

Thèse présentée à l'Ecole Nationale du Génie rural des Eaux et Forêt

Discipline Sciences du Bois.

Titre

Evolution du comportement mécanique du bois vert avec la température. Application à l'étude du déroulage et du tranchage de quelques bois guyanais.

Soutenue le 30 avril 1996 à Kourou devant un jury composé de :

**G. CHALANT Rapporteur
C. SALES Rapporteur
M. FOURNIER Examineur
P. LANGBOUR Examineur
B. THIBAUT Examineur
M. VERNOS Examineur**

I - QUELQUES NOTIONS PRELIMINAIRES ET UTILES A L'ETUDE	I-6
I - 1. NOTIONS DE BASE SUR LE BOIS	I-6
I - 1.1. Du bois tissu végétal au bois matériau	I-6
I - 1.2. La structure du bois (DETIENNE, 1988).....	I-6
I - 1.3. Structure de la paroi des cellules du bois.	I-8
I - 1.4. Anisotropie élastique du bois.	I-10
I - 1.5. Conclusion	I-11
I - 2. NOTIONS DE BASES SUR LA COUPE 0/90	I-12
I - 2.1. Les mécanismes de coupe en mode 0/90.....	I-13
I - 2.2. Influence de la température	I-21
I - 2.3. Conclusion	I-26
II - CARACTERISATION DU MATERIEL VEGETAL UTILISE.....	II-29
II - 1. DESCRIPTION DU MATERIEL VEGETAL	II-29
II - 1.1. Choix des essences	II-29
II - 1.2. Description succincte des essences choisies	II-29
II - 2. ORGANISATION DES DEBITS ET DES MANIPULATIONS.....	II-42
II - 3. RESULTATS DES MESURES PHYSIQUES	II-44
II - 3.1. Quelques définitions (GUITARD, 1988), KOLLMAN (1984), norme NF B 51-006	II-44
II - 3.2. Mesure de la densité.....	II-45
II - 3.3. Mesure du retrait	II-46
III - METHODOLOGIE GENERALE DES ESSAIS MECANIQUES.....	III-50
III - 1. ORGANISATION DES ESSAIS.....	III-50
III - 1.1. Description de la machine d'essais.....	III-50
III - 1.2. Le dispositif de régulation thermique.....	III-51
III - 1.3. Protection des capteurs contre la dérive thermique et tests de stabilité	III-51
III - 1.4. Déformation élastique du dispositif expérimental.....	III-52
III - 1.5. Mesures physiques sur les éprouvettes d'essai	III-52
III - 2. ESSAI DE COMPRESSION RADIALE	III-53
III - 2.1. Description du dispositif.....	III-53
III - 2.2. Courbes types.....	III-54
III - 2.3. Influence de la densité, de la température et de l'humidité	III-55
III - 2.4. Paramètres mesurés.....	III-56
III - 2.5. Répétabilité et variabilité des essais	III-57
III - 2.6. Essais de compression Tangentielle.....	III-58
III - 3. ESSAI DE CISAILLEMENT RADIAL.....	III-62
III - 3.1. Description du dispositif.....	III-62
III - 3.2. Courbes types et paramètres mesurés	III-63
III - 3.3. Variabilité et répétabilité des essais	III-64
III - 4. ESSAI DE TENACITE OU DE PROPAGATION DE FISSURE	III-65
III - 4.1. Description du dispositif.....	III-65
III - 4.2. Courbes types et paramètres mesurés.....	III-67
III - 4.3. Influence de quelques paramètres sur l'énergie de rupture $G_{f,1}$	III-68
III - 4.4. Variabilité et répétabilité des essais	III-69
III - 4.5. Mesure de l'angle du fil.....	III-70
III - 4.6. Mesure indirecte de la surface créée	III-70
IV - RESULTATS DES ESSAIS MECANIQUES ET COMMENTAIRES	IV-73
IV - 1. INFLUENCE DE LA DENSITE SUR LES DIFFERENTS DESCRIPTEURS MECANIQUES	IV-73
IV - 1.1. Rôle de l'infradensité sur l'essai de compression radiale	IV-73
IV - 1.2. Rôle de l'infradensité sur l'essai de cisaillement RT.....	IV-82
IV - 1.3. Rôle de l'infradensité sur l'essai de ténacité en mode I.....	IV-89
IV - 2. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES DIFFERENTES PROPRIETES MECANIQUES.....	IV-93
IV - 2.1. Rôle de la température sur l'essai de compression radiale	IV-93
IV - 2.2. Rôle de la température sur l'essai de cisaillement RT.....	IV-100
IV - 2.3. Rôle de la température sur l'essai de ténacité	IV-105
IV - 3. SYNTHESE ET CONCLUSIONS	IV-110
IV - 3.1. Relations entre les descripteurs mécaniques	IV-110

IV - 3.2.	<i>Influence du facteur essence</i>	IV-118
IV - 3.3.	<i>Conclusion</i>	IV-125
V -	ESSAIS DE DEROULAGE	V-129
V - 1.	DESCRIPTION DES EXPERIMENTATIONS.....	V-129
V - 1.1.	<i>Description de la microdérouleuse</i>	V-129
V - 1.2.	<i>Résultats acquis lors d'un essai</i>	V-133
V - 1.3.	<i>Etuvage des rondelles</i>	V-134
V - 1.4.	<i>Mesure du coefficient de frottement</i>	V-135
V - 1.5.	<i>Essais de coupe sans barre de pression</i>	V-136
V - 1.6.	<i>Essai d'enfoncement de la barre de pression</i>	V-139
V - 2.	RESULTATS DES ESSAIS DE DEROULAGE SANS BARRE DE PRESSION	V-140
V - 2.1.	<i>Mesure de l'angle de frottement</i>	V-140
V - 2.2.	<i>Variation de F_a en fonction de la passe et de la température</i>	V-140
V - 2.3.	<i>Variation de F_a en fonction de l'infradensité et de la température</i>	V-145
V - 2.4.	<i>Analyse des coefficients de variation de F_a</i>	V-146
V - 3.	EFFORTS EXERCES PAR LA BARRE DE PRESSION	V-149
V - 3.1.	<i>Relation entre les composantes X_b et Y_b</i>	V-149
V - 3.2.	<i>Relation entre l'effort résultant F_b et la pénétration de la barre Δ_e</i>	V-150
V - 4.	COMPARAISON DEROULAGE ESSAIS MECANQUES.....	V-151
V - 4.1.	<i>Relations entre les valeurs de F_a et de F_b et les descripteurs mécaniques</i>	V-151
V - 4.2.	<i>Déroulabilité et ratios</i>	V-152
V - 5.	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	V-154

INTRODUCTION

Fière de ses 8 millions d'hectares de forêt ombrophile et de ses 5900 espèces végétales décrites, porte de technologie, la Guyane a tous les atouts pour une gestion exemplaire de sa forêt. Cette gestion a avant tout besoin d'une meilleure connaissance des fonctionnements des écosystèmes et des interactions des biocénoses. Mais, elle doit être aussi capable de répondre à une exploitation obligatoire d'une partie de la forêt. C'est ici qu'interviennent les Sciences du Bois, parce que, sur les 1200 espèces d'arbres dont le diamètre est supérieur à 10 cm, aucune n'est exactement identique, chacune a ses particularités même au niveau de son bois. Les populations locales l'ont d'ailleurs compris depuis longtemps par nécessité ; chaque bois est utilisé pour un usage précis en fonction de ces propriétés spécifiques. Qu'il soit utilisé pour sa dureté : Bois flèche (*Mouriri crassifolia*), ses propriétés mécaniques élevées : Bois gaulette (*Licania* spp.), sa légèreté : Bois bouchon (*Parkia nitida*) ses particularités esthétiques : Satiné rubané (*Brosimum rubescens*) ou encore sa spécificité : Bois payaye (*Chimarrhis turbinata*), chaque bois a une adéquation d'emplois basée sur une connaissance empirique transmise de génération en génération. C'est cette connaissance que nous cherchons à approcher. Certes, elle doit être plus rationnelle, et répondre à nos critères scientifiques, mais elle doit surtout être accessible à tous.

La diversité ou la richesse ligneuse est donc une des principales caractéristiques de la forêt guyanaise. Sur les 1200 espèces de plus de 10 cm de diamètre, environ 700 essences ont des diamètres relativement faibles compris entre 10 et 30 cm. Comment valoriser au mieux ces essences pour que cette diversité soit un avantage plutôt qu'un handicap ? Cette question, qui n'est pas propre aux forêts tropicales, se pose également pour d'autres types de forêts (méditerranéenne par exemple).

De part le monde, il existe différents modes de valorisation des bois :

- ↳ l'utilisation en poteau : support de ligne électrique ou intervenant dans la construction traditionnelle de maison à ossature bois,
- ↳ le sciage de premier débit,
- ↳ le déchetage en plaquettes pour l'industrie papetière ou l'industrie des panneaux (panneaux de particules et panneaux de fibres),
- ↳ le tranchage et le déroulage.

Le débit par tranchage ou par déroulage est celui qui apporte la valorisation la plus forte des bois. En général, les bois tropicaux présentent des atouts spécifiques (homogénéité, couleur, qualité figurative) pour cet usage, ce qui explique leur poids très important dans l'industrie du placage et du contreplaqué.

Plusieurs études (DELAGE & al, 1995), (SAO CHANG CHEONG, 1992) ont conclu à l'opportunité actuelle de mettre en avant la production de placage en Guyane.

Dans cette optique et dans le cadre d'une convention européenne, le CIRAD Forêt - programme Bois (centre de Kourou) a développé un outil de tranchage pour expérimenter l'aptitude au tranchage des essences guyanaises.

Un document annexe présente ce travail (FOUQUET, BEAUCHENE, 1994).

De nombreuses études ont montré que tous les bois ne présentaient pas la même aptitude au tranchage ou au déroulage. Le critère de densité (plage de densité variant de 0.3 à 0.6 mm environ) souvent mis en avant, souffre de multiples exceptions.

THIBAUT (1988) a montré que, plus que la densité elle-même, c'est le comportement mécanique du bois vert soumis à de fortes sollicitations en compression, cisaillement ou fracture dans les directions orthogonales au fil du bois, qui est déterminant sur l'usinabilité.

Par ailleurs, il est bien connu que ces comportements sont fortement dépendants de la température du bois (KOLLMANN & al, 1984), (MOOROKA & al, 1994). C'est cette propriété qui est utilisée empiriquement depuis près d'un siècle par les dérouleurs qui étuvent leurs grumes sur une plage de température variant de la température ambiante à 90°C. LUTZ (1972) a tenté de rassembler cette expérience dans un diagramme de choix de température fonction de la densité mais à nouveau les divergences peuvent être très grandes entre essences. Il n'est pas imaginable aujourd'hui de reprendre cette démarche empirique pour la grande diversité des essences guyanaises encore mal ou méconnues.

L'objectif de ce travail est d'abord d'analyser le comportement mécanique du bois vert dans les trois sollicitations principales de l'usinage et d'observer l'influence de la température sur les descripteurs mécaniques considérés. Des essais de déroulage après étuvage à différentes températures, pour les mêmes essences, sont utilisés pour qualifier l'usinabilité dans ces conditions. L'objectif à terme étant de mieux prédire, a priori l'aptitude au tranchage ou au déroulage d'une essence mal connue et de choisir une température d'étuvage optimale.

Le travail se décompose de la façon suivante :

un premier chapitre donne des notions préliminaires et utiles à l'étude ; des références sur le matériau Bois et sur le mode de coupe du type « déroulage-tranchage » ou « 0-90 » y sont regroupées.

Le deuxième chapitre présente les dix essences utilisées sous différents aspects des sciences de l'arbre et du bois : des données botaniques, anatomiques, physiques et mécaniques sont résumées. Les dix essences retenues sont choisies suivant les critères suivant :

- une plage d'infradensité variant de 0.23 à 0.92
- la fréquence de leur présence dans les scieries guyanaises
- un critère subjectif d'homogénéité du bois

Les différents protocoles expérimentaux de débits d'éprouvettes des mesures de densité, des retraits T, R et d'infradensité sont décrits avec leur spécificité de façon détaillée.

Le troisième chapitre décrit la méthodologie générale des essais mécaniques réalisés. Il s'agit des essais de compression radiale, tangentielle, de cisaillement RT et de ténacité qui sont réalisés dans l'eau dont la température est réglée sur une plage de 25°C à 80°C.

Le quatrième chapitre présente l'analyse des résultats. En premier lieu, l'influence de l'infradensité et de la température sur des descripteurs des essais mécaniques est analysée. Un complément d'étude sur les relations entre descripteurs et l'évolution des ratios de certains descripteurs en fonction de la température est également proposé.

Le dernier chapitre présente la microdérouleuse utilisée pour les essais de déroulage sous un aspect technique et méthodologique. Des essais de coupe sans barre et des essais d'enfoncement de barre sont développés avec une analyse des résultats respectifs. Enfin, une comparaison entre résultats d'essais mécaniques et résultats d'essais de déroulage est proposée.

I - Quelques notions préliminaires et utiles à l'étude

I - 1. Notions de base sur le bois

I - 1.1. Du bois tissu végétal au bois matériau

⇒ **Le bois dans l'arbre**, le bois est un ensemble de tissus très humides (bien souvent le tronc contient plus d'eau que de matière ligneuse) et biologiquement actifs tant du point de vue physiologique (circulation des fluides et de l'information) que physique (équilibre statique et dynamique de l'arbre). C'est ce couplage fonctionnel entre la résistance mécanique et le rôle physiologique du bois qui est à l'origine de sa complexité structurale.

La formation du bois par le cambium (**xylogénèse**) s'accompagne de phénomènes physico-chimiques complexes (**maturation**) qui génèrent des contraintes internes qui s'accumulent et "s'auto-équilibrent" pendant toute la durée de vie de l'arbre (THIBAUT & al, 1993). Dans l'arbre, les propriétés du bois et la régulation de la croissance secondaire dépendent donc de l'histoire de l'individu, depuis sa germination, et de son adaptation à des conditions internes et externes qui évoluent à chaque période de croissance, cela pendant parfois plusieurs siècles. Cela se traduit essentiellement par deux sources de variabilité :

- à un niveau donné d'un axe, par une variation radiale des propriétés du bois (passage du bois juvénile au bois adulte) plus ou moins marquée selon les espèces,

- des secteurs angulaires de bois particuliers (les bois de réaction) dont le rôle est de permettre à l'arbre de s'orienter dans l'espace (recherche de la lumière, s'éloigner d'un voisin, etc.) ou de se réorienter à la suite d'un déplacement accidentel (déchaussements dus au vent, à un chablis, etc.).

A ces équilibres physiques et régulations physiologiques s'ajoutent des modifications chimiques du bois liées à l'accumulation des déchets du métabolisme et des réactions chimiques de longue durée (évolution des polyphénols, **duraminisation**).

⇒ **Le bois hors de l'arbre**, c'est-à-dire dès l'abattage il y a des modifications brutales des équilibres physiques (relaxations des contraintes internes) un arrêt de l'activité physiologique (mort des cellules et donc interruption des systèmes naturels de défense et de préservation) et une modification des processus chimiques notamment par la baisse du taux d'humidité.

Ces modifications des équilibres physiques sont à l'origine des premiers défauts visibles sur une grume: l'ouverture de fissures (phénomène de rupture) consécutives à des variations dimensionnelles instantanées. A cela s'ajoute ensuite un nouvel état de contraintes internes et/ou de déformations dus au séchage. Enfin, une fois mis en oeuvre, le bois a un comportement viscoélastique dépendant du temps et/ou de la température (fluage).

Ainsi, pour l'utilisateur, le bois hors de l'arbre devient un matériau. Pour le mécanicien, qui étudie ses propriétés et son comportement, le bois est décrit comme "un matériau à forte hétérogénéité macroscopique, cellulaire tridimensionnel, à fibres tubulaires et multicouches composées de polymères carbonés sensibles aux variations d'humidité et de température". Il s'agit donc d'un matériau ayant une structure extrêmement sophistiquée et un comportement très complexe.

I - 1.2. La structure du bois (DETIENNE, 1988)

A l'échelle macroscopique, sur une coupe transversale (type tronçonnage) de tige, le bois est un cylindre à section plus ou moins circulaire composé d'une succession de couches (unité de croissance secondaire) plus ou moins hétérogènes. Cette hétérogénéité, souvent très marquée chez les espèces tempérées et qui se traduit par de fortes variations de densité entre le bois formé au début et à la fin d'une période de croissance, est souvent beaucoup plus discrète chez les espèces équatoriales.

A l'échelle microscopique, le bois des feuillus est composé, pour l'essentiel, de quatre types de cellules (**Tableau I - -1**): les éléments de vaisseaux, les fibres et les parenchymes longitudinal et radial (remarque : il existe en réalité toute une série d'éléments intermédiaires entre les éléments de vaisseaux et les fibres). Les parenchymes, qui assurent de nombreuses fonctions physiologiques, sont les seuls éléments à durée de vie plus ou moins longue. La mort de ces cellules est un des processus de la duraminisation (formation du bois de coeur). Ces éléments cellulaires communiquent entre eux par des perforations (éléments de vaisseaux) ou des ponctuations dont la taille, la disposition et le nombre peuvent jouer un rôle dans le séchage ou l'imprégnabilité des bois.

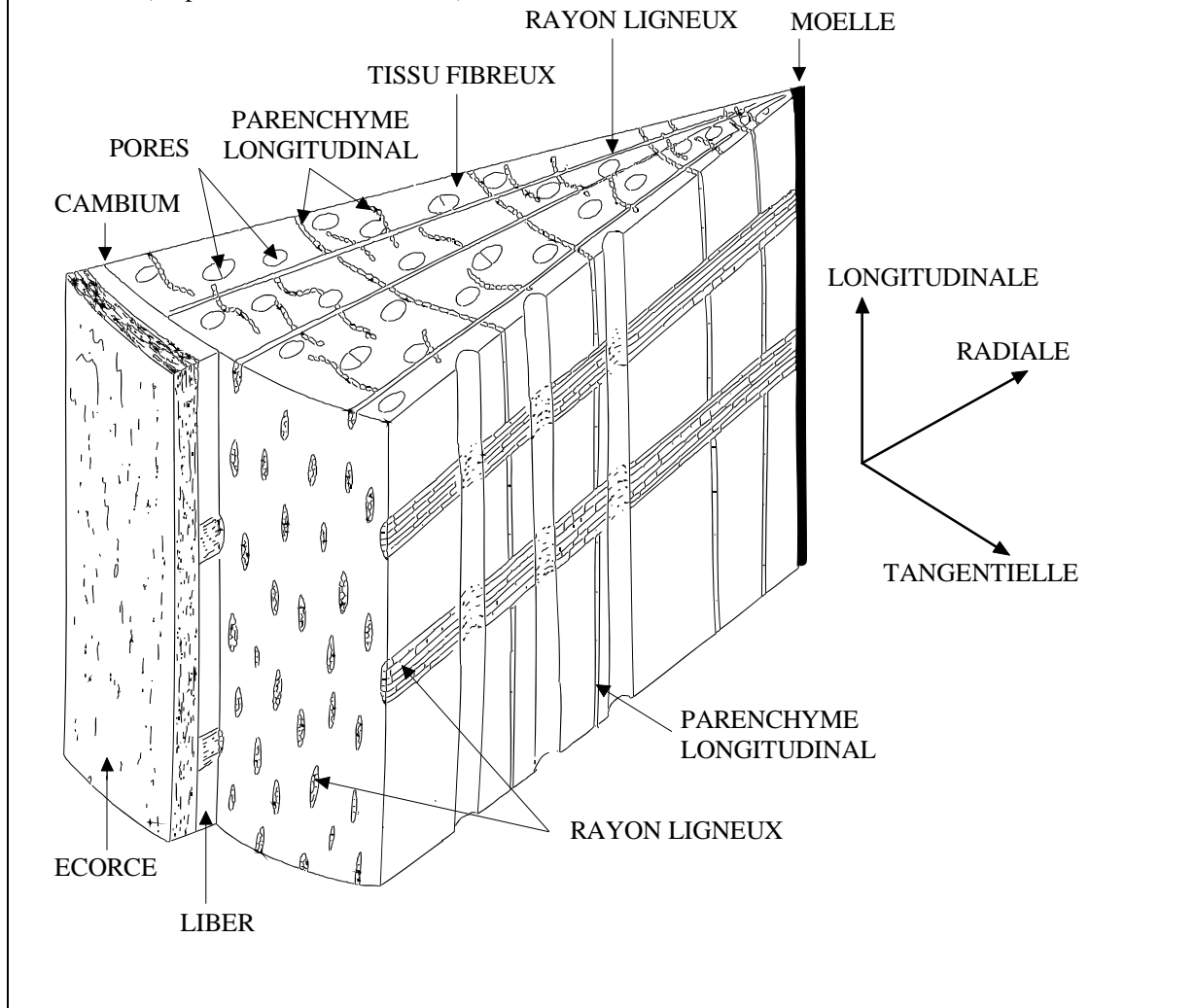
Tableau I - -1 Principaux types, fonctions et dimensions des cellules du bois des feuillus (d = diamètre, L = plus grande longueur).

