain ϵ_L decreased very much when the crown area increased; this variation is continuous for crown area values from 20 to 100 m² ! Thus, silviculture (and not the type of soil) seems to be responsible for the high growth stresses levels found in some beech forests.

Références bibliographiques

- ADRIAN A., 1960. Barème forestier : cubage des bois abattus ou en grume d'après la circonférence et le diamètre des bois équarris. Débit et équarrissage des bois. Cubage et estimation des bois sur pied. Berger Levrault, Nancy.
- ARCHER R.R., 1979. On the distribution of tree growth stresses. Part 3 : The case of inclined grain. *Wood. Sci. Technol.*, **13**, 67-78.
- BARBER N., MEYLAN D., 1964. The anisotropic shrinkage of wood. *Holzforschung*, **18** (5), 146-156.
- BIROT Y., DUFOUR J., FERRANDES P., TEISSIER DU CROS E., AZOEU P., HOSLIN R., 1980. Variabilité de l'angle du fil du bois chez quelques feuillus : hêtre, chêne et Eucalyptus dalrympleana. *Ann. Sci. for.*, **37** (1), 19-36.
- FERRAND J.-Ch., 1980. La roulure du châtaignier (*Castanea sativa* Mill.). Note préliminaire. *Document à distribution limitée Station de Recherches sur la Qualité des Bois, C.N.R.F.*, 1980/2.
- FERRAND J.-Ch., 1982 a. Mesure de la variation de l'angle de la fibre torse avec l'âge. *Ann. Sci. for.*, **39** (1), 99-104.
- FERRAND J.-Ch., 1982 b. Etude des contraintes de croissance. 1. Méthode de mesure sur carottes de sondage. *Ann. Sci. for.*, **39** (2), 109-142.
- FERRAND J.-Ch., 1982 c. Growth strains and silviculture of eucalyptus. A paraître dans *Australian Forest Research*.
- GUENEAU P., SAURAT J., 1974. Contraintes de croissance. Rapport n° 1 : Mesures en forêt. *Document C.T.B.*, Paris.
- KELLER R., LE TACON F., TIMBAL J., 1976. La densité du bois de hêtre dans le Nord-Est de la France. Influence des caractéristiques du milieu et du type de sylviculture. *Ann. Sci. for.*, **33** (1), 1-17.
- POLGE H., 1973. Etat actuel des recherches sur la qualité du bois de hêtre. *Bull. tech. O.N.F.*, **4**, 13-22.
- POLGE H., 1981. Influence des éclaircies sur les contraintes de croissance du hêtre. *Ann. Sci. for.*, **38** (4), 407-423.
- RINGARD E., 1980. Mélèze Quercy Embrunais. *Rapport de 3^e année E.N.I.T.E.F.*, O.N.F. Embrun, Station de Recherches sur la Qualité des Bois, C.N.R.F., Nancy-Champenoux.