Conduction longitudinale de la sève brute	Dérivation radiale horizontale	Soutien et résistance mécanique	Stockage et restitution
<p>* Eléments de vaisseaux</p> <p>* (Trachéides vasculaires)</p> <p>* (Trachéides vasicentriques)</p> <p>d : 50 à 800 µm L : 100 à 1000 µm</p>	<p>* Parenchyme radial des rayons ligneux</p> <p>d : 20 à 50 µm L : 100 à 200 µm</p>	<p>* Eléments longitudinaux du type "fibres":</p> <p>(fibres libriformes simpliciponctuées)</p> <p>(Fibres-trachéides) (Trachéides)</p> <p>d : 20 à 50 µm L : 500 à 3000 µm</p>	<p>* Parenchyme radial des rayons ligneux</p> <p>* Parenchyme longitudinal</p> <p>* (Parenchyme sécréteur des canaux sécréteurs longitudinaux et radiaux)</p> <p>d : 20 à 50 µm L : 300 à 600 µm</p>

Mis à part les cellules de parenchyme radial qui constituent les rayons ligneux, toutes les cellules constitutives du bois sont à orientation longitudinale. L'organisation spatiale des différents types de cellules définit le **plan ligneux**. Ce plan ligneux est caractéristique d'une espèce (remarque : si son organisation est relativement stable, il peut néanmoins présenter des variations qualitatives relativement importantes : bois juvénile, bois adulte, bois de réaction).

De cette organisation spatiale d'éléments à orientation différente (parallèlement et perpendiculairement à un axe de symétrie matérialisé par la moelle), résulte une anisotropie de structure décrite par trois plans de référence : le plan transverse, le plan radial et le plan tangentiel (Figure I - -1).

Figure I - -1 Représentation schématisques des principaux constituants du bois et des trois plans de référence (d'après P. DETIENNE, 1988)



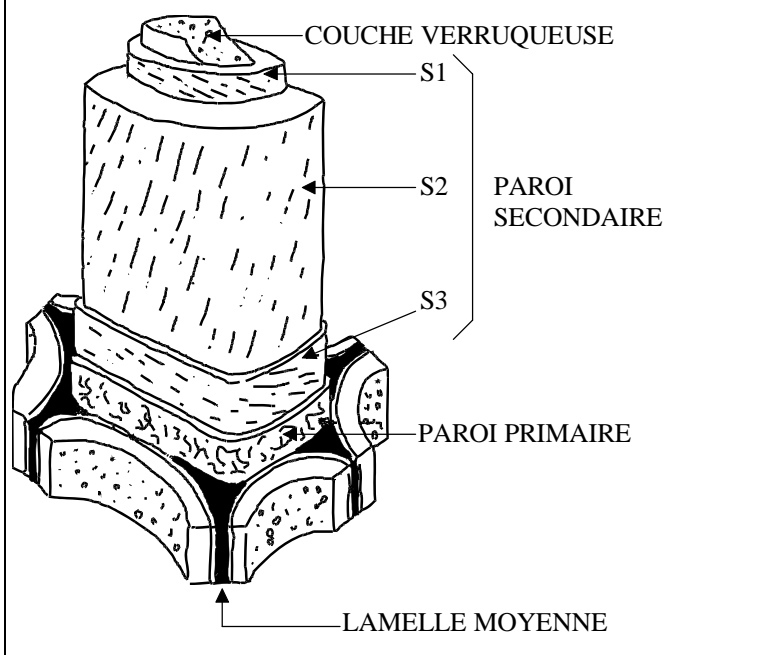
I - 1.3. Structure de la paroi des cellules du bois.

La paroi des cellules, d'une épaisseur de quelques micromètres, est constituée d'une série de couches qui sont définies par leur composition chimique et l'organisation des polymères constitutifs. L'ultrastructure de la paroi est variable selon le type de cellule (éléments de vaisseaux, parenchyme, etc.). Nous nous limiterons ici à illustrer l'architecture de la paroi des fibres de soutien au sens strict. La Figure I - -2 montre la disposition de ces différentes couches :

- ↻ la lamelle moyenne est commune à deux cellules adjacentes et assure la cohésion intercellulaire.
- ↻ la paroi primaire
- ↻ la paroi secondaire, elle-même constituée de trois sous-couches : S1, S2, S3
 - S1, très mince (< à 1 μm), a des microfibrilles de cellulose dont l'angle par rapport à la direction longitudinale varie de 40 à 45°,
 - S2, qui constitue l'essentiel de la paroi, est caractérisée par un angle de microfibrille variant de 10 à 20°
 - S3, très mince, présente un angle de microfibrille analogue à celui de S1
- ↻ parfois une couche dite verruqueuse ou W (*warty layer*)

(Remarque : au niveau des ponctuations, qui permettent les relations entre les cellules, la paroi se limite à la lamelle moyenne et à la paroi primaire).

Figure I - -2 Schéma tridimensionnel de la structure d'une fibre de bois *sensu stricto*. Les hachures indiquent la direction des microfibrilles de cellulose (d'après CÔTÉ 1981).



La plupart des modèles micromécaniques sont construits à partir des caractéristiques géométriques et ultrastructurales de la couche S2 des fibres *sensu stricto* avec comme paramètres d'entrée la disposition dans l'espace et les dimensions des fibres, l'épaisseur de la paroi (qui introduit une densité), l'orientation des microfibrilles, etc.

Les différentes couches de la paroi d'une fibre se caractérisent également par leur composition chimique :

Tableau I - -2 Composition chimique des différentes couches de la paroi d'une fibre de bois.

Couches	Cellulose	Hémicelluloses	Lignines
Lamelle moyenne	5%	10%	85%
Paroi primaire	10%	15%	75%
Paroi secondaire			
S1	30%	30%	40%
S2	50%	30%	20%
S3	50%	35%	15%
Total dans le bois des gymnospermes	50%	30%	20%
Total dans le bois des angiospermes tempérés	50%	25%	25%
tropicaux	45%	25%	30%

Ce tableau montre qu'il existe également des différences assez sensibles de la composition chimique globale du bois des angiospermes entre les essences tempérées et les essences tropicales. Parmi ces dernières, il n'est pas rare d'avoir des taux de lignines encore plus élevés (35% chez l'Angélique, le Boco) ou inversement des teneurs en cellulose fortes (plus de 50% chez le Dodomissinga) ou très faible (36% chez le Wacapou). Ces différences de composition élémentaire peuvent jouer un rôle sur le comportement du bois lors de traitements hydrothermiques tel que l'étuvage.

La Figure I - -3 montre les trois principaux monomères (H, G et S) de base des lignines et la liaison la plus fréquente entre ces monomères. Le tableau Tableau I - -2 illustre la composition relative en monomères en fonction de la position systématique des végétaux.

Figure I - -3 Structure et nomenclature (H,G et H) des unités phénylpropanes des monomères constitutifs des lignines.

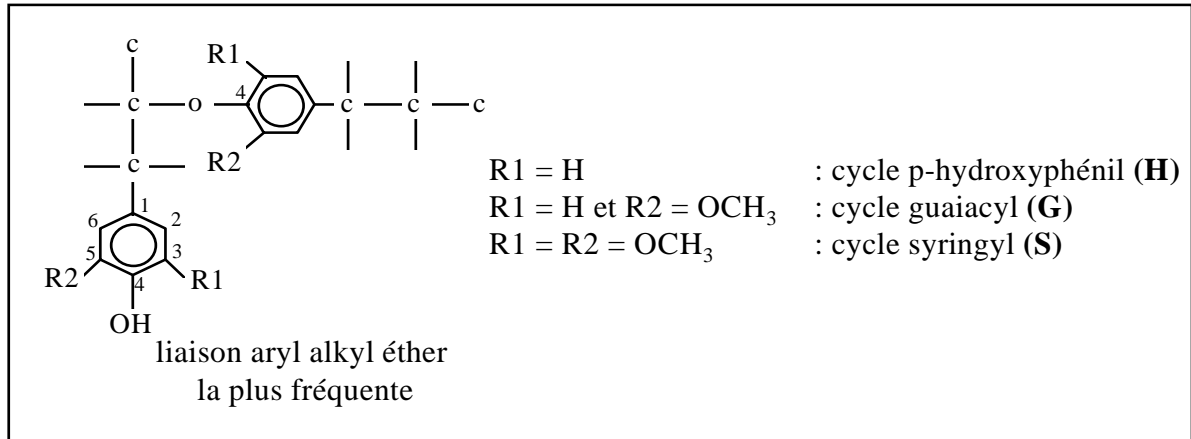


Tableau I - -3 Composition relative en monomères des lignines des tissus conducteurs lignifiés en fonction de la position systématique, d'après FAIX (1976) in MONTIES (1980). (¹: espèce tempérée; ²: espèce tropicale).

	H(%)	G(%)	S(%)
Gymnospermes (Picea abies)	6 à 7	89 à 90	4
Monocotylédones (Bambusa sp.)	10 à 13	55 à 56	31 à 35
Angiospermes (Fagus sp.) ¹ (Piptadienastrum sp.) ²	5 à 7 11 à 14	45 à 47 44 à 45	50 à 56 41 à 45

Ce tableau montre des différences de composition en monomères G et S entre gymnospermes et angiospermes, mais également entre angiospermes tempérés et tropicaux. Notons que des variations, relativement faibles il est vrai, du rapport S/G ont été signalées dans le cas du bois de tension (MOROHOSHI & SAKAKIBARA, 1971), (STARKANEN & HERGETT, 1971), (LAPIERRE & al, 1986) ainsi qu'une plus forte concentration en unité H dans le cas du bois de compression (LEWIN & GOLDSTEIN, 1991).

I - 1.4. Anisotropie élastique du bois.

Le terme d'anisotropie désigne pour un matériau le fait d'avoir des propriétés différentes selon la direction des sollicitations auxquelles on le soumet. Le Tableau I - -4 montre les valeurs de certaines caractéristiques rhéologiques pour un feuillu typique ayant une densité de 0,65 à 12% d'humidité.

Tableau I - -4 Constantes élastiques pour un feuillu « standard » de densité 0,65 (à 12% d'humidité et à une température de 20°C, d'après GUITARD, 1987)

Modules d'Young (MPa)		Modules de cisaillement (MPa)		Coefficients de Poisson (sans dimension)	
E _R	1810	G _{TL}	971	μ _{RT}	0,68
E _T	1030	G _{RL}	1260	μ _{TR}	0,38
E _L	14400	G _{RT}	366	μ _{LR}	0,39
				μ _{LT}	0,46
				μ _{RL}	0,049
				μ _{TL}	0,033

On remarque la grande anisotropie de comportement: la direction L est beaucoup plus rigide que les directions R ou T. L'anisotropie transverse, entre R et T, est également sensible, bien que moins importante.

L'anisotropie axiale (L par rapport à R et T) n'est pas surprenante si l'on se réfère à la structure tubulaire des cellules de bois. A cela s'ajoute l'anisotropie des parois cellulaires provenant de l'orientation des microfibrilles de cellulose par rapport à l'axe des cellules (l'importance de cette caractéristique ultrastructurale s'exprime également assez fortement dans le comportement des bois de réaction et dans une certaine mesure dans la transition entre le bois juvénile et le bois adulte).

L'anisotropie transverse (entre les directions R et T) est beaucoup plus difficile à interpréter. Dans le cas de bois à cernes bien marqués, constitués de bois final rigide et de bois initial peu rigide (type résineux

tempérés), cette alternance tend à renforcer la direction T par rapport à la direction R. Il faut donc faire l'hypothèse que des caractéristiques :

- anatomiques (telles que la nature des cellules de parenchyme radial et l'organisation des rayons ligneux),
- ultrastructurales (épaisseur ou organisation différentes des parois cellulaires selon R et T)
- géométriques (disposition des cellules),

contrebalancent largement l'effet, lorsqu'il existe, de l'hétérogénéité intra-cerne (souvent relativement discrète chez les essences équatoriales).

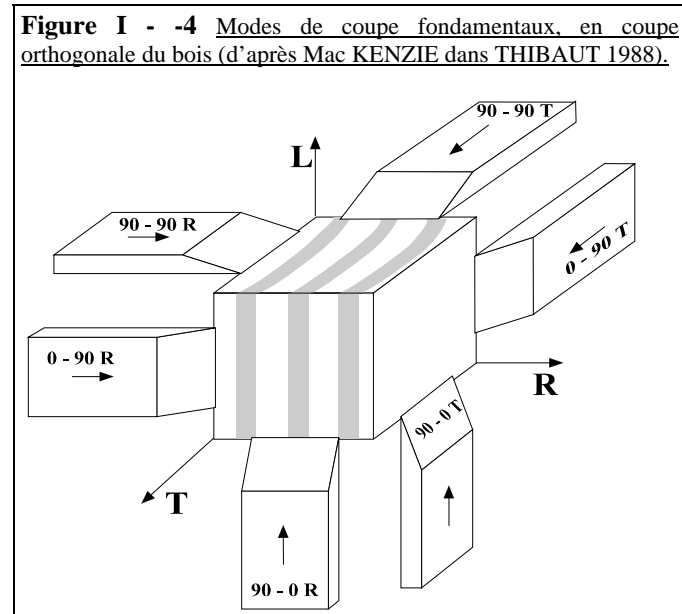
I - 1.5. Conclusion

Ainsi, à tous les niveaux de la transformation du bois, les paramètres structuraux (organisation cellulaire, angle des microfibrilles) et sa composition chimique (variation des taux et de la qualité des lignines, taux de silice) peuvent influencer de façon importante le comportement du bois, son usinabilité, sa durabilité, etc...

I - 2. Notions de bases sur la coupe 0/90

a - Définition

Nous l'avons vu, le matériau bois est fortement anisotrope, aussi bien dans sa macrostructure que dans sa microstructure. Cependant, pour simplifier son analyse, les mécaniciens l'assimilent à un matériau à orthotropie axiale, repéré par trois directions : Radiale, Tangentielle et Longitudinale. La direction longitudinale est la direction principale des fibres (trachéides pour les gymnospermes).



Communément, on ne distingue que deux modes de coupe du bois : la coupe transversale (trouçonnage) et la coupe longitudinale (coupe en long). Par cette distinction, on ne tient compte que de l'orientation axiale du matériau. Dans le cas d'un outil à une seule arête, la coupe est parfaitement identifiée par la direction de l'arête et la direction du déplacement bois/outil dans le repère RTL. Ces deux directions définissent un nombre illimité de modes de coupes, c'est pourquoi, on considère en priorité les modes de coupes pour lesquels l'arête et la direction de coupe définissent un plan perpendiculaire ou parallèle à la direction des fibres.

Les différents modes de coupe peuvent être décrits à partir de trois angles :

- Premier angle : formé par la direction des

fibres et l'arête.

- Deuxième angle : formé par la direction de la coupe et celle des fibres.
- Troisième angle : formé par la direction de la coupe et l'arête.

Ce dernier angle détermine s'il s'agit d'une coupe oblique ou à 90°. En coupe orthogonale, on définit alors trois modes de coupe fondamentaux :

- le mode **90/90**, le plan de coupe et l'arête sont perpendiculaires aux fibres (*sectionnement transversal*);
- le mode **90/0**, le plan de coupe est parallèle à la fibre et l'arête est perpendiculaire aux fibres (*ce mode représente le travail du rabot à main*);
- le mode **0/90**, le plan de coupe et l'arête sont parallèles aux fibres, *il représente le travail d'une trancheuse si la surface de coupe est plane, ou celui d'une dérouleuse si la surface de coupe est cylindrique, c'est le mode qui demande les plus faibles efforts de coupe toutes choses égales par ailleurs*, THIBAUT (1988).

b - Notes sur le tranchage et le déroulage

Hormis la différence citée ci-dessus, les processus de coupe par tranchage et déroulage sont très similaires.

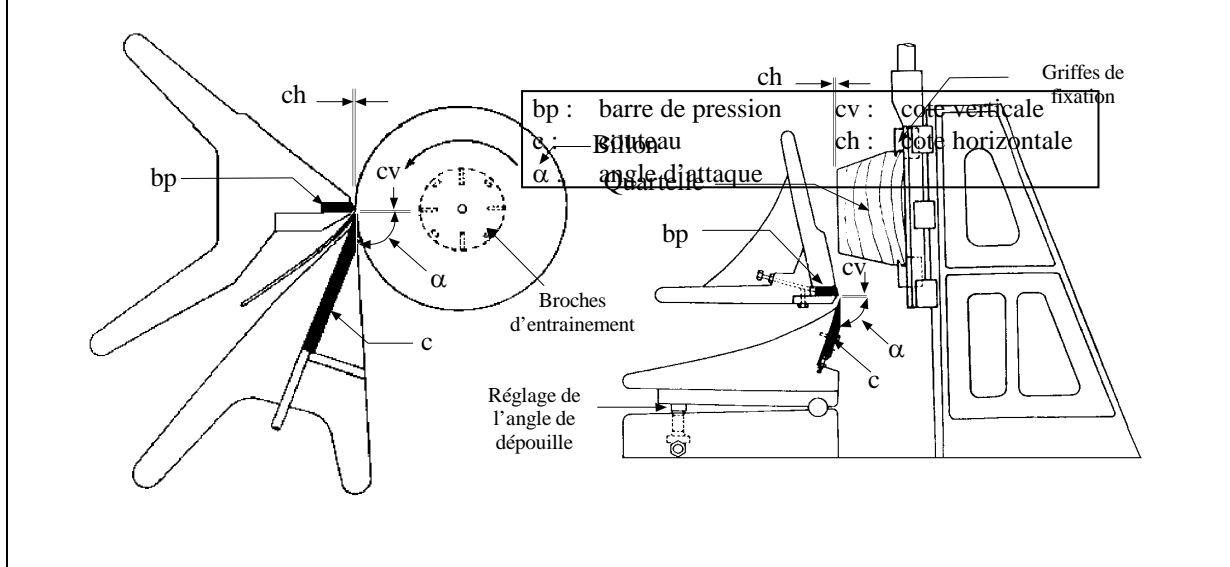
Ces deux technologies de coupe ne sont, toutefois, pas vouées à la même utilisation :

- C'est l'aspect décoratif qui est avant tout recherché pour les placages tranchés, afin d'économiser la matière première, l'épaisseur peut donc être la plus petite possible, à condition qu'elle soit suffisamment grande par rapport à la dimension des éléments constitutifs du bois (le diamètre maximum des vaisseaux ne dépasse qu'exceptionnellement 300 µm). De plus le placage une fois en place doit être suffisamment bien collé et bien protégé étant donnée sa fragilité propre. Les placages tranchés font en général 0.6 mm d'épaisseur mais il est possible d'envisager pour certains bois, l'utilisation de placages tranchés de 0.1 mm.

- Les placages déroulés sont majoritairement utilisés en structure sous forme de panneaux (bien qu'ils soient aussi de plus en plus utilisés en décoration). Pour diminuer le coup de la colle, il y a alors intérêt à ce que le placage soit le plus épais possible. L'expérience montre que pour une essence donnée, il existe une épaisseur maximale au-delà de laquelle il est impossible d'empêcher la fissuration (THIBAUT, 1988). L'industrie du contreplaqué est consommatrice de placages déroulés, la production mondiale était de 45 millions de m³ en 1991 (BALDWIN, 1995). La production de LVL (laminated veneer lumber) est aussi en plein essor. L'industrie de l'emballage et de fabrication d'allumettes utilise aussi ce type de débits. Les épaisseurs de placages déroulés industriellement varient de 1 à 6 mm.

Le rendement théorique du déroulage est en général meilleur que celui du tranchage. A partir d'une grume de 60 cm de diamètre, on obtient en la déroulant, un copeau continu de 265 mètres de long en 1 mm d'épaisseur (avec un noyau résiduel de 15 cm de diamètre). Si l'on tranche un carrelet (de 420x420 mm²) débité

Figure I - 5 Coupe transversale d'une trancheuse à droite et d'une dérouleuse à barre de pression fixe à gauche (LUTZ, 1974)



à partir de cette grume, on obtient alors 390 placages tranchés de 42 cm de large en 1 mm d'épaisseur soit 165 mètres de placages. En outre, lors du tranchage, les aspects qualitatif et décoratif priment, le quartelle est souvent réorienté, lors du débit, pour obtenir le meilleur aspect (dessin) de la feuille de bois (DEFRAMOND, 1990).

L'importance des phases de transition au début de la coupe, est une différence non négligeable entre les deux modes de coupe par tranchage ou déroulage. Au début du déroulage d'un billon de bois, il faut plusieurs tours avant d'atteindre un équilibre. Tout d'abord, il y a tendance au refus de coupe, ce qui entraîne une sur-épaisseur au tour suivant et une sous épaisseur au prochain tour. Le copeau étant très long, les phases transitoires n'affectent, pour les bois homogènes, qu'une petite portion de celui-ci. Par contre, pour le placage tranché, l'équilibre peut n'être jamais atteint lors du débit d'une feuille.

Une comparaison plus complète entre le tranchage et le déroulage, notamment sur rendements-matière et les différences dans la géométrie de coupe, a été faite par MARCHAL (1989).

I - 2.1. Les mécanismes de coupe en mode 0/90

Le tranchage ou le déroulage sont des opérations d'usinage du bois qui consistent à détacher dans le mode 0/90, un copeau de grandes dimensions. Ce copeau appelé placage déroulé ou placage tranché, constitue le produit fini ou semi-fini. La qualité de celui-ci peut être décrite schématiquement par : l'état de surface, l'importance de la fissuration et la régularité d'épaisseur. Elle dépend de :

- l'optimisation des réglages et des processus de coupe,
- la plus ou moins grande hétérogénéité du matériau (alternance de zones de densités ou d'orientations différentes).

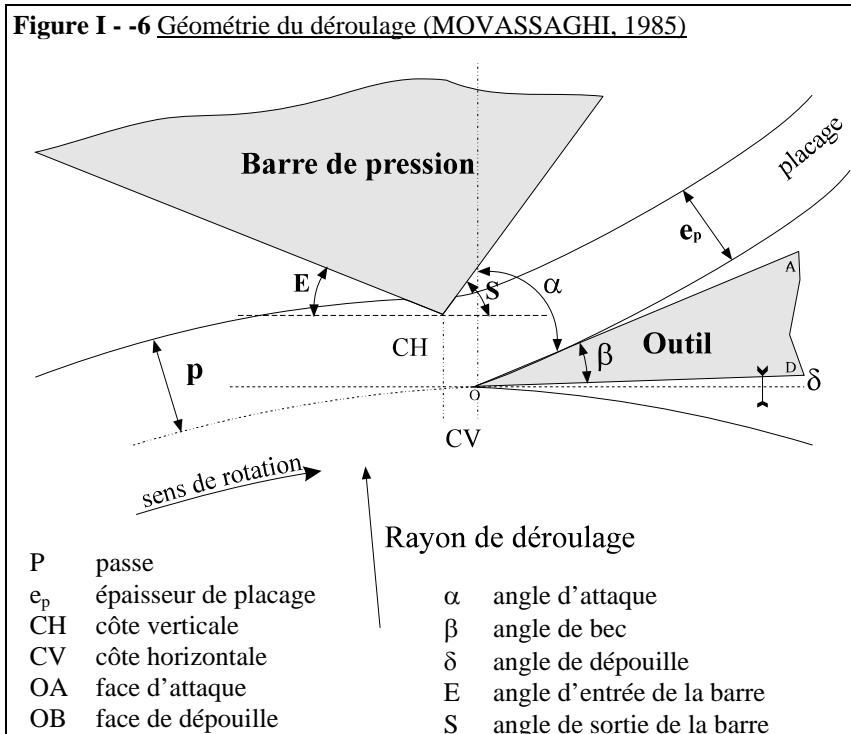
De nombreuses publications traitent de l'optimisation des réglages et des paramètres de coupe. Les ouvrages de LUTZ (1972) et LUTZ (1974) décrivent de façon détaillée les paramètres intervenant dans la production industrielle de placage déroulé ou tranché et, proposent une typologie semi-empirique des réglages optimaux pour la production de placage d'un grand nombre d'espèces nord américaines.

C'est THIBAUT en 1976 qui le premier a fait une description détaillée des mécanismes fondamentaux intervenant dans le déroulage. Dans son étude du processus de coupe par déroulage, THIBAUT (1988) décrit de façon complète l'évolution des efforts de coupe en fonction des variations d'épaisseur du placage, de l'angle de dépouille et propose une modélisation physico-mécanique simple de ces efforts.

Dans cette partie, nous ne faisons pas une nouvelle synthèse bibliographique sur le processus de coupe, les ouvrages de THIBAUT (1988), MOVASSAGHI (1985), MARCHAL (1989) et MOTHE (1988) le font déjà de façon complète et détaillée, mais, nous présentons sommairement les principaux résultats actuels sur le processus de coupe par déroulage.

I - 2.1.1. Paramètres de coupe

Figure I - -6 Géométrie du déroulage (MOVASSAGHI, 1985)



Les couteaux de dérouleuses industrielles sont des outils de grandes dimensions de 700x100x10 mm pour les petites tranches d'emballage à 3300x200x18 pour les dérouleuses de l'industrie du contreplaqué. La coupe du bois en mode 0/90 demande moins d'énergie que les deux autres modes (approximativement 5 fois moins que le mode 90/90 et deux fois moins que la coupe en mode 90/0). L'angle de bec peut être plus faible, il varie de 20 à 21°, sans trop de risque de retournement d'arête.

L'angle d'attaque est d'environ 70° et l'angle de dépouille varie de +/- 1° dans la plupart des cas.

Un grand nombre de dérouleuses sont équipées

d'une barre de pression statique angulaire dont l'angle d'entrée E est d'environ 15°, par contre l'angle de sortie S, peut être soit grand (70 à 100°) (Figure I - -6), soit petit (40-45°), la face de sortie de la barre sert alors de facette de décompression. Il existe aussi des barres rondes, rotatives ou rotatives motorisées.

La barre de pression sert à exercer localement un effort de compression qui s'oppose aux contraintes de traction responsables de la fissuration du placage (Figure I - -7). Les réglages de la barre de pression sont délicats (les contraintes locales mises en jeu dans le processus de coupe dépendent à la fois de la passe d'usinage et du matériau). La position de la barre de pression est décrite par deux paramètres :

- la cote horizontale, définit l'écrasement que subit le bois avant de passer devant l'arête,
- la cote verticale, définit l'avance dans le sens inverse de la coupe entre cette zone de compression et l'arête de l'outil.

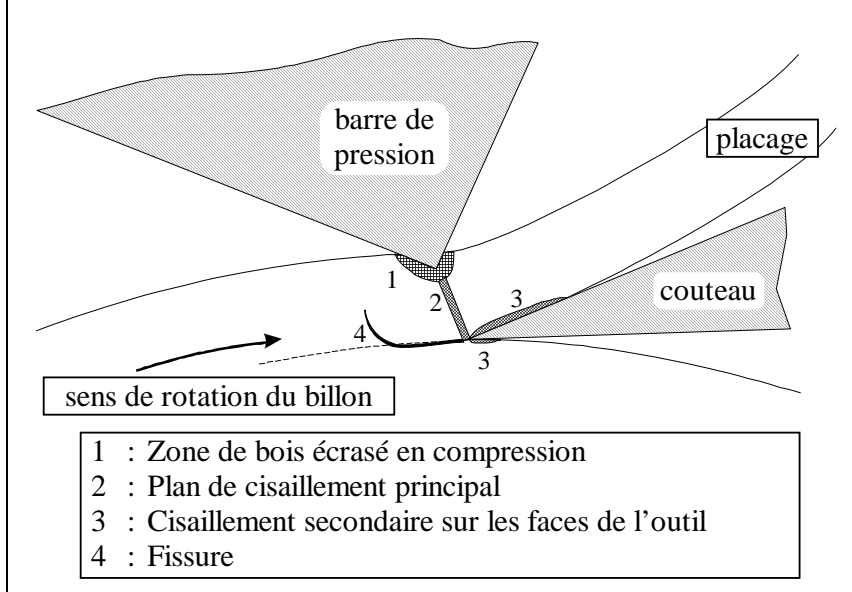
Pour une épaisseur de placage donnée, une avance trop forte rend la compression inefficace, une avance trop faible ou négative comprime inutilement le copeau entre la barre et l'outil, favorise à nouveau la fissuration et provoque de fortes variations d'épaisseur.

L'augmentation de la compression a d'abord des effets bénéfiques sur l'ensemble des critères de qualité du placage (...). Une compression trop forte semble aggraver à nouveau la fissuration du côté de l'outil alors qu'elle provoque l'apparition de fissurations et d'arrachements du côté de la barre.

Pour une épaisseur de placage donnée, et une qualité du bois donnée, il y a donc un optimum de réglage des cotes verticale et horizontale, (THIBAUT, 1988).

I - 2.1.2. Phénomènes physiques

Figure I - -7 Principaux mécanismes impliqués durant le déroulage (THIBAUT, 1992).



Les principaux phénomènes physiques intervenant dans le processus de coupe par déroulage sont les suivants (THIBAUT, 1989):

- un **cisaillement principal RT** concentré dans une zone très étroite assimilable à un plan qui rejoint l'arête de la barre et celle de l'outil.

- un **frottement outil-bois** : entre le copeau et la face d'attaque de l'outil, sur une longueur voisine de l'épaisseur du placage ; et entre la face de dépouille et le billon sur une facette dont la longueur dépend de l'angle de dépouille ou de la sur-épaisseur éventuelle après la coupe.

- un **poinçonnement de la**

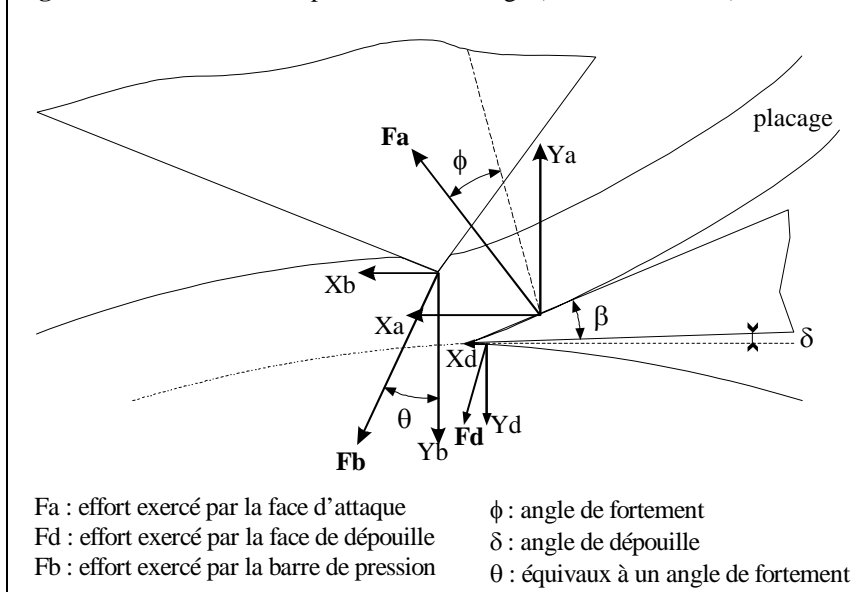
barre de pression, qui pénètre sur une petite zone de plusieurs dixièmes de millimètres dans le bois. Le lumen des cellules ainsi comprimé s'effondre, la contrainte de compression imposée par le nez de la barre est supérieure ou égale à la contrainte limite élastique en compression transverse. Dans le cas du bois humide, cette déformation est presque entièrement réversible.

- une **rupture en traction** en mode I devant l'arête de l'outil.

- une **déformation élastique** globale du rondin (S_0) sous l'action de l'ensemble outil + barre. Cette déformation peut être une expansion ou une compression ; après le passage devant l'arête, le rondin reprend sa forme initiale, la surface ainsi créée n'a donc pas la bonne cote.

I - 2.1.3. Efforts de coupe, frottement et décomposition F_a , F_d

Figure I - -8 Efforts de coupe lors du déroulage (THIBAUT, 1989)



Les efforts de coupe exercés par l'outil sur le rondin de bois déroulé peuvent être décomposés en trois composantes principales (THIBAUT, 1988) :

- **F_a** la résultante des efforts exercés par la face d'attaque de l'outil sur la feuille de bois en formation,

- **F_d** résultante des efforts exercés par la face de dépouille sur le rondin de bois,

- **P** la résultante des efforts exercés par l'arrondi de l'arête sur le bois. Pour des outils bien affûtés, la résultante P est négligeable devant F_a et F_d . Dans les expérimentations de microdéroulage réalisées par

Thibaut, la valeur de P ne dépasse pas 2 % des plus petits efforts F_a et F_d mesurés, ceci pour un diamètre d'arête apparent de l'ordre du micron.

Les efforts exercés par la barre de pression sur le billon de bois sont résumés par **F_b** qui correspond à la somme des résultantes des efforts exercés sur, la face d'entrée, la face de sortie et le nez de la barre.

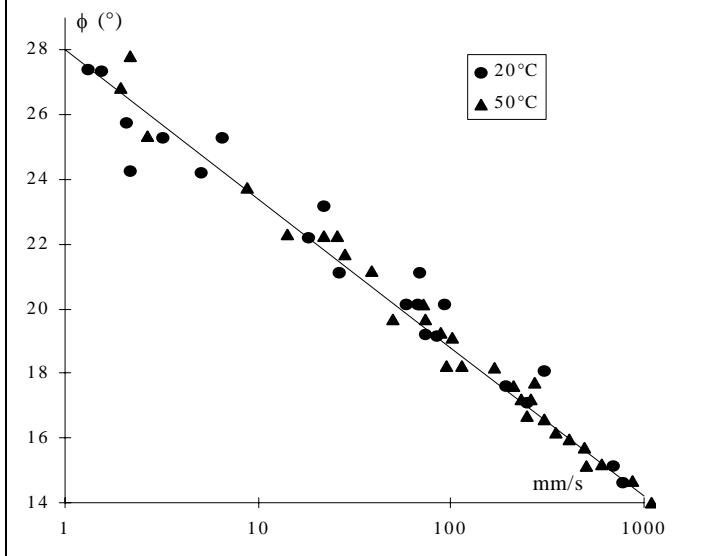
Les efforts de coupe traduisent les interactions bois-métal, dans ces interactions, les efforts dus aux frottements ne sont pas négligeables. On considère que le frottement bois-métal obéit à la loi de Coulomb:

$$\mu = \frac{T}{N} = \tan(\phi)$$

où μ correspond au coefficient de frottement de Coulomb, dans le cas où le bois est humide, $\phi = \arctan\left(\frac{T}{N}\right)$

est l'angle de frottement et T et N représentent les composantes de l'effort sur une des faces de l'outil, par exemple.

Figure I - -9 influence de la vitesse de coupe sur l'angle de frottement pour *Castanea sativa* (THIBAUT, 1992)



Il est en général admis que le coefficient de frottement ne dépend ni de l'orientation, ni de la rugosité, ni de la densité du bois (cf. THIBAUT, 1988). Par contre, il dépend de la vitesse de coupe, MOVASSAGHI, MOTHE et THIBAUT (1986) proposent, pour le Châtaignier, une évolution linéaire de ϕ en fonction du logarithme de la vitesse dans la plage de vitesse de 1 à 1000 mm/s:

$\phi = 28 - 4.6 \log(V)$ où V est la vitesse en mm/s et ϕ l'angle de frottement en degré. Les autres facteurs susceptibles d'influencer le coefficient de frottement sont (MARCHAL, 1989):

- l'humidité lorsque le bois est au dessous du point de saturation des fibres,
- la présence de matières +/- lubrifiantes comme les résines,
- la présence d'une flore bactérienne

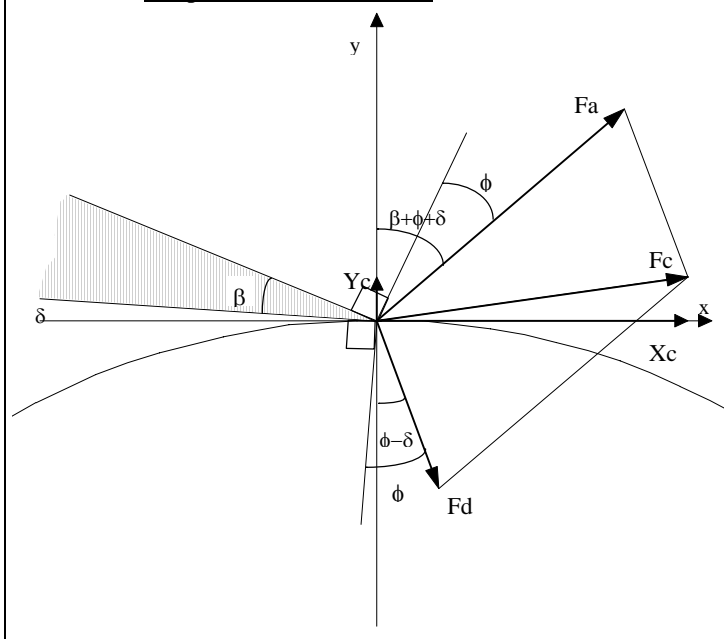
importante.

La température n'influence pas a priori le coefficient de frottement (Figure I - -9), mais il est possible que pour des températures élevées (90-100°C), elle favorise le dessèchement rapide de la surface du bois en superficie, ce qui augmenterait l'angle de frottement.

Calcul des résultantes Fa et Fd à partir des composantes d'efforts Xc et Yc du couteau :

A partir des efforts tangentiels et normaux au billon : Xc et Yc exercés par le couteau sur le bois, il est possible par une construction géométrique, de déduire les valeurs des efforts Fa et Fd exercés par la face d'attaque et la face de dépouille sur le bois (THIBAUT, 1988) :

Figure I - -10 Analyse schématique des effort sur le couteau (d'après THIBAUT, 1988)



$$F_a = \frac{\cos(\phi - \delta)}{\sin(\beta + 2\phi)} \times X_c + \frac{\sin(\phi - \delta)}{\sin(\beta + 2\phi)} \times Y_c$$

$$F_d = \frac{\cos(\phi + \beta + \delta)}{\sin(\beta + 2\phi)} \times X_c - \frac{\sin(\phi + \beta + \delta)}{\sin(\beta + 2\phi)} \times Y_c$$

où ϕ est l'angle de frottement, δ l'angle de dépouille et β l'angle de bec du couteau.

Il est possible de la même façon de distinguer les efforts exercés par la face d'entrée (Be) et de sortie (Bs) de la barre de pression. Toutefois, contrairement à Xc et Yc, les efforts tangentiels et normaux au billon : Xb et Yb exercés par la barre sont proportionnelles entre eux (THIBAUT, 1989), le facteur de proportionnalité dépendant de la géométrie de la barre et de l'angle de frottement bois/barre à la vitesse considérée. De ce fait, la direction de l'effort Fb reste sensiblement la même, les

valeurs des efforts Be et Bs sont elles aussi proportionnels. La décomposition en Be et Bs apporte moins que la décomposition en Fa et Fd , c'est pourquoi par la suite nous utiliserons pour l'analyse simplement la résultante Fb .

I - 2.1.4. Principaux résultats et modèles simplifiés

Les résultats synthétiques que nous présentons sont ceux obtenus par THIBAUT (1988).

I - 2.1.4.1. Qualité du placage

En général, l'intensité de la fissuration de la face inférieure du copeau est un bon critère de qualification du placage. mais le tuilage de celui-ci, peut, s'il n'est pas bien séché à plat, poser certains problèmes (placages plus fragiles) durant son utilisation ultérieure.

Tuilage du placage:

Un placage qui vient d'être usiné, soumis à son propre poids, présente une courbure d'autant plus forte (ou un rayon de courbure d'autant plus petit) que le placage est mince, à condition que l'influence de son poids propre ne soit pas trop importante. Après une récupération visco-élastique, le placage se stabilise avec un certain rayon de courbure qui peut-être de signe contraire à la courbure initiale.

Thibaut définit un indice de déformation du copeau :

$\varepsilon = p \cdot (C_f - C_i)$ où p est la passe d'usinage, C_f est la courbure du rondin et C_i est la courbure résiduelle du copeau. L'auteur constate expérimentalement, qu'en moyenne, cette variation de courbure ε (nombre sans dimension exprimé en %) est indépendante du rayon de déroulage, ceci pour une épaisseur de placage donné. A partir de l'indice de déformation, il existe une courbure du billon de déroulage ou un rayon de déroulage, pour laquelle la courbure du copeau est nulle. Au dessous de ce rayon idéal la courbure du copeau est dans le sens inverse de celle du billon et inversement. Pour des très petits diamètres de déroulage, la courbure du copeau est très prononcée mais cela ne veut pas dire qu'il soit très fissuré.

Fissuration et effet Horner :

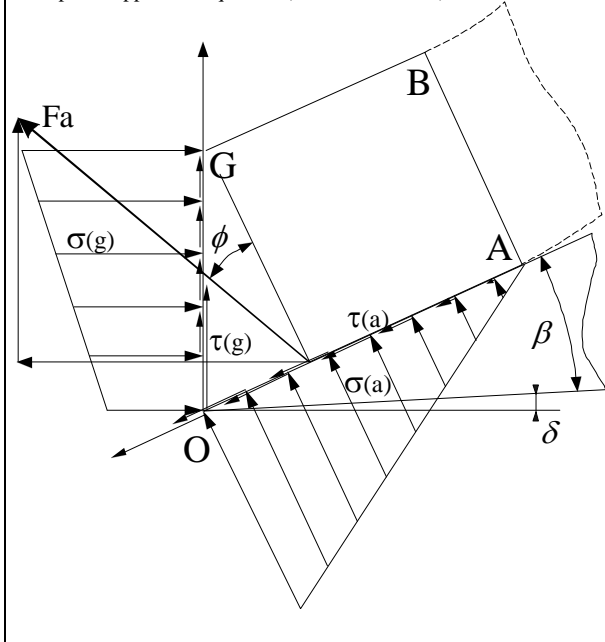
THIBAUT (1988) distingue dans le processus de coupe par déroulage des microfissures et des macrofissures.

- Les microfissures sont des phénomènes locaux qui se produisent systématiquement au voisinage de l'arête, et qui n'affectent qu'une à trois rangées de cellules.
- Les macrofissures par contre, affectent toujours un pourcentage non négligeable du placage, elles apparaissent à partir d'une certaine épaisseur de placage. Le processus de coupe devient quasiment périodique avec des variations importantes des efforts de coupe. L'épaisseur pour laquelle apparaît la fissuration est d'autant plus grande que la densité est faible.

Progression de la fissure :

La déformation imposée par la géométrie du couteau au copeau lors du déroulage, crée une zone de contrainte en traction juste devant l'arête. Lorsque le facteur d'intensité de contrainte dépasse un seuil critique K_{Ic} , une fissure s'amorce en mode I dans une direction quasiment tangentielle à la direction de déroulage. Après la libération brutale des contraintes de traction, la fissure se propage alors vers la surface supérieure du copeau sous l'action combinée des contraintes de traction et de cisaillement induites par la flexion du copeau.

Figure I - -11 Distribution des forces surfaciques aux frontières du copeau supposé en équilibre (THIBAUT, 1988)



Arrachements ou effet Horner :

Lors du déroulage de bois tendre à de faibles épaisseurs de copeau, il arrive fréquemment que le copeau formé ait un très mauvais état de surface : placage pelucheux, forte variation d'épaisseur, on parle alors de flambement du copeau ou effet Horner (MOTHE, 1988). La coupe d'un bois de faible densité, est comparable à la coupe d'une mousse ou d'une éponge humide. Elle est discontinue : dans un premier temps, le bois est fortement comprimé devant l'outil sans être coupé, puis il rompt brutalement libérant les contraintes accumulées.

Lors de l'élaboration du copeau, même en l'absence de barre de pression, le mécanisme dominant dans la formation de ce copeau est un cisaillement plan dans une direction proche de la normale. Tout au long de ce plan de cisaillement se distribuent des efforts surfaciques normaux de compression dans le sens du déroulage (Figure I - -11). Il existe une passe critique où le niveau des contraintes normales de compression sur le plan de glissement est partout supérieur à la contrainte au premier coude de la courbe de compression

transversale du bois humide. Cette passe est d'autant plus petite que le coefficient de frottement bois-métal est plus faible, que le bois est plus dense et que le rapport entre la « résistance à la compression » et la « résistance au cisaillement » est plus élevé (THIBAUT, 1988b). Notons aussi qu'en augmentant la vitesse de coupe, il est possible de diminuer cette passe critique, l'eau contenue dans le lumen des cellules, qui n'a pas le temps d'en sortir provoque une légère densification locale du bois.

Il existe donc une plage d'épaisseur, où l'écoulement du copeau est continu, il n'est ni trop fissuré ni trop déformé. Cette plage d'épaisseur est limitée par une passe minimum et une passe maximum au dessus et en dessous de laquelle, le copeau est endommagé. En règle générale, la passe minimum diminue quand la densité du bois augmente, elle est limitée à 0.3 à 0.5 mm pour les bois de faible densité, du fait de l'effet Horner. De même, la passe maximum diminue quand la densité du bois augmente, cette fois-ci c'est l'apparition de fissure qui limite rapidement l'épaisseur de placage des bois denses. THIBAUT (1988) donne comme exemple l'Okoumé (*Aucoumea klaineana*) qui a une densité à 12 % d'humidité de 0.32, une passe minimum avant flambement du copeau de 0.3 mm et une passe maximum sans barre de pression de 1.2 mm. Dans les mêmes conditions le Buis (*Buxus sempervirens*) qui a une densité de 1, fissure fortement pour des passes supérieures à 0.25 mm, par contre, le déroulage de placages de 0.05 mm est tout à fait possible.

I - 2.1.4.2. Efforts de coupe

L'effort F_a exercé par la face d'attaque du couteau ne dépend quasiment que de l'épaisseur du placage usiné (Figure I - -12) :

$$F_a = A \cdot p + C \cdot (1 - e^{-p/u}),$$

A dépend de l'angle de coupe, de l'angle de frottement et de la +/- grande résistance au cisaillement de roulement du bois, p est la passe d'usinage et u est une petite dimension (30 à 50 μm).

L'effort F_d dépend de l'intensité des frottements sur la face de dépouille, Thibaut distingue trois cas :

- les efforts de dépouille occasionnés par le roulement de cellules de bois non sectionnées, pour des angles de dépouille positifs et en l'absence de sur-épaisseur,

$$F_{d1} = D + G \cdot e^{-v \cdot \delta},$$

D et G dépendent essentiellement de la résistance à la compression transverse du bois, δ est l'angle de dépouille ;

- les efforts de dépouille occasionnés par une compression du billon par le dos de l'outil, lorsque l'angle de dépouille est négatif (Figure I - -12),

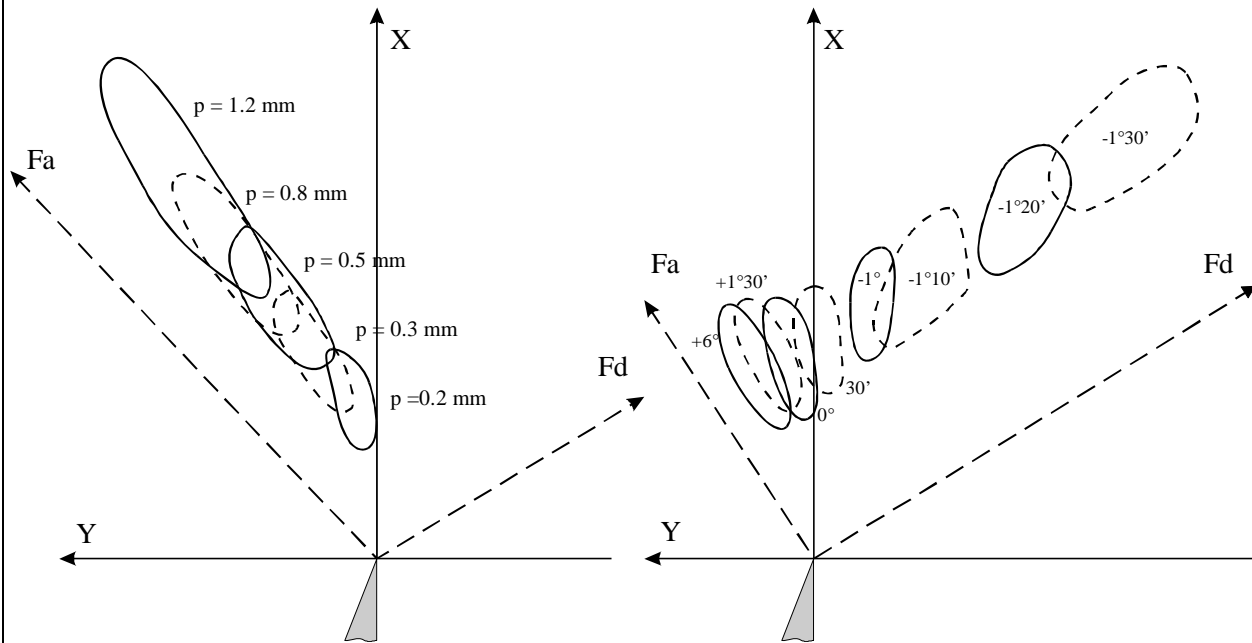
$$F_{d2} = M \cdot R \cdot \delta^2 \cdot \log\left(\frac{R_0}{R}\right)$$

- les efforts de dépouille occasionnés par une compression du billon par le dos de l'outil, lorsqu'il y a une sur-épaisseur.

$Fd_3 = N \cdot S \cdot \log\left(\frac{R_0}{R}\right)$, M et N sont des variables qui dépendent du module d'élasticité transversal du bois,
S est la sur-épaisseur qui dépend de l'équilibre global des forces mises en jeu.

Influence de l'épaisseur du copeau sur les efforts de coupe, les « ellipses » représentent les nuages de point pour une passe d'usinage donnée, (OBEICHE, angle de dépuille : 1°), d'après THIBAUT (1988).

Influence de l'angle de dépuille sur les efforts de coupe, les « ellipses » représentent les nuages de point pour un angle de dépuille donné, (OBEICHE, épaisseur de copeau : 0.3 mm), d'après THIBAUT (1988).



I - 2.1.4.3. Modèles simplifiés (THIBAUT, 1992)

A partir de nombreuses expérimentations sur une microdérouleuse instrumentée, Thibaut propose un certain nombre de modèles simples (énumérés dans ce paragraphe) basés sur les propriétés mécaniques du bois humide, pour décrire le processus de coupe par déroulage des bois homogènes.

F_a , F_d et F_b sont les forces résultantes exercées respectivement : par la face attaque, par la face de dépuille et par la barre de pression et X_i , Y_i sont les composantes tangentielles et normales de ces forces.

Efforts exercés par la face d'attaque de l'outil

La composante normale de l'effort exercé par la face d'attaque du couteau Y_a est fortement liée aux contraintes de cisaillement le long du plan de cisaillement OG (Figure I - -14). « $A \cdot (p+u) \cdot \tau$ » décrit cette action de cisaillement, le terme « $B \cdot Y_b$ » est un facteur correctif prenant en compte l'action de la barre de pression. Pour une même essence et pour les mêmes paramètres de coupe X_a et Y_a sont proportionnels. Remarquons encore qu'en l'absence de barre de pression X_a traduit l'état de contrainte en compression exercé sur le plan de glissement OG.

$$\vec{F}_a = \vec{X}_a + \vec{Y}_a$$

$$(T1) \quad Y_a = A \cdot (p+u) \cdot \tau + B \cdot Y_b$$

$$X_a = Y_a \cdot \tan(\beta + \phi + \delta)$$

p : épaisseur du placage
u : petite longueur comparable à un diamètre cellulaire
 τ : contrainte de cisaillement de roulement du bois humide dans la direction transversale pour une déformation angulaire $\gamma = 0.38$ rd
A et B : constantes dépendant de la géométrie de coupe
 Y_b : composante normale à la coupe de F_b
 β : angle de bec
 δ : angle de dépuille
 ϕ : angle de frottement bois-métal

Effort exercé par la face de dépuille de l'outil

La composante normale de l'effort exercé par la face dépouille du couteau Y_d peut se décomposer en trois parties.

- le premier terme « $v \cdot \sigma_y$ » décrit l'écrasement en compression des cellules non entièrement coupées par l'arête et qui roulent sous la face de dépouille,
- le second terme « $C \cdot E_R \cdot S_e$ » dépend du niveau réel de la surface usinée après la coupe. Si S_e est dirigé dans le sens inverse de l'axe du billon, après un recouvrement élastique immédiat, la nouvelle surface de bois créée sera compressée par le dos de l'outil. Ceci n'arrivera pas si S_e est négatif, ainsi :

$$C = 0 \text{ quand } S_e \geq 0 \text{ et } C > 0 \text{ quand } S_e < 0$$

C dépend de la géométrie de coupe.

- Le troisième terme « $D \cdot E_R \cdot R \cdot \delta^2$ » décrit l'effort de compression imposé par face de dépouille de l'outil sur le billon quand l'angle de dépouille est négatif, ainsi :

$$D = 0 \text{ quand } \delta \geq 0 \text{ et } D > 0 \text{ quand } \delta < 0$$

L'action de compression de la face de dépouille est très sensible aux angles de dépouille négatifs et au rayon de déroulage.

$$\vec{F}_d = \vec{X}_d + \vec{Y}_d$$

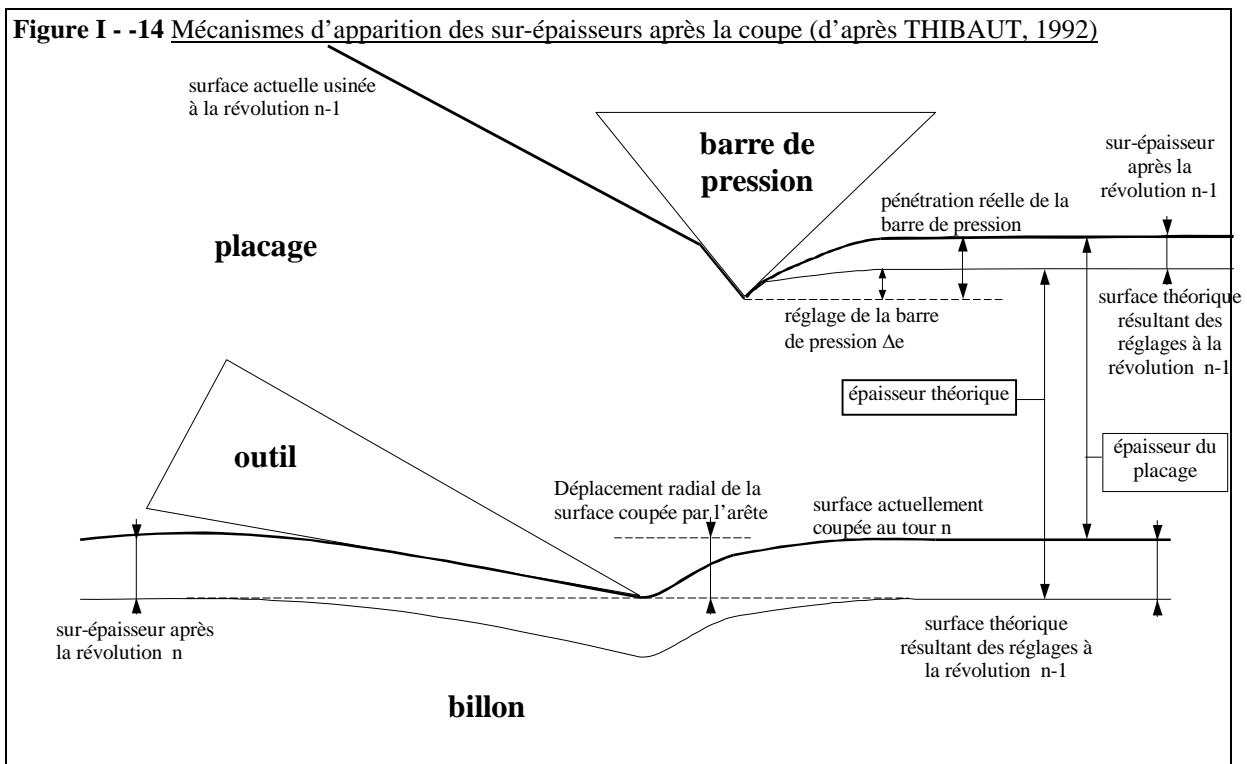
$$(T2) \quad Y_d = v \cdot \sigma_y + C \cdot E_R \cdot S_e + D \cdot E_R \cdot R \cdot \delta^2$$

$$X_d = Y_d \cdot \tan(\phi - \delta)$$

v : longueur équivalente aux cellules écrasées
 σ_y : contrainte de compression au premier coude de la courbe de compression transverse du bois humide, correspondant à une déformation ε d'environ 2 %.
 E_R : module d'élasticité radial du bois humide.
 S_e : déplacement élastique du billon de bois au niveau de l'outil.
 R : rayon de déroulage.

Remarquons que lorsque l'angle de dépouille est positif et qu'il n'y a pas de sur-épaisseur,

$$Y_d = v \cdot \sigma_y$$



Efforts exercés par la barre de pression

D'après Thibaut, les efforts exercés par la barre de pression sont proportionnels à l'enfoncement de la barre de pression dans le bois ($S_e' + \Delta_e$) et à la contrainte σ_y .

$$\vec{F}_b = \vec{X}_b + \vec{Y}_b$$

$$(T3) \quad Y_b = G \cdot \sigma_y \cdot (S_e' + \Delta_e)$$

$$X_b = Y_b \cdot \tan(\theta)$$

S_e' : est le déplacement élastique du billon de bois au niveau de l'outil à la révolution précédente. Si S_e' est positif, alors la surface après l'usinage est plus haute que celle prévue avec une sur-cote d'épaisseur S_e' . Cette sur-épaisseur sera comprimée par la barre de pression à la révolution suivante et agira alors comme une compression horizontale supplémentaire.

Δ_e : est la pénétration de la barre de pression par rapport à sa position initiale théorique : lorsque la barre effleure le placage sans le toucher, le taux de compression exprimé en % est égale à Δ_e / p .

G : dépend de la géométrie de la barre de pression.

θ : est équivalent à un angle de pression, il dépend, lui aussi de la géométrie de la barre et de l'angle de frottement bois-métal ϕ .

Probabilité d'apparition de fissures

La formation d'une fissure débutera lorsque le facteur d'intensité de contrainte K devant l'outil sera supérieur à K_{Ic} facteur critique d'intensité de contrainte, qui est une propriété intrinsèque du matériau.

K peut être calculé par une méthode de calcul par éléments finis à partir des valeurs des forces qui agissent aux limites du l'échantillon de bois analysé. Thibaut montre que le facteur d'intensité de contrainte peut être décrit, dans une première approche, comme une composition linéaire de Y_a et Y_b . Alors que des valeurs élevées de Y_a auront tendance à provoquer l'ouverture de la fissure, les valeurs élevées de Y_b diminueront K et la probabilité d'ouverture de fissure.

Les conditions d'ouverture d'une fissure seront :

$$(T4) \quad M \cdot Y_a - N \cdot Y_b \geq K_{Ic}$$

M et N : dépendent essentiellement de la géométrie de la coupe
 K_{Ic} : facteur critique d'intensité de contrainte caractéristique de la résistance à la rupture du bois humide

I - 2.2. Influence de la température

Le bois est un matériau viscoélastique sensible à la température, à l'humidité et à l'écoulement du temps. L'élévation de la température provoque une diminution de l'ensemble des propriétés mécaniques du bois. Cette particularité est d'ailleurs utilisée depuis longtemps, dans la fabrication de pirogues ou de tonneaux, par exemple.

Suivant les auteurs, les propriétés mécaniques du bois décroissent généralement de façon linéaire (GERHARDS, 1982).

D'après les modèles de Thibaut résumés ci-dessus, les quatre principales propriétés mécaniques du bois humide, intervenant dans la modélisation du processus de coupe sont :

- E_R : le module d'élasticité radiale (ou plus généralement transversal),
- σ_y : la contrainte au premier coude de la courbe de compression transversale,
- τ : la contrainte de cisaillement RT pour une déformation angulaire de 0.38 rd (22°),
- K_{Ic} : la résistance à la rupture en RT mode I.

I - 2.2.1. Quelques propriétés mécaniques transversales du bois vert

Compression transverse

GRIL & NORIMOTO (1993), LUI & al (1993) et MOROOKA & al (1994) ont étudié la compression transversale du bois en fonction de sa densité, de son humidité et de la température.

Les principaux résultats sur l'influence de la température montrent que le logarithme de la contrainte au premier coude σ_y décroît linéairement quand la température augmente. La figure Figure I - -15 illustre cette relation pour *Chamaecyparis obusta* Endl. (dont la densité à 12 % d'humidité $D_{12\%}$ est comprise entre 0.45 et 0.50). Les points carrés ou ronds sur le graphique représentent deux essais différents, sur des machines d'essais différentes et pour des éprouvettes n'ayant pas les mêmes dimensions. Le ratio entre les valeurs à 100 et à 20°C est de 4,3.

Le module d'élasticité radiale E_R , par contre, évolue un peu différemment quand la température augmente. Jusqu'à 50°C, le module décroît assez lentement quand la température croit, entre 50 et 100°C E_R

décroît brutalement (nous verrons par la suite que dans cette plage de température, des phénomènes transitoires rendent le bois plus plastique), au-dessus de 100°C la décroissance ralentit de nouveau (Figure I - -16). Le ratio entre les valeurs à 100 et à 20°C varie de 5 à 6.

Figure I - -15 Relation entre σ_y et la température (d'après MOROOKA & al, 1994).

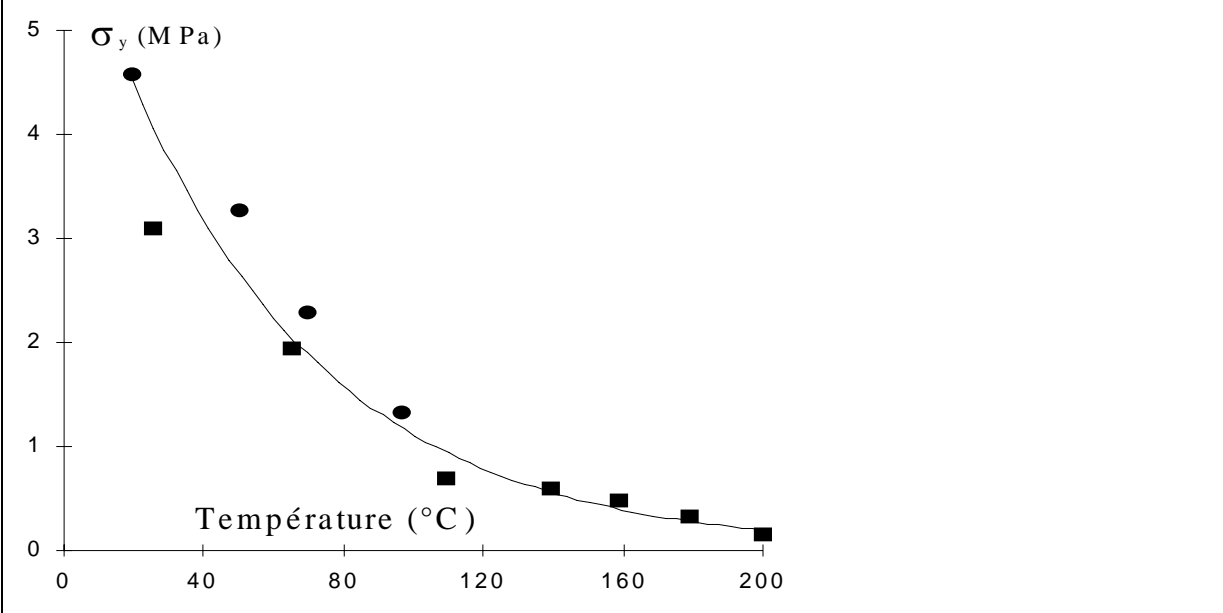
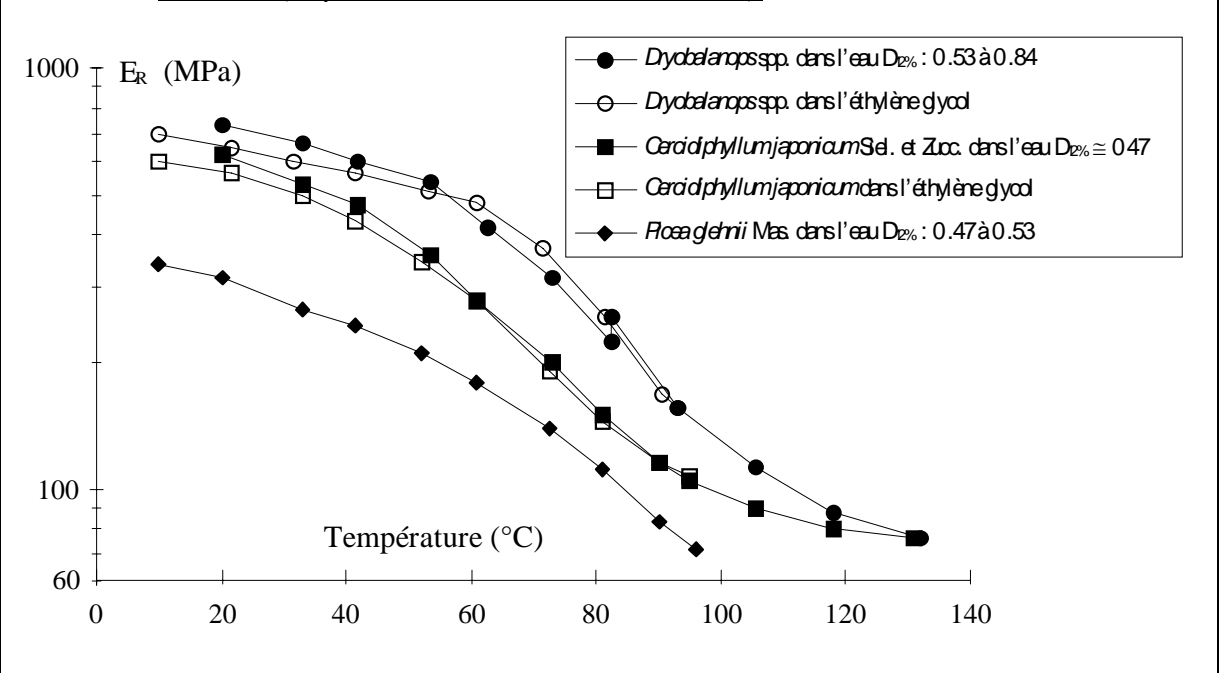


Figure I - -16 Evolution du module radial du bois humide en fonction de la température pour trois essences différentes (d'après NORIMOTO in BERRADA, 1991).



Résistance à la rupture

Pour une même essence, à une humidité et une température donnée, l'énergie de rupture G_I est proportionnelle au carré du facteur d'intensité de contrainte K_I , dans le cas d'un matériau orthotrope comme le bois, le terme de proportionnalité est une fonction des constantes rhéologiques du matériau (SIH & al, 1965) et (VALENTIN et ADJANOHOUN, 1992):

$$G_I = K_I^2 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{22}}{\alpha_{11}} + \frac{2\alpha_{12} + \alpha_{66}}{\alpha_{11}}}$$

où, $\alpha_{11} = 1/E_L$, $\alpha_{22} = 1/E_T$, $\alpha_{66} = 1/G_{LT}$, $\alpha_{12} = \nu_{LT}/E_L$.

Le facteur d'intensité de contrainte critique K_{Ic} (qui est lié par la même équation à l'énergie de rupture critique $G_{I,c}$) est estimé par calcul à partir de valeurs expérimentales.

Dans le cas d'une éprouvette pré-entaillée sur une longueur « a », le facteur d'intensité de contrainte peut s'écrire : $K_m = \alpha \sigma_m \sqrt{\pi a}$ où σ_m est la contrainte appliquée à l'infini (m, nous le verrons plus loin est le mode de rupture), « α » dépend de la géométrie et des constantes élastiques du matériau.

↳ L'influence de la température sur les critères de rupture n'est pas très claire et les résultats sont souvent contradictoires. Toutefois, SCHNIEWIND & al (1982) ont calculé K_{Ic} à partir d'essais SEN (Single-Edge Notch) en traction sur du bois saturé de trois essences japonaises (*Fagus crenata* Blume, *Chamaecyparis obusta* Endl. et *Cryptomeria japonica* D. Don.) à trois températures différentes (20, 40, 60°C). Les auteurs constatent à partir de leurs calculs, que K_{Ic} décroît linéairement quand la température augmente, le ratio entre les valeurs à 20 et à 60°C varie de 0.71 à 0.63 suivant les essences.

I - 2.2.2. Déroulage

BALDWIN (1995) mentionne qu'en 1911 les grumes de *Pinus ponderosa* étaient déjà étuvées pendant 48 heures avant d'être déroulées. Ce préconditionnement avait pour objectif à l'époque de détacher l'écorce et « produire un placage lisse ».

Actuellement dans l'industrie du déroulage, certaines essences sont étuvées, d'autres ne le sont pas. Dans l'industrie du tranchage les grumes sont presque systématiquement étuvées.

Le choix industriel d'étuver une essence plutôt qu'une autre ainsi que les modalités d'étuvage, reste très empirique, mais le déterminisme principal est la densité de l'essence considérée. Plus une essence est dense, plus elle a besoin d'un étuvage à température élevée. LUTZ (1974) propose une relation quasiment linéaire entre l'infradensité et la température d'étuvage (Tableau I - 5).

Tableau I - 5 Températures d'étuvage suggérées par LUTZ (1972) pour quelques essences nord américaines

Espèces	Infradensité	Plage de températures recommandées en °C	
		Déroulage	Tranchage
<i>Cecropia peltata</i>	0.26	10-27	21-27
<i>Tilia americana</i>	0.32	4-21	4-21
<i>Acer negundo</i>	0.41	27-49	49-60
<i>Jugulans nigra</i>	0.51	66-82	66-82
<i>Betula lenta</i>	0.60	60-71	71-82
<i>Metriosideros polymorpha</i>	0.70	77-82	93-99
<i>Quercus virginiana</i>	0.81	71-77	93-99

En dehors de l'usinage lui-même, l'étuvage apporte certains avantages : il facilite l'écorçage et élimine certains agents biologiques xylophiles, le placage obtenu sèche plus rapidement et il est plus facile à sécher à plat.

Pour ce qui est de la qualité des placages, il est généralement admis que l'étuvage, en augmentant la plasticité du bois, diminue la fissuration des placages, surtout pour les bois denses.

↳ En reprenant les modèles de Thibaut, mais cette fois-ci pour un déroulage sans barre de pression on a :

$$(T1) \Rightarrow Y_a = A \cdot (p + u) \cdot \tau \quad \text{et} \quad (T4) \Rightarrow M \cdot Y_a \geq K_{Ic}$$

la condition pour qu'apparaisse une ouverture devient alors :

$$M \cdot A \cdot (p + u) \cdot \tau \geq K_{Ic} \Rightarrow \frac{\tau}{K_{Ic}} \geq M \cdot A \cdot (p + u)$$

Si τ / K_{Ic} diminue, c'est à dire que τ est plus sensible à l'élévation de la température que K_{Ic} , alors, pour les mêmes conditions de coupe la probabilité d'ouverture de fissure diminue.

Pour les bois tendres, par contre, l'étuvage augmente la rugosité (placage pelucheux).

↳ il est possible que le rapport σ_y / τ diminue lorsque la température augmente, c'est à dire que σ_y soit plus sensible à l'élévation de la température que τ . La diminution de ce rapport favorise l'écrasement des cellules devant le plan de cisaillement OG (§ I-2.1.4.1), ce qui augmente le risque de flambement du copeau et donne des placages ayant un très mauvais état de surface.

Pratiquement, la température décale la plage d'écoulement continu du copeau sur un axe représentant l'épaisseur du placage. D'un côté, la température permet des passes d'usinage plus grandes sans fissure, de l'autre côté, elle augmente la passe minimum en favorisant l'effet Horner.

L'étuvage peut aussi provoquer une dilatation de l'outil et de la barre, ce qui, en modifiant la cote horizontale, crée une sur-pression et provoque des variations d'épaisseur du placage (d'après la bibliographie de MOVASSAGHI, 1985).

La puissance nécessaire pour dérouler une grume donnée dans des conditions définies, diminue quand la température augmente (BALDWIN, 1995), (LUTZ, 1974).

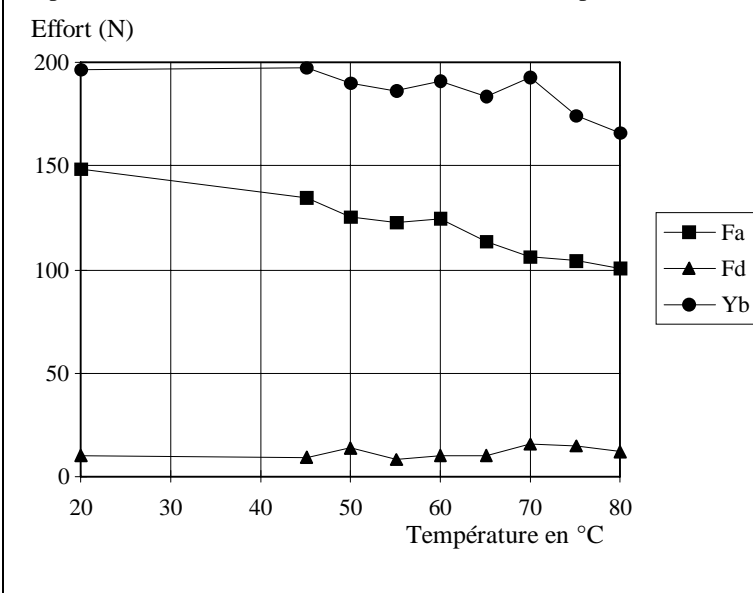
↳ D'après THIBAUT (1988), mis à part les phénomènes de friction de l'ensemble du dispositif de coupe, la puissance dépensée lors de la coupe correspond au produit du rayon de déroulage et des composantes tangentielles des efforts exercés par la barre, la face d'attaque et la face de dépouille :

$$P = (X_a + X_d + X_b) \cdot R \quad (T5)$$

ou R est le rayon de déroulage

Dans les mêmes conditions de coupe, X_a , X_d et X_b sont proportionnels à Y_a , Y_d et Y_b , ils dépendent donc d'après les modèles de Thibaut de σ_y et de τ . Il est donc normal que si σ_y et τ diminuent avec la température, la puissance P diminue aussi.

Figure I - -17 Evolution des efforts de coupe en fonction de la température (MARCHAL & al, 1993). *Quercus ilex*, p = 1 mm.



↳ MARCHAL (1989) a mesuré expérimentalement l'influence de la température sur les efforts de coupe pour trois Chênes méditerranéens, sur une plage de 20 à 80°C.

La tendance générale est une diminution de F_a quand la température augmente, Y_b baisse légèrement et F_d est plutôt stable. Les résultats sont cependant souvent contradictoires : quand la température augmente d'autres phénomènes apparaissent comme la diminution de la fissuration ou l'augmentation de la sur-épaisseur. L'effort exercé par la face d'attaque F_a oscille fortement lorsque le copeau est très fissuré, il est en moyenne plus faible lorsque le copeau est moins fissuré. C'est pourquoi quand la température augmente, la fissuration diminuant, F_a risque d'augmenter plutôt que l'inverse.

De même, lorsque la température augmente, la sur-épaisseur risque d'augmenter sous l'influence de phénomènes de dilatation, F_d augmente sous l'action de cette sur-épaisseur. Il est donc souvent difficile de distinguer l'influence réelle de la température sur les efforts de coupe. Si tant est qu'on y arrive (figure Figure I - -17), la diminution des efforts sur la plage de températures étudiées (20 à 80°C) ne dépasse pas 45 % pour X_c et Y_c et 30 % pour F_a , alors que sur la même plage de température σ_y , par exemple, diminue de 65 %.

↳ L'étuvage est donc, mis à part les bois tendres, plutôt bénéfique à la qualité du placage. Mais son principal inconvénient est l'apparition, à partir d'une certaine température, d'importantes fentes à coeur (LUTZ, 1970), (LUTZ, 1974) et (BALDWIN, 1995). Il est admis que plus la température est élevée, plus les fentes sont importantes. Le mécanisme principal de l'ouverture est induit par la **recouvrance hygrothermique**.

⇒ Nous avons peu évoqué l'influence de l'humidité ; elle joue un rôle important essentiellement lorsque le taux d'humidité du bois descend au-dessous du point de saturation des fibres. Les propriétés mécaniques augmentent alors, lorsque le taux d'humidité décroît, jusqu'à un maximum qui n'est pas forcément l'état anhydre (mais plutôt 3 à 5 % d'humidité, KOLLMANN (1984), FRANCOIS (1992), SCHNIEWIND & al (1982)). A priori, la coupe par déroulage ou par tranchage se fait toujours à partir de bois dont l'humidité est supérieure au point de saturation des fibres. L'usinage de bois sec augmente fortement le coefficient de frottement bois-métal, l'effort de dépouille F_d (THIBAUT, 1988) et la fissuration des placages (LUTZ, 1971).

I - 2.2.3. Recouvrance hygrothermique (RHT)

Lorsque du bois vert est chauffé pour la première fois, il tend généralement à se dilater dans la direction tangentielle et à se contracter dans la direction radiale. Cette déformation est en grande partie irréversible (GRIL & al, 1993a).

De nombreux auteurs ont travaillé sur les phénomènes de recouvrance (décharge au sens mécanique) hygrothermique : KUBLER (1973), BERRADA (1991), GRIL & al (1993a) et (1993b)...

Les principaux résultats sont les suivants :

- Lorsque l'on débite une rondelle de bois dans le sens radial, il est possible de mesurer une recouvrance tangentielle instantanée d'environ 0.2 %¹.
- Lorsque l'on étuve un échantillon de bois, deux phénomènes se superposent : une déformation thermique réversible (d'environ -0.1 % dans les direction R et T), qui dépend entre autres, du point de saturation des fibres ; et une déformation thermique irréversible qui correspond à la RHT.
- Cette déformation thermique irréversible, peut atteindre (lors d'un étuvage pendant une durée de 20 à 100 mm et à une température de 80 à 100°C) 0.5 à 1 % dans la direction tangentielle et -0.15 % dans la direction radiale (GRIL, 1993a).
- La RHT ne varie pas linéairement en fonction de la température, il existe des températures d'activation du phénomène.
- Il est possible de subdiviser la RHT en la somme ou la succession de deux mécanismes de recouvrance hygrothermique, l'un correspondrait à la libération des contraintes de croissances post-maturation (contraintes créées une fois que le bois est déjà formé), l'autre mécanisme, activé à plus haute température, serait lié à la contrainte de maturation des cellules ligneuses.

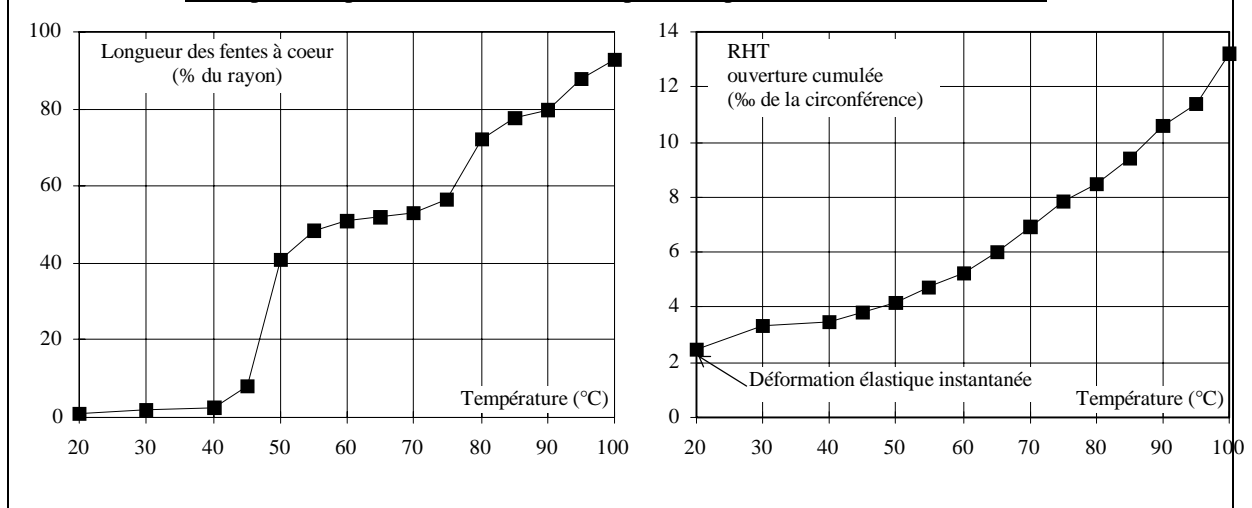
Fentes à coeur (MARCHAL & al, 1993)

Les auteurs ont mesuré sur des rondelles de Chênes méditerranéens et méditerranéens sciées sur un rayon, la recouvrance hygrothermique en fonction de la température. De plus, sur des rondelles jumelles, cette fois non sciées, ils ont mesuré la longueur des fentes à coeur induites par la RHT.

Leurs conclusions sont les suivantes :

- Au-dessous de 45°C la RHT est très faible et il n'y a pas de fente (Figure I - -18).
- Il semble qu'il y ait une première activation de la RHT au environ de 50°C et une autre plus importante vers 70-80°C. Ces températures d'activation peuvent être rapprochées des températures de transition vitreuse des polymères constitutifs du bois.

Figure I - -18 Evolution de la recouvrance hygrothermique et de la longueur des fentes à coeur en fonction de la température pour un Chêne méditerranéen (d'après MARCHAL & al, 1993).



Il est clair que par un chauffage excessif (80 à 90°C), les fentes à coeur des grumes deviennent très importantes et compromettent fortement leurs débits futurs, en placages déroulés ou tranchés.

Il est donc primordial de savoir, si un étuvage fort améliore significativement la qualité des placages d'une essence donnée, ou dans le cas contraire, à partir de quelle température minimum est-il possible d'obtenir des placages de qualité comparable ?

¹ Une valeur du pourcentage de déformation positive correspond à une dilatation, alors qu'une valeur négative correspond à une contraction.

I - 2.3. Conclusion

Il serait intéressant de mesurer les différentes grandeurs techniques transverses du bois humide intervenant dans les modèles de THIBAUT (1988) :

- sur une plage de densité suffisamment large, ce qui permettrait de quantifier et de qualifier l'influence de la densité sur ces critères mécaniques.
- sur une gamme de températures cohérentes avec les températures d'étuvages pour appréhender l'évolution de ces critères avec la température.

Notamment, il serait pertinent d'avoir une idée de l'évolution des différents ratios des quatre grandeurs techniques (retenues par Thibaut) lorsque varient à la fois la température et la densité. Ceci, pour comprendre quel est ou quels sont, à une température et pour une essence de densité donnée, les critères limitants responsables de la fissuration ou du flambement du copeau, par exemple.

Parallèlement, il serait souhaitable de connaître l'évolution de la qualité du placage et des différents efforts de coupe F_a , F_d et F_b quand la densité et la température varient sur les mêmes bases.

La comparaison entre les évolutions des efforts et des propriétés mécaniques en fonction de la température et de la densité, devrait au moins permettre de donner des critiques objectives des modèles.

Sur la base de ces constatations, nous avons mis en place trois essais mécaniques différents (Figure I - - 19) :

- un essai de compression,
- un essai de cisaillement RT
- un essai de ténacité RL mode I.

A partir de ces essais, nous avons observé l'influence de la température sur les différents descripteurs d'essais, sur une large plage de densité.

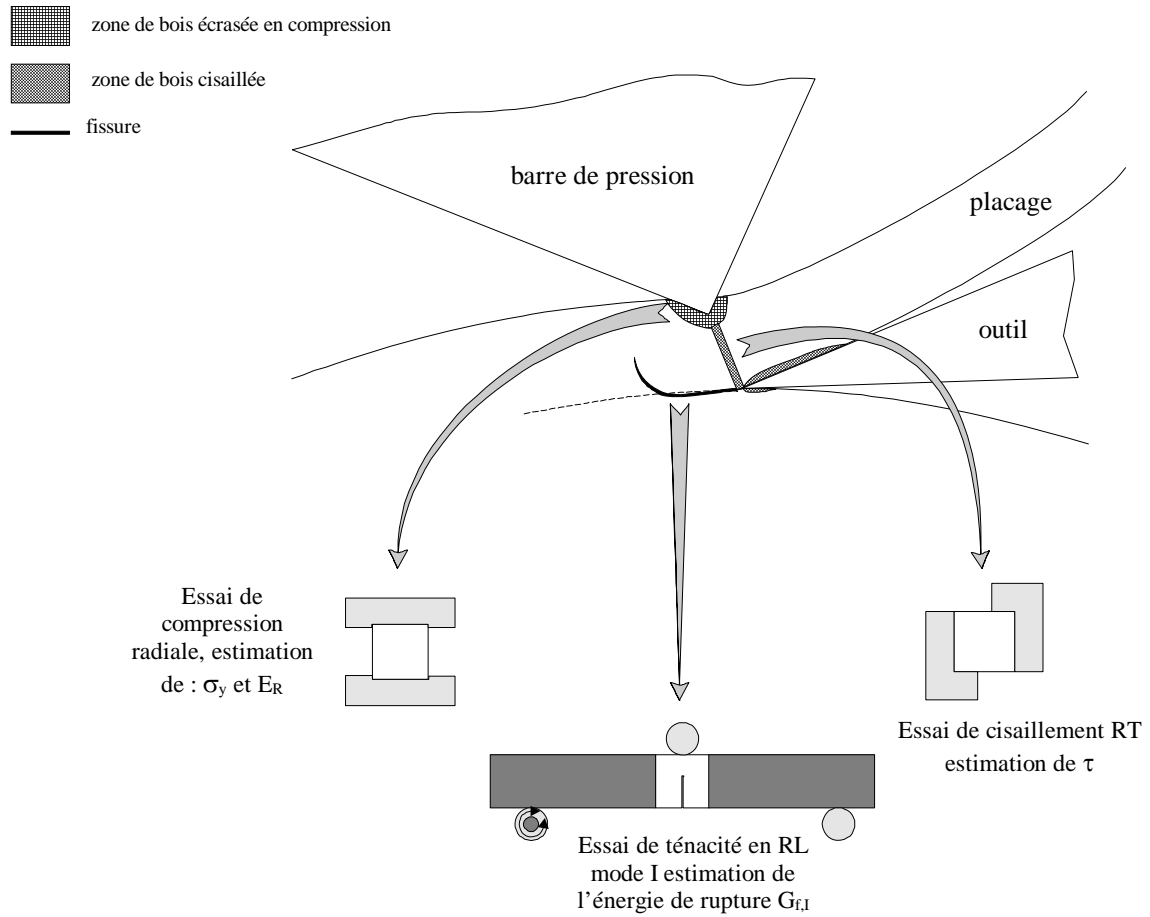
Nous avons mesuré les efforts de coupe sur la même plage de température et de densité, en utilisant un dispositif de microdéroulage instrumenté comparable à celui utilisé par THIBAUT (1988).

Remarques

↳ Il nous faut garder à l'esprit, dans la comparaison entre les essais mécaniques et essais de déroulage, que les premiers se font à des vitesses de déformations très faibles alors que les vitesses de déformations imposées par le mode de coupe par déroulage sont très élevées.

↳ Pour quantifier la résistance à la rupture, nous avons préféré le critère d'énergie de rupture $G_{I,f}$ car il se calcule facilement à partir des valeurs expérimentales, plutôt que le facteur d'intensité de contrainte K_I , qui est un critère plus théorique et qui nécessite un calcul souvent discuté.

Figure I - -19 Liaisons entre le type d'essai et le type de sollicitation infligé au bois par la coupe.



MATERIEL VEGETAL

II - Caractérisation du matériel végétal utilisé

II - 1. Description du matériel végétal

II - 1.1. Choix des essences

Le choix initial des essences utilisées pour les essais a été fait sur trois critères principaux :

- Le premier critère de sélection fut la densité à 12 % d'humidité (provenant des données du CIRAD), les essences choisies devant se distribuer régulièrement dans une plage de densité la plus étendue possible. Nous nous sommes aperçus par la suite que l'infradensité était un critère de sélection plus fiable quant aux propriétés mécaniques du bois humide.
- Le second critère de sélection fut leur fréquence en scierie. Tout d'abord pour que les essences choisies fassent partie des essences couramment exploitées, ensuite pour qu'elles puissent être pré-débitées.
- Le troisième critère, plus subjectif, fut un critère d'homogénéité du bois.

Malgré nos efforts, la distribution des densités des essences sélectionnées ne fut pas aussi régulière que nous l'espérions : la densité de l'individu sélectionné était souvent située à l'une des extrémités de la plage de densité de référence. De plus, la densité à 12% de la majorité des essences exploitées en Guyane est comprise entre 0,7 et 0,9.

Nous avons toutefois retenu 10 essences selon les critères de sélection. Parmi les essences importantes économiquement, absentes de la sélection, citons le Gonfolo (*Qualea spp.*) et l'Amarante (*Peltogyne spp.*), dont les densités sont semblables à celles d'essences déjà sélectionnées.

II - 1.2. Description succincte des essences choisies

Les déterminations des bois utilisés ont été faites par P. DETIENNE du Laboratoire d'Anatomie des bois du CIRAD-Forêt. Pour 3 essences il n'a pas été possible de déterminer l'espèce (genres *Parkia*, *Vochysia*, *Hymenolobium*).

Les références consultées pour la description des essences sont les suivantes : (BENA, 1960), (CTFT, 1989), (DETIENNE, JACQUET, MARIAUX, 1982), (DEVEZ, 1932), (GAZEL, 1990), (GRENAND, MORETTI, JACQUEMIN, 1987), (LONGWOOD, 1962), (LINDEMAN, MENNEGA, 1963), (POLACK, 1992), (RENAUD, 1932), (VINK, 1983), nous avons de plus, consulté les fichiers de données du CIRAD (préservation, propriétés mécaniques et physiques).

Remarque :

Dans les chapitres ultérieurs, nous utilisons fréquemment pour simplifier l'écriture, le nom de genre seul pour dénommer l'essence utilisée. Il va de soi que ce nom de genre se réfère à l'espèce décrite dans ce chapitre et, que nous ne nous permettrions pas de généraliser les comportements mécaniques étudiés à toutes les espèces du genre.

II - 1.2.1. *Dodomissinga*

Nomenclature de l'échantillon

Nom scientifique : *Parkia sp.*,

Famille : Mimosacées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes (*B = Brésil, S = Surinam, G = Guyana*) : Dodomissinga, Bois bouchon, Bois balle, *Faveira (B)*, *Kwatacama (S)*, *Black manariballi (G)*.

Répartition et distribution géographique (*Parkia nitida* Miq.)

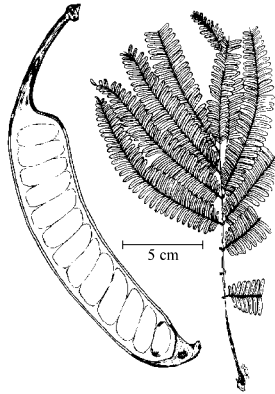
Aire de répartition : essence héliophile de forêts secondaires et primaires, qui préfère les sols secs et argileux ; elle se rencontre dans les Guyanes et au Brésil (Para et Amazonie).

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées² (données ONF-CTFT) : environ 1,6 m³/ha soit **1,2 %** du cubage total.

Fréquence en scierie guyanaise (données de 1988 à 1992) : inférieur à **0,1 %** du volume total exploité

² Les valeurs de fréquence en forêt données pour les dix essences correspondent à neuf parcelles de 21000 à 142000 ha, inventoriées entre 1974 et 1976, soit 550 000 ha inventoriés sur les cent premiers km de la frange côtière guyanaise.

Description de l'arbre



- Grand arbre dominant muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 25 mètres de haut et de 50 à 120 cm de diamètre, possédant de grands et minces contreforts (jusqu'à 3 mètres de haut et 2 mètres de large) se subdivisant à la base.
- L'écorce est grise, relativement lisse, possédant de nombreuses lenticelles brun rouge de 1 à 3 mm de diamètre. La tranche de l'écorce est épaisse (15 à 20 mm), fibreuse, d'abord jaune elle vire rapidement au rouge foncé et exsude une sève abondante et collante.
- Les feuilles sont stipulées, opposées, composées, bipennées. Le pétiole est muni d'une glande vers sa base; il y a environ 6 à 8 paires de rachis secondaires opposés et imparipennés. Chacun portant 15 à 20 paires de foliolules décroissantes en taille aux extrémités, les foliolules sont oblongues de 10 à 20 mm de long et de 3 à 5 mm de large.

- Le fruit est une grande gousse falciforme de 20 à 25 cm de long.

Type de dissémination usuelle : endozoochorie.

Dessin du rameau et du fruit de *Parkia nitida* Miq. par J. THIEL.

Description du bois (cf. planches II-1a et II-2a photo 1 en annexe IV)

Bois blanc-rosé ou blanc-beige, parfois strié de veines plus foncées. L'aubier n'est pas distinct.

Les pores sont gros (190-300 μm) et rares (1 à 3 mm^2) ; le parenchyme est soit en manchon ou en losange associé aux pores, soit plus rarement, en ligne terminale. Les rayons ligneux sont de 1 à 3-sériés, au nombre de 4 à 6 par mm. Les fibres longues de 1000 à 1400 μm , larges de 38 à 40 μm avec des parois (2p)³ épaisses de 6 à 12 μm .

Propriétés (*Parkia nitida* Miq., *Parkia ulei* Kuhl.)

Plage de densité à 12 % d'humidité : **0,26-0,59** ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,40.

Retrait Tangentiel total moyen : 8,2 % ; Retrait Radial total moyen : 3 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 26 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 69$ MPa, $E_l = 8000$ MPa.

Usinage : finition difficile, bois pelucheux.

Durabilité (duramen) : très faible résistance vis à vis des différents organismes transformant le bois, classe de risques biologiques⁴ couverte : **1**.

Imprégnabilité : moyenne.

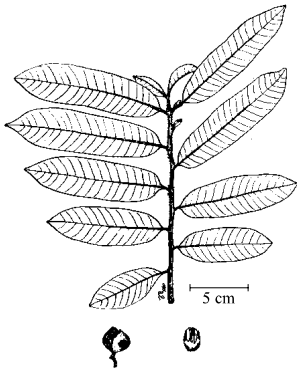
Utilisations recommandées : âmes de contre-plaqués, emballages, isolation.

Provenance de la poutre prélevée : piste de Paul Isnard.

³ (2p) correspond à l'épaisseur de deux parois, pour le *Dodomissinga* la paroi fait en réalité de 3 à 6 μm d'épaisseur.

⁴ Les classes de risques biologiques que nous indiquons correspondent à la norme NF B 50-100 qui définit des classes en fonction principalement des risques de pourritures encourus. Elles ne concernent pas la résistance aux termites. On ne doit pas confondre classe de risque et classe de durabilité naturelle, celle-ci et souvent utilisée pour caractériser la résistance naturelle des bois (duramen) aux champignons et insectes xylophages. On définit en général, 5 classes de durabilité, la classe 1 correspond aux essences dont le bois est très résistant ou très durable vis-à-vis des agents de dégradations.

CLASSE DE RISQUE 1	Bois toujours sec. Humidité du bois en service inférieur à 18 %	Mobilier.
CLASSE DE RISQUE 2	Bois sec dont la surface est humidifiée temporairement. Humidité du bois en service inférieur à 18 %	Menuiseries intérieures pouvant être réhumidifiées accidentellement.
CLASSE DE RISQUE 3	Bois soumis à des alternances d'humidité et de sécheresse.	Structure, bardage et menuiseries extérieures.
CLASSE DE RISQUE 4	Bois dont l'humidité est toujours supérieure à 20 % .	Pontons, lisse basse au contact permanent avec l'humidité.

II - 1.2.2. Yayamadou marécage**Nomenclature de l'échantillon**

Nom scientifique : *Virola surinamensis* A. C. Smith

Famille : Myristicacées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Yayamadou marécage, Grand Bouchi, Moulomba, *Ucuuba* (B), *Baboen* (S), *Dalli* (G).

Répartition et distribution géographique

Aire de répartition : essence héliophile de forêts marécageuses et humides, souvent en association avec le *Symphonia globulifera* L. f. ; elle se rencontre dans les Guyanes, au Vénézuéla, sur les petites Antilles et dans le bassin inférieur de l'Amazonie (Para).

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées (données ONF-CTFT) :

environ 2 m³/ha soit **1,5 %** du cubage total sur pied.

Fréquence en scierie (données de 1988 à 1992) : environ **0,1 %** du volume total exploité.

Description de l'arbre

- Grand arbre dominant muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 25 mètres de haut et de 50 à 100 cm de diamètre, possédant des petits contreforts s'élevant jusqu'à 1,5 m de haut, parfois accompagnés de racines aériennes en zone inondable.
- L'écorce est relativement lisse, la couleur est bariolé de gris à marron clair, possédant de nombreuses crevasses plus claire de 1 à 2 mm de profondeur et de longueur variable. La tranche de l'écorce est épaisse (15 à 20 mm), fibreuse, de couleur rose, exsudant une sève rouge translucide.
- La feuille est simple, alterne, distique, oblongue, à bords légèrement révolutes. Elle mesure de 10 à 20 cm de long et de 2 à 5 cm de large, la base est obtuse.
- La graine est noirâtre et enveloppée dans un arille rouge clair (huile extraite de la graine sert à la production de savons et de bougies)

Dessin du rameau et du fruit par J. THIEL.

Type de dissémination usuelle : endozoochorie.

Description du bois (cf. planches II-1a et II-2a photo 2 en annexe IV)

Couleur uniforme beige pâle légèrement ocrée. L'aubier n'est pas distinct.

Les pores sont moyens (160-200 µm), assez rares (2 à 5 mm²) Le parenchyme est en cellules juxtavasculaires indistinctes, très rarement en ligne terminale Les rayons ligneux sont de 1 à 2-sériés, au nombre de 8 à 9 par mm. Les fibres sont longues de 1500 à 1650 µm, larges de 32 à 38 µm avec des parois (2p) épaisses de 9 à 12 µm.

Propriétés

Plage de densité à 12 % d'humidité : **0,43-0,50** ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,51.

Retrait Tangentiel total moyen : 11 % ; Retrait Radial total moyen : 7,5 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 32 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 80$ MPa, $E_l = 8800$ MPa.

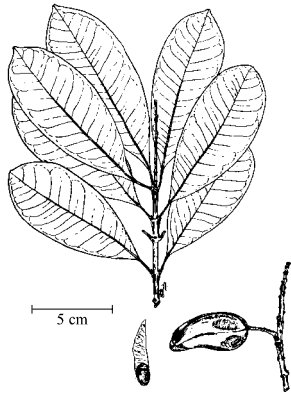
Usinage : très facile, bon état de surface.

Durabilité : très faible résistance vis à vis des différents organismes transformant le bois, classe de risques biologiques couverte : **1**.

Imprégnabilité : bonne.

Utilisations recommandées : contre-plaqués et produits de déroulage (allumettes), menuiseries intérieures légères (moulures).

Provenance de la poutre prélevée : piste de Saint-Elie.

II - 1.2.3. Moutende Kouali**Nomenclature de l'échantillon**Nom scientifique : *Vochysia* sp.Famille : VochysiaceesNoms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Kouali, Bois cruseau, *Quaruba* (B), *Kwari* (S), *Iteballi* (G).**Répartition et distribution géographique**Aire de répartition : essence héliophile de forêts secondaires et primaires, qui préfère les terrains sains; elle se rencontre en Guyane au Surinam et au Brésil (Para et Amapa).Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées (données ONF-CTFT) : Kouali divers, environ 1,3 m³/ha soit 1 % du cubage total sur pied.Fréquence en scierie (données de 1988 à 1992) : Kouali divers, 5,6 % du

volume total exploité.

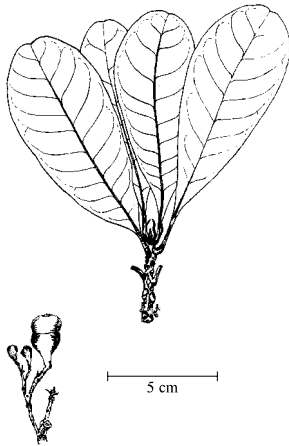
Description de l'arbre (*Vochysia guianensis* Aubl.)

- Grand arbre dominant muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 25 mètres de haut et de 55 à 105 cm de diamètre, possédant de légers accotements à la base, qui dépassent rarement 1 mètre de haut.
- L'écorce est jaune rosâtre et s'exfolie en de nombreuses pellicules en feuillets, se désagrégant facilement. La tranche de l'écorce est jaunâtre (8 à 15 mm), parsemée de point blanchâtre.
- La feuille est simple, opposée parfois verticillée par trois, cunéiforme à la base, obtuse au sommet, elle mesure de 5 à 13 cm de long et de 2 à 5 cm de large, la base est obtuse.
- Le fruit est une capsule trilobée verdâtre.

Type de dissémination usuelle : anémochorieDessin du rameau et du fruit de *Vochysia guianensis* Aubl. par J. THIEL.**Description du bois (cf. planches II-1a et II-2a photo 3 en annexe IV)**

Le duramen est beige-rose avec parfois des lignes sombres de canaux traumatiques. L'aubier est jaunâtre de 3 à 5 cm d'épaisseur.

Les pores des éléments de vaisseaux sont gros (200-300 µm), assez rares (1 à 3 mm²) ; le parenchyme est associé aux pores avec des prolongements aliformes, anastomosés, formant parfois de longues bandes en limite d'accroissement ; les rayons ligneux sont de deux tailles, les uns 3 à 8-sériés, les autres 1-sérié, au nombre de 4 à 8 par mm, de structure hétérogène. Les fibres sont longues de 1400 à 1550 µm, larges de 30 à 35 µm avec des parois (2p) épaisses de 12 à 16 µm. Présence de lignes de canaux traumatiques incluses dans des bandes tangentielles de parenchyme.**Propriétés (*Vochysia guianensis* Aubl.)**Plage de densité à 12 % d'humidité : 0,54-0,72 ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,55.Retrait Tangentiel total moyen : 12,4 % ; Retrait Radial total moyen : 4,6 %.Propriétés mécaniques moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 59 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 130$ MPa, $E_l = 11500$ MPa.Usinage : facile, parfois pelucheux.Durabilité : faible résistance vis à vis des termites du bois sec et des autres insectes xylophages, moyennement résistant aux champignons, classe de risques biologiques couverte : 1 à 2.Imprégnabilité : faible.Utilisations recommandées : contre-plaqués, menuiseries intérieures.**Provenance de la poutre prélevée** : piste de Counamama.

II - 1.2.4. Grignon franc**Nomenclature de l'échantillon**

Nom scientifique : *Ocotea rubra* Mez

Famille : Lauracées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Grignon rouge, Louro vermelho (B), Wana (S), Determa (G), Laurier cannelle (Trinité).

Répartition et distribution géographique

Aire de répartition : essence de forêts primaires, qui préfère les terrains sains mais se rencontre également des sols argileux, sablonneux et même marécageux; son aire de répartition couvre les Guyanes, la Trinité et le bassin amazonien.

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées (données ONF-CTFT) : environ 2 m³/ha soit **1,5 %** du cubage total sur pied.

Fréquence en scierie (données de 1988 à 1992) : environ **10 %** du volume

total exploité.

Description de l'arbre

- Grand arbre muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 25 mètres de haut et de 50 à 100 (130) cm de diamètre possédant fréquemment des contreforts courts et épais à la base.
- L'écorce est grise, un peu rougeâtre avec de nombreuses lenticelles en relief ; elle s'exfolie en grandes écailles (plusieurs dizaines de centimètres) qui se soulèvent à la base. La tranche de l'écorce est très épaisse (12 à 25 mm), de couleur rouge avec de petites zones blanchâtres.
- Les feuilles sont entières, alternes, groupées à l'extrémité des rameaux, coriaces, elles mesurent de 7 à 15 cm de long et de 3 à 6 cm de large, très cunéiformes à la base, arrondies et souvent émarginées au sommet.
- Le fruit est une petite graine qui devient noirâtre à maturité.

Type de dissémination usuelle : endozoochorie

Dessin du rameau et du fruit par J. THIEL.

Description du bois (cf. planches II-1a et II-2a photo 4 en **annexe IV**)

Le duramen est brun rosâtre homogène. L'aubier est bien différencié, rose grisâtre de 2 à 5 cm d'épaisseur.

Les pores des éléments de vaisseaux sont gros (150-250 µm), leur nombre varie de 4 à 9 par mm² ; au voisinage des pores, on observe d'assez nombreuses cellules à huile. Le parenchyme est associé aux pores en manchon, anastomosé obliquement entre vaisseaux voisins. Les rayons ligneux sont 2 à 3-sériés, au nombre de 5 à 7 par mm, de structure homogène. Les fibres sont longues de 1500 à 2000 µm, larges de 35 à 43 µm avec des parois (2p) épaisses de 15 à 20 µm.

Propriétés

Plage de densité à 12 % d'humidité : **0,56-0,74** ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,54.

Retrait Tangentiel total moyen : 10,3 % ; Retrait Radial total moyen : 4,6 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 48 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 108$ MPa, $E_l = 10700$ MPa.

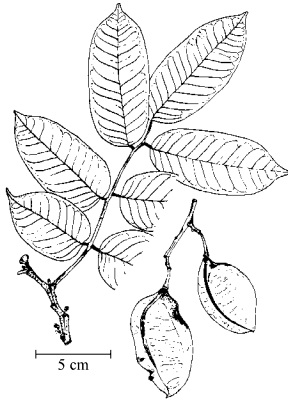
Usinage : facile.

Durabilité : bonne résistance vis à vis des termites et des autres insectes xylophages, bonne résistance aux champignons, classe de risques biologiques couverte : **3**.

Imprégnabilité : faible.

Utilisations recommandées : ébénisterie, menuiserie, contre-plaqués, construction navale, placage tranché...

Provenance de la poutre prélevée : piste de Counamama.

II - 1.2.5. Angélique**Nomenclature de l'échantillon**

Nom scientifique : *Dicorynia guianensis* Amsh.

Famille : Césalpiniacées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Angélique rouge
Angélica do Para (B), *Bastralocus (S)*.

Remarque : on distingue deux formes (géotypes ?) d'Angélique, Angélique rouge ou franc avec un bois foncé, marron violacé et un aubier de 1 à 6 cm d'épaisseur souvent cannelé en surface ; et l'Angélique gris ou blanc dont le bois est plus clair et l'aubier plus large (BERTIN, 1920). Notre échantillon correspondait à un Angélique rouge avec un aubier inférieur à 2 cm pour un diamètre de la bille de 80 cm.

Répartition et distribution géographique

Aire de répartition : essence héliophile de forêts primaires, qui préfère les terrains bien drainés ; on la rencontre essentiellement en Guyane, à l'Est du Surinam et au Brésil dans les états du Para et de l'Amapa.

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées : environ 10 m³/ha soit 8 % du cubage total sur pied.

Fréquence en scierie (1988 à 1992) : environ 32 % du volume total exploité.

Description de l'arbre

- Grand arbre dominant muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 30 mètres de haut et de 50 à 100 (150) cm de diamètre, possédant fréquemment des contreforts courts et épais à la base.
- L'écorce est de 2 types. L'écorce de l'Angélique rouge est épaisse (10 à 20 mm) elle s'exfolie en grosses plaques larges de plusieurs centimètres, les lenticelles sont plutôt rondes. L'écorce de l'Angélique blanche et plus fine (4 à 10 mm), plus lisse et les lenticelles sont ovales et bien visibles (CHOUQUET com. pers.), (GUITET, 1995). Quelque temps après l'entaille de l'écorce, apparaît une sécrétion abondante et gélatineuse.
- Les feuilles sont alternes, composées et imparipennées avec 5 à 7 folioles. Les folioles sont elliptiques, oblongues, acuminées, arrondies à la base, à bords légèrement révolutes, elles mesurent de 7 à 18 cm de long et de 3 à 7 cm de large.
- Le fruit est samare plate, elliptique, contenant de une à trois graines ailées.

Type de dissémination usuelle : anémochorie.

Dessin du rameau et du fruit par J. THIEL.

Description du bois (cf. planches II-1b et II-2b photo 5 en annexe IV)

Le duramen de l'Angélique rouge est brun violacé. L'aubier est bien différencié, de 1 à 6 cm d'épaisseur, l'aubier de l'Angélique blanc peut atteindre 15 cm d'épaisseur.

Les pores sont gros (225-300 µm) et rares (1 à 2 mm²), en outre on rencontre des pores de petit diamètre accolés en files radiales. Les pores sont fréquemment obstrués par des dépôts blanchâtres. Le parenchyme est associé aux pores en manchon et anastomosé tangentiellement en lignes onduleuses plus ou moins continues. Les rayons ligneux sont 2 à 3-sériés, au nombre de 6 à 9 par mm, de structure hétérogène ; ils sont le plus souvent étagés (2 à 3 étages par mm), dans notre échantillon, ils sont plutôt échelonnés. Les fibres sont longues de 1500 à 1700 µm, larges de 25 à 30 µm avec des parois (2p) épaisses de 10 à 15 µm.

Propriétés

Plage de densité à 12 % d'humidité : **0,72-0,89** ; **Coefficient de retrait Volumique moyen** : 0,55.

Retrait Tangentiel total moyen : 9 % ; **Retrait Radial total moyen** : 5,4 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 71 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 172$ MPa, $E_l = 15100$ MPa.

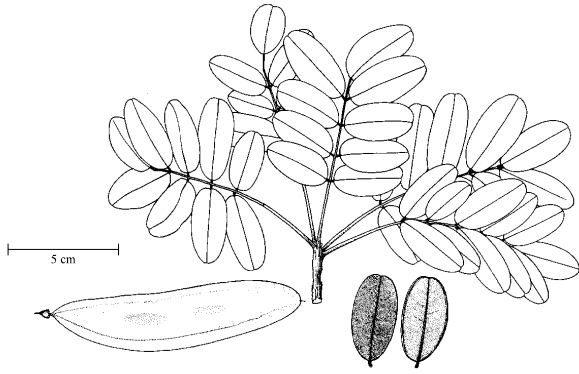
Usinage : difficile, bois désaffutant ayant souvent un taux de silice élevé.

Durabilité : bonne résistance vis à vis des termites et des autres insectes xylophages, bonne résistance aux champignons de pourriture fibreuse, moins bonne résistance aux champignons de pourriture cubique, classe de risques biologiques couverte : 3. Très bonne résistance vis à vis des tarets mais est attaqué par les pholades.

Imprégnabilité : faible.

Utilisations recommandées : ébénisterie, menuiserie, charpente, contre-plaqué, construction en milieu marin immergé, placage tranché...

Provenance de la poutre prélevée : piste de Counamama (parcelle 13, forêt de Patagai).

II - 1.2.6. Saint-Martin jaune**Nomenclature de l'échantillon**

Nom scientifique : *Hymenolobium* sp.

Famille : Fabacées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Saint-Martin gris, Angélim (B), Makka kabes (S), Koraroballi (G).

Répartition et distribution géographique

Aire de répartition : très répandu au Brésil et dans la région sub-amazonienne, en Guyane on le rencontre plus souvent dans l'Est. Il préfère les sols fermes.

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées

(données ONF-CTFT) : le Saint-Martin jaune est absent sur des grandes régions du territoire guyanais. Dans les zones où on le rencontre, sa fréquence peut dépasser 1,5 m³/ha.

Fréquence en scierie (données de 1988 à 1992) : environ **0,7 %** du volume total exploité.

Description de l'arbre (*Hymenolobium flavum* Kleinh.)

- Grand arbre dominant muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 25 mètres de haut et de 40 à 100 cm de diamètre, possédant des contreforts assez épais (20 cm), pouvant s'élever jusqu'à 2,5 m et s'étendre jusqu'à 3 m.
- L'écorce est brun-rouge à brun-grisâtre, fissurée, avec d'importantes lenticelles en relief. Les écailles de desquamation sont de différentes tailles (de 1 à 15 cm de large pour 3 à 50 cm de long). La tranche de l'écorce (10 à 13 mm) est rose-orangé. La sève est incolore et poisseuse.
- Les feuilles, situées à l'extrémité des rameaux, sont alternes, composées et imparipennées avec 11 à 17 folioles. Les folioles sont opposées, oblongues, elliptiques et mesurent de 3 à 5 cm de long pour 1,5 à 2 cm de large.
- Le fruit est une gousse membraneuse brun-rouge, indéhiscente de 15 x 3 cm.

Type de dissémination usuelle : anémochorie

Dessin du rameau et du fruit de *Hymenolobium flavum* Kleinh. par H. RYPKEMA.

Description du bois (cf. planches II-1b et II-2b photo 6 en annexe IV)

Le duramen est beige-jaune. L'aubier est bien différencié, blanc grisâtre de 2 à 5 cm d'épaisseur. Les pores sont gros (200-300 µm) et rares (1 à 3 par mm²). Le parenchyme abondant est associé aux pores, aliforme, souvent anastomosé en formant de larges bandes reliant les pores. Les rayons ligneux sont 3 à 5-sériés, au nombre de 4 à 6 par mm, leur disposition est parfois échelonnée ou étagée. Les fibres sont longues de 1600 à 2000 µm, larges de 29 à 33 µm avec des parois (2p) épaisses de 21 à 25 µm.

Propriétés (*Hymenolobium excelsum* Ducke)

Plage de densité à 12 % d'humidité : **0,64-0,90** ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,61.

Retrait Tangentiel total moyen : 8 % ; Retrait Radial total moyen : 4,6 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 67 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 167$ MPa, $E_l = 16400$ MPa.

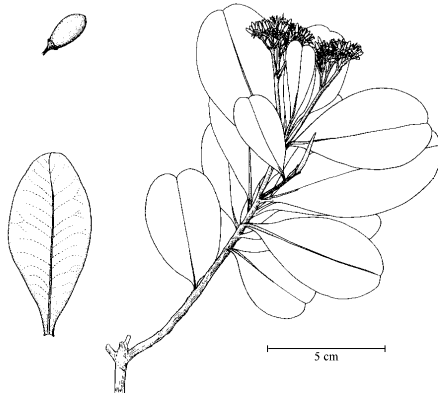
Usinage : relativement aisé.

Durabilité : assez bonne résistance vis à vis des termites, très bonne résistance aux champignons, sensible aux insectes de bois frais, classe de risques biologiques couverte : **3**.

Imprégnabilité : faible.

Utilisations recommandées : menuiserie, charpente, parquet...

Provenance de la poutre prélevée : piste de Counamama.

II - 1.2.7. Bois rouge**Nomenclature de l'échantillon**

Nom scientifique : *Humiria balsamifera* (Aublet) St Hil.

Famille : Humiriacées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Bois rouge, Houmiri oudou, *Umiri (B)*, *Black'beri (S)*, *Bastard Bulletwood (G)*.

Remarque : cette espèce comprend plusieurs sous-espèces de taille forte différente, colonisant des milieux variés (végétation de savane, inselbergs, forêt primaire).

Répartition et distribution géographique

Aire de répartition : l'ensemble des sous espèces, adaptées à de nombreux milieux, a une aire de répartition très large.

Celle-ci couvre les Guyanes, le Venezuela, la Colombie, le bassin amazonienne du Brésil. Le Bois rouge est une essence héliophile, les plus beaux individus se rencontrent sur terrain sain ou légèrement sableux, à la Guyana, c'est une des principales espèces de la forêt marécageuse.

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées (données ONF-CTFT) : fréquence très variable, absent de certaines zones, fréquent dans la région de Mana.

Fréquence en scierie (données de 1988 à 1992) : inférieur à **0,1 %** du volume total exploité.

Description de l'arbre

- Grand arbre muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 20 mètres de haut et de 40 à 100 cm de diamètre sans contreforts.
- L'écorce est noirâtre, fortement crevassée longitudinalement. La tranche de l'écorce (20 à 30 mm) est jaunâtre. L'exudation rouge transparente, est utilisée par les Palikur et au Brésil pour ses propriétés médicinales.
- Les feuilles sont simples, distiques, entières, subsessiles, collées contre le rameau, elliptiques. Elles mesurent de 3 à 7 cm de long pour 1,5 à 3,5 cm de large.
- Le fruit est drupoïde, noir et ressemble à une petite olive.

Type de dissémination usuelle : endozoochorie

Dessin du rameau et du fruit par H. RYPKEMA.

Description du bois (cf. planches II-1b et II-2b photo 7 en annexe IV)

Le duramen est brun-violacé. L'aubier est peu différencié, gris rose, son épaisseur varie de 3 à 5 cm. Les pores des éléments de vaisseaux sont moyens (135-150 μm) et assez nombreux (8 à 16 par mm^2) ; les éléments de vaisseaux sont séparés par des perforations en grille de 10 à 25 échelons. Le parenchyme est rare et essentiellement juxtavasculaire. Les rayons ligneux sont 1 à 2-sériés, au nombre de 8 à 10 par mm, ils sont hétérocellulaires. Les fibres sont longues de 1900 à 2200 μm , larges de 27 à 36 μm avec des parois (2p) épaisses de 20 à 23 μm .

Propriétés

Plage de densité à 12 % d'humidité des sous espèces : **0,79-1,10** ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,67.

Retrait Tangentiel total moyen : 10 % ; Retrait Radial total moyen : 7 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 90 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 200$ MPa, $E_l = 19000$ MPa.

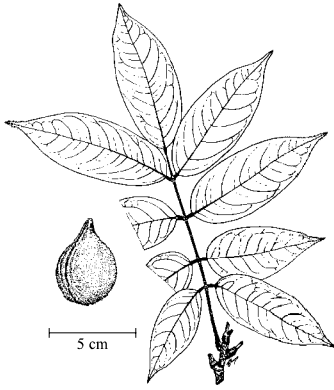
Usinage : relativement aisé, contre-fil fréquent.

Durabilité : très bonne résistance vis à vis des termites de bois sec, très bonne résistant aux champignons de pourriture fibreuse, assez bonne résistance au champignons de pourriture cubique, classe de risques biologiques couverte : **3**.

Imprégnabilité : faible.

Utilisations recommandées : menuiserie, charpente, parquet, placage tranché... LVL ?

Provenance de la poutre prélevée : piste de Paul Isnard.

II - 1.2.8. Wacapou**Nomenclature de l'échantillon**

Nom scientifique : *Vouacapoua americana* Aubl.

Famille : Césalpiniacées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Wacapou, Bounaati, *Acapu* (B), *Bruinhart* (S), *Sarebebeballi* (G).

Répartition et distribution géographique

Aire de répartition : se rencontre principalement en Guyane mais aussi au Surinam et au Brésil (Amapa, Para). C'est une essence de forêt primaire, qui préfère les sols sains. On la rencontre assez souvent en « poche » où elle est abondante.

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées (données ONF-CTFT) :

environ 2 m³/ha soit **1,5 %** du cubage total sur pied.

Fréquence en scierie (données de 1988 à 1992) : environ **1,2 %** du volume total exploité.

Description de l'arbre

- Grand arbre muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 20 mètres de haut et de 40 à 100 cm de diamètre. Les 4 à 5 premiers mètres du tronc sont de conformation irrégulière avec souvent de profondes cannelures. Ces cannelures sont dues à une différence d'activité cambiale. L'activité cambiale est intense sur les côtes, alors quelle est très réduite ou nulle au fond des cannelures (DETIENNE, 1995). Les contreforts sont dans le prolongement des côtes, ils s'écartent peu du pied en se subdivisant.
- L'écorce est brune, relativement lisse, légèrement fissurée, avec quelques lenticelles éparses. La tranche de l'écorce (3 à 10 mm) est blanc ocré.
- Les feuilles sont alternes, composées et imparipennées. Les folioles au nombre de 7 à 9 par feuille, sont entières, arrondies à la base et aiguës et acuminées au sommet. Elles mesurent de 2,5 à 4 cm de large pour 7 à 15 cm de long.
- Le fruit est une gousse piriforme verdâtre, couvert d'une pubescence roux-jaunâtre.

Type de dissémination usuelle : synzoochorie

Dessin du rameau par J THIEL et du fruit par W. H. A. HEKKING

Description du bois (cf. planches II-1b et II-2b photo 8 en **annexe IV**)

Le duramen est brun foncé, strié de fines zones claires. L'aubier est bien différencié, de couleur crème, son épaisseur varie de 2 à 4 cm. Les pores sont moyens (130-175 µm), leur nombre est de 5 à 8 par mm². Le parenchyme est associé aux pores, de forme losangique, souvent anastomosé obliquement entre pores voisins. Les rayons ligneux sont 2 à 3-sériés, au nombre de 6 à 7 par mm, de structure homogène. Les fibres sont longues de 1200 à 1500 µm, larges de 19 à 22 µm avec des parois (2p) épaisses de 14 à 16 µm.

Propriétés

Plage de densité à 12 % d'humidité : **0,84-1,07** ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,65.

Retrait Tangentiel total moyen : 6,9 % ; Retrait Radial total moyen : 4,4 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 83 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 210$ MPa, $E_l = 17000$ MPa.

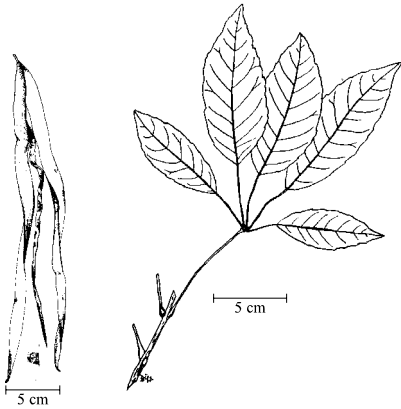
Usinage : relativement aisé, odeur agréable.

Durabilité : très bonne résistance vis à vis des termites de bois sec et des autres insectes xylophages, très bonne résistance aux champignons de pourriture, classe de risques biologiques couverte : **4**.

Imprégnabilité : faible.

Utilisations recommandées : ébénisterie, menuiserie, travaux extérieurs, parquet, placage tranché...

Provenance de la poutre prélevée : piste de Paul Isnard.

II - 1.2.9. Ébène verte**Nomenclature de l'échantillon**

Nom scientifique : *Tabebuia cf. capitata* Sandw.

Famille : Bignoniacées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Ebène soufré, Guanaati, *Ipe* (B), *Groenhart* (S), *Iron wood* (G).

Répartition et distribution géographique (*Tabebuia capitata* Sandw., *Tabebuia serratifolia* Nichols., *Tabebuia impetiginosa* Standl.)

Aire de répartition : l'Ebène verte est une essence héliophile de forêt primaire, les différentes espèces couvrent un large territoire.

On les rencontre dans la forêt amazonienne, dans les Guyanes, en Colombie, en Bolivie, au Pérou, au Paraguay, en l'Equateur, dans les petites Antilles et en Amérique centrale. Elles préfèrent les sols sains ou les bords de rivière bien drainés.

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées (données ONF-CTFT) : environ 0,5 m³/ha soit **0,4 %** du cubage total sur pied.

Fréquence en scierie (données de 1988 à 1992) : environ **0,1 %** du volume total exploité.

Description de l'arbre (*Tabebuia serratifolia* Nichols.)

- Grand arbre muni d'un fût pouvant mesurer jusqu'à 25 mètres de haut et de 50 à 100 cm de diamètre. A la base on observe des contreforts épais pouvant atteindre 1 mètre de hauteur.
- L'écorce est gris-marron, crevassée longitudinalement.
- Les feuilles sont opposées, composées et palmées avec 5 à 7 folioles de taille inégale (3 à 7 cm de large pour 5 à 18 cm de long).
- Le fruit est une grande capsule linéaire de 8 à 65 cm de long, il renferme des petites graines ailées.

Type de dissémination usuelle : anémochorie

Dessin du rameau par P. DETIENNE et du fruit par H. RYPKEMA.

Description du bois (cf. planches II-1c et II-2c photo 9 en **annexe IV**)

RENAUD (1932) distingue trois types de bois : l'Ebène verte soufrée, l'Ebène verte grise, l'Ebène verte brune. MARECHAUX (trancheur parisien) en distingue aussi deux types à l'achat. Nous avons observé au moins deux types, un de couleur châtaigne, l'autre brun vert foncé très contrefilé et plus dense que le précédent. Il serait intéressant de savoir si les différences observées sont à imputer aux différentes espèces ou à un effet station par exemple.

Dans l'ensemble le duramen est brun sombre rougeâtre, finement strié de jaune verdâtre. L'aubier est bien différencié, de couleur blanc grisâtre, son épaisseur varie de 4 à 8 cm.

Les pores sont plutôt fins (100-120 µm), leur nombre est de 10 à 20 par mm² ; (chez *Tabebuia serratifolia* Nichols., ils sont obstrués par un dépôt jaune verdâtre de lapachol qui est une naphtoquinone inhibitrice des processus respiratoires). Le parenchyme, peu abondant, est associé aux pores, formant parfois deux courts prolongements latéraux. Les rayons ligneux sont 1 à 3-sériés, au nombre de 7 à 10 par mm, de structure homogène ; ils sont étagés (de 4 à 5 étages par mm). Les fibres sont longues de 900 à 1200 µm, larges de 15 à 18 µm avec des parois (2p) épaisses de 11 à 14 µm.

Propriétés (*Tabebuia serratifolia* Nichols.)

Plage de densité à 12 % d'humidité : **0,96-1,19** ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,68.

Retrait Tangentiel total moyen : 8 % ; Retrait Radial total moyen : 6,5 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 106 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 240$ MPa, $E_l = 19000$ MPa.

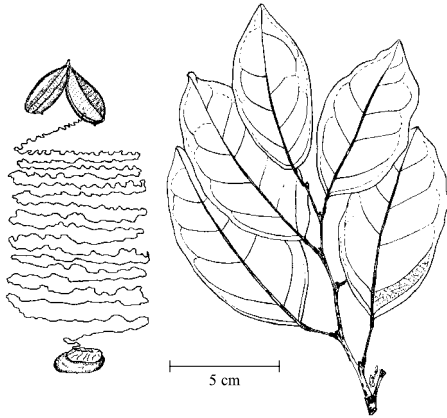
Usinage : assez difficile, importante poussière soufrée irritante.

Durabilité : très bonne résistance vis à vis des termites de bois sec et des autres insectes xylophages, très bonne résistance aux champignons de pourriture, classe de risques biologiques couverte : **4**.

Imprégnabilité : faible.

Utilisations recommandées : ébénisterie, menuiserie, travaux extérieurs, parquet, placage tranché...

Provenance de la poutre prélevée : piste de Belizon.

II - 1.2.10. Boco**Nomenclature de l'échantillon**

Nom scientifique : *Bocoa prouacensis* Aubl.

Famille : Césalpiniacées

Noms vernaculaires guyanais et des pays limitrophes : Boco marbre, *Ijzerhart* (S), *Womara* (G).

Répartition et distribution géographique

Aire de répartition : on la trouve essentiellement dans les Guyanes. C'est une essence sciaphile de forêt primaire, qui préfère les sols sains.

Fréquence en forêt sur parcelles inventoriées (données ONF-CTFT) : environ 0,3 m³/ha soit **0,2 %** du cubage total sur pied.

Fréquence en scierie (données de 1988 à 1992) : inférieur à **0,05 %** du volume total exploité.

Description de l'arbre

- Le Boco est un arbre assez petit dont le fût ne dépasse jamais 20 mètres. Le diamètre de la bille est compris entre 40 à 70 cm. Il n'y a pas de contreforts à la base, le fût est parfois légèrement cannelé.
- L'écorce est brune avec des taches grises et verdâtres, légèrement fissurée longitudinalement. Cette écorce s'exfolie par plaques minces et irrégulières. La tranche de l'écorce est peu épaisse de 3 à 4 mm, marron jaunâtre, elle exude un peu de liquide rougeâtre.
- Les feuilles sont simples, arrondies à la base et obtuse au sommet. Elles sont de dimensions très variables de 3 à 11 cm de large pour 5 à 20 cm de long.
- Le fruit est une gousse libérant à maturité une graine attachée à la gousse par un long funicule filiforme pouvant atteindre 1 mètre de long.

Type de dissémination usuelle : endozoochorie et synzoochorie

Dessin du rameau par J. THIEL et du fruit par M.G.M. van ROOSMALEN

Description du bois (cf. planches II-1c et II-2c photo 10 en **annexe IV**)

Le duramen est marron-gris très foncé. L'aubier jaunâtre est bien différencié, son épaisseur varie de 4 à 7 cm.

Les pores sont de taille moyenne (80-130 µm) leur nombre est de 4 à 8 par mm². Le parenchyme est associé aux pores, de forme losangique, très courtement ou très longuement aliforme et anastomosé tangentiellement. Présence de lignes terminales continues. Les rayons ligneux sont étagés, 1 à 2-sériés, au nombre de 10 à 15 par mm, de structure homogène. Les fibres sont longues de 1200 à 1400 µm, larges de 19 à 21 µm avec des parois (2p) épaisses de 16 µm en moyenne.

Propriétés

Plage de densité à 12 % d'humidité : **1,15-1,31** ; Coefficient de retrait Volumique moyen : 0,84.

Retrait Tangentiel total moyen : 12 % ; Retrait Radial total moyen : 7,7 %.

Propriétés Mécaniques Moyennes à 12 % d'humidité : Contrainte à la rupture en compression axiale : 117 MPa ; Contrainte à la rupture et module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $\sigma_r = 251$ MPa, $E_l = 30000$ MPa.

Usinage : difficile.

Durabilité : très bonne résistance vis à vis des termites de bois sec et des autres insectes xylophages, très bonne résistance aux champignons de pourriture, classe de risques biologiques couverte : **4**.

Imprégnabilité : faible.

Utilisations recommandées : ébénisterie, objets tournés, archet, marqueterie, placage tranché...

Provenance de la poutre prélevée : piste de Paul Isnard.

II - 1.2.11. Autres essences utilisées

Parmi les essences citées, ayant servi à faire des essais de validation, citons :

Le Simarouba, *Simarouba amara* Aubl. (Simaroubacées), Acajou blanc, Marupa.

Grand arbre héliophile, sans contrefort, fréquent en forêt secondaire dans toute l'Amérique intertropicale et dans les Caraïbes. Son bois est blanc crème avec une structure étagée. Sa densité, son usage, sa durabilité et ses propriétés mécaniques sont comparables à celles du Yayamadou. Il est utilisé par l'artisanat local (cf. planches II-1c et II-2c photo 11 en **annexe IV**).

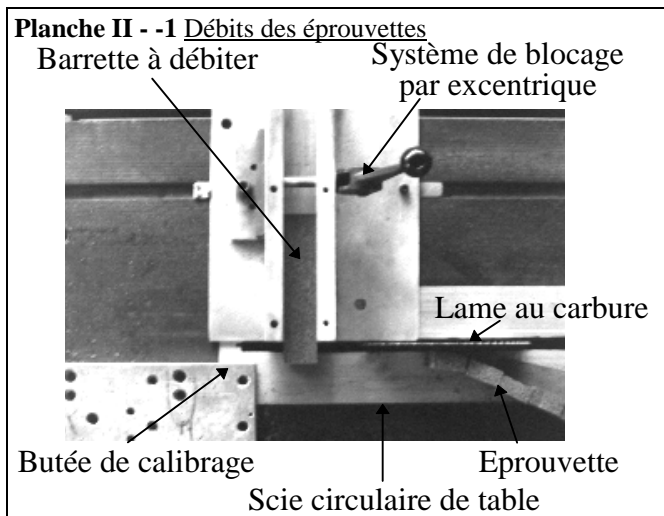
La Bagasse, *Bagassa guianensis* Aubl. (Moracées), Bois vache, Tatajuba.

Grand arbre héliophile au pied évasé, de forêt primaire et de vieille forêt secondaire. On le rencontre en Amazonie et dans les Guyanes. L'écorce contient un latex blanc abondant. Le bois, souvent très contrefilé, jaune vif quand il est frais devient assez rapidement brun roux. Ses propriétés physiques et mécaniques sont comparables à celles du Saint-Martin jaune. C'est une essence très durable (cf. planches II-1c et II-2c photo 12 en **annexe IV**).

NB : Dans la version papier sont présentes des planches anatomiques et macroscopiques des espèces utilisées

II - 2. Organisation des débits et des manipulations

Pour chacune des dix essences choisies, aussitôt après abattage, nous avons fait scier, dans la bille de

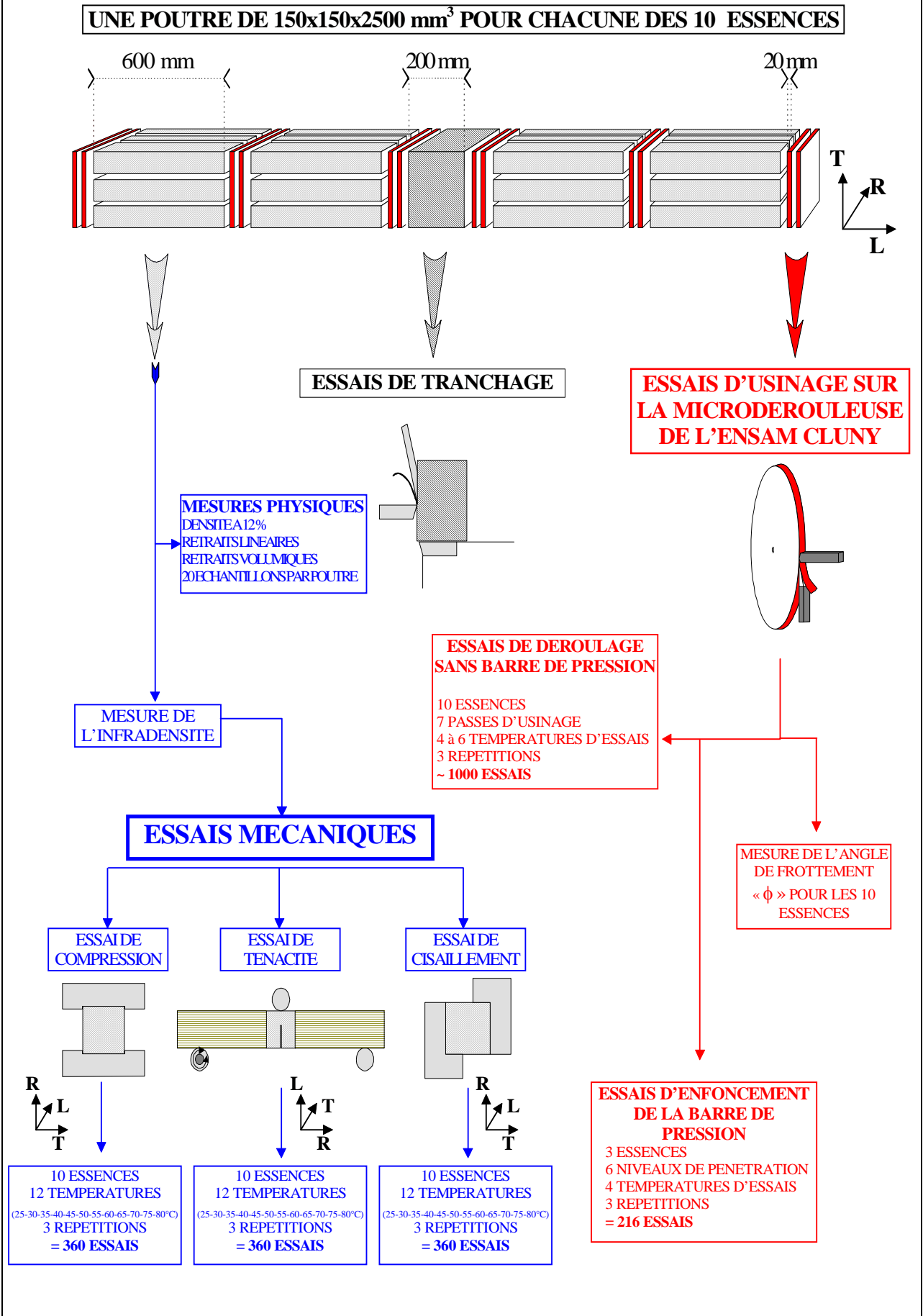


piéd, une poutre de 2 mètres de long et de 150 x 150 mm² de section, soit dix poutres au total. Nous avons ensuite débité à la scie à ruban les différents pré-débits d'usinage. Les barrettes d'**essais mécaniques** (maintenues à l'état humide par trempage) sont dégauchies et rabotées. Les carrelets obtenus sont alors débités transversalement à l'aide d'une scie de table équipée d'un dispositif spécifique, qui permet d'usiner des éprouvettes rigoureusement parallélépipédiques (II - - 20). Les éprouvettes sont alors mises à tremper jusqu'à leur utilisation.

Pour chacune des dix essences, à partir de chaque poutre nous débitons 36 barrettes d'essais mécaniques. Sur ces 36 barrettes, 20 sont sélectionnées⁵ pour être dégauchies et rabotées. Sur les 20, seulement 8 à 10 sont débitées en éprouvettes d'essais. On obtient ainsi environ 250 éprouvettes, seulement **120** (40 x 3) sont utilisées pour les essais. Soit en tout 1200 éprouvettes débitées pour les essais mécaniques.

⁵ Les critères de sélection sont : l'absence de défaut (comme les coups de vent par exemple), et la meilleure orientation possible par rapport aux directions d'orthotropie du bois.

Figure II - -21 Organigramme des débits et des manipulations



II - 3. Résultats des mesures physiques

Sur chaque barrette servant à débiter les éprouvettes d'essais mécaniques, nous avons prélevé un échantillon parallélépipédique afin de mesurer les densités et les retraits. Soit une vingtaine d'échantillons pour chacun des dix arbres (nous n'avons qu'un arbre par essence).

II - 3.1. Quelques définitions (GUITARD, 1988), KOLLMAN (1984), norme NF B 51-006

Densité à un taux d'humidité H

La densité du bois est le rapport entre deux masses volumiques : celle du bois et celle de l'eau. Par conséquent, elle n'a pas d'unité. Toutefois la **masse volumique** « ρ » de l'eau étant dans les conditions atmosphériques « normales » (1 atm, 20°C) proche de 1 kg/m³, la densité est souvent assimilée à la masse volumique :

$$\text{Densité}_H \sim \rho_H = \text{Masse}_H / \text{Volume}_H \quad \text{où } H \text{ est l'humidité en \%}$$

Cas particulier masse volumique anhydre

$$\text{Densité}_{\text{anhydre}} \sim \rho_{\text{anhydre}} = \text{Masse}_{\text{anhydre}} / \text{Volume}_{\text{anhydre}}$$

Infradensité ID

La notion d'infradensité est définie de la façon suivante :

$$ID \sim \rho_{ID} = \text{Masse}_{\text{anhydre}} / \text{Volume}_{\text{saturé}}$$

Retrait linéaire R et T

Le retrait apparaît dès que l'humidité du bois devient inférieure au **point de saturation des fibres**. Dans un bois vert contenant une quantité importante d'eau, cette dernière se trouve dans les parois cellulaires (eau liée) et dans le lumen des cellules (eau libre). Le retrait se manifeste au-dessous du point de saturation des fibres lorsque l'eau libre a été évacuée lors du séchage. Le retrait est donc engendré par le mouvement de l'eau liée qui se trouve dans les parois cellulaires.

Les retraits linéaires correspondent aux variations de dimension du matériau dans les trois directions du repère RTL. Les retraits linéaires totaux représentent les variations dimensionnelles du bois entre l'état saturé et l'état anhydre. Ils s'expriment sous la forme :

$$\text{Retrait linéaire Total (\%)} = [(\text{Dimension}_{\text{saturé}} - \text{Dimension}_{\text{anhydre}}) / \text{Dimension}_{\text{saturé}}] \cdot 100$$

Remarque sur le retrait longitudinal

Mis à part certains cas particuliers (bois de réaction), le retrait longitudinal est généralement faible par rapport au deux autres retraits linéaires. Dans nos mesures, sa valeur est de l'ordre de la valeur de l'incertitude sur la mesure. C'est pourquoi, bien que nous l'ayons mesuré, il n'est pas calculé en tant que tel.

Retrait volumique total

Il caractérise la variation relative du volume d'un échantillon entre l'état saturé et l'état anhydre :

$$\text{Retrait volumique Total (\%)} = [(\text{Volume}_{\text{saturé}} - \text{Volume}_{\text{anhydre}}) / \text{Volume}_{\text{saturé}}] \cdot 100$$

Coefficient de retrait volumique α_v

Il correspond à la variation volumique du bois lorsque son humidité varie de 1 %. Nous l'avons calculé entre l'état sec à l'air (~ 12 % d'humidité) et l'état anhydre :

$$\alpha_v = [(\text{Volume}_H - \text{Volume}_{\text{anhydre}}) / (\text{Volume}_{\text{saturé}} \times H)] \cdot 100$$

Le coefficient de retrait volumique est généralement exprimé en % pour 1 % d'humidité. De plus, il sous-entend l'idée d'une évolution linéaire du retrait en fonction de l'humidité

Anisotropie du retrait

Elle correspond au rapport entre le retrait tangentiel et le retrait radial. Quoique très variable, pour un certain nombre d'essences, ce rapport a une valeur proche de 2. Il est une des caractéristiques du concept de nervosité du bois.

Humidité du bois

$$H (\%) = [(\text{Poids } H - \text{Poids anhydre}) / \text{Poids anhydre}] \cdot 100$$

Humidité au point de saturation des fibres

Elle correspond à l'humidité théorique où l'eau du bois n'est contenue que dans les parois cellulaires, au-dessous de cette humidité le bois se rétracte. Si l'on estime, assez grossièrement, que les retraits évoluent de façon linéaire lorsque l'humidité du bois passe de l'humidité au psf à l'état anhydre, il est alors possible de calculer l'humidité au psf (S) de la façon suivante :

$$S (\%) = [(\text{Volume saturé} - \text{Volume anhydre}) / (\text{Volume à } H - \text{Volume anhydre})] \cdot H \cdot 100$$

II - 3.2. Mesure de la densité

II - 3.2.1. Méthodologies comparatives

Pour la mesure de la densité, nous avons comparé quatre méthodes d'estimation du volume saturé de l'éprouvette :

- a - La première méthode consiste à mesurer à l'aide d'un palmer, les dimensions de l'échantillon au centre de chaque face parallèle. Les débits étant suffisamment parallélépipédiques.
- b - La seconde méthode estime le volume avec un volumétre à mercure.
- c - La troisième méthode estime le volume saturé par le poids saturé de l'éprouvette, après saturation complète à la cloche à vide⁶.
- d - La dernière méthode estime le volume saturé en mesurant le poids du volume d'eau déplacé par l'éprouvette totalement immergée.

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients :

- a - La première méthode est rapide mais nécessite un échantillon d'une géométrie parfaite. De plus elle exige trois mesures, l'incertitude sur la mesure du volume est donc multiplié par trois.
- b - La seconde méthode est une méthode de référence. Outre la toxicité du mercure, elle est essentiellement handicapée par un temps de manipulation long et une attention soutenue. De plus, des micro-billes de mercure pénètrent dans les vaisseaux dont le diamètre est supérieur à 100 µm, ce qui perturbe les mesures ultérieures⁷.
- c - La troisième méthode convient bien pour de petits échantillons. Les échantillons plus volumineux ou certaines espèces (Dodomissinga, Epicéa...) sont plus longs et plus difficiles à saturer totalement.
- d - La dernière méthode est rapide et précise. Toutefois, comme la méthode précédente, elle nécessite un égouttage ou un essuyage rigoureusement identique pour chaque échantillon.

Dans l'ensemble, si l'on tient compte de leurs particularités, les quatre méthodes se valent et sont très liées entre elles. Toutefois, la dernière méthode qui estime l'inverse de la poussée d'Archimède, nous semble être la plus pratique et la plus fiable. C'est donc celle-ci que nous avons retenue par la suite.

II - 3.2.2. Résultats

Pour l'ensemble des essences, la densité moyenne à 12 % se situe dans la plage de variation donnée par la littérature (bien que fréquemment à une des extrémités de cette plage). Alors que la densité à 12 % se distribue assez régulièrement dans notre gamme de densité ; Nous remarquons que l'infradensité du Grignon, de l'Angélique et du Bois rouge se suivent de très près. Les propriétés mécaniques du bois humide de ces trois essences doivent donc être, en principe assez proches.

Tableau II - -1 Densités moyennes des dix espèces étudiées (20 échantillons par essence):

Nom commun	Densité anhydre		Densité à 12%		InfraDensité		Danh -ID
	Moyenne	Ecart-type ⁸	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	ID
Dodomissinga	0.25	0.033	0.27	0.035	0.23	0.027	12%
Yayamadou marécage	0.43	0.011	0.45	0.010	0.34	0.008	24%
Moutende Kouali	0.64	0.011	0.67	0.011	0.50	0.017	26%

⁶ Les macromolécules de cellulose ont une densité d'environ 1.58, les macromolécules de lignine ont une densité comprise entre 1.38 et 1.41. La densité de la matière ligneuse varie donc en fonction des proportions de lignine et de cellulose mais aussi en fonction des autres macromolécules (pentosanes) et des extractibles aux solvants (résine, cires, graisses, polyphénols...) qui peuvent parfois être en quantité non négligeable dans les bois tropicaux (jusqu'à 20 % pour le Wacapou). Toutefois, pour simplifier nous utiliserons pour le calcul une densité de la matière ligneuse de 1.50. Le volume saturé est alors égal à la somme du poids d'eau (eau libre + eau liée) contenue dans l'éprouvette et du poids de la matière ligneuse de cette éprouvette : $(P_{sat} - P_{anh}) + (P_{anh}/1.5)$, où P_{sat} est le poids saturé de l'éprouvette et P_{anh} son poids anhydre (d'après KOLLMANN 1984).

⁷ Nous avons constaté qu'en tapotant sur une paillasse des échantillons de Boco saturés à la cloche à vide et dont le volume avait été mesuré au volumétre à mercure, il en sortait de nombreuses microbilles de mercure dont le diamètre était inférieur à 100 µm.

⁸ L'écart type est une mesure de la dispersion des valeurs expérimentales par rapport à la moyenne de la population. L'écart type est calculé à l'aide de la méthode "sans biais:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}}$$

Grignon	0.70	0.046	0.73	0.045	0.59	0.028	17%
Angélique	0.72	0.034	0.75	0.031	0.61	0.020	16%
Saint-Martin jaune	0.72	0.017	0.77	0.018	0.65	0.019	12%
Bois rouge	0.77	0.038	0.82	0.037	0.60	0.015	27%
Wacapou	0.89	0.035	0.94	0.031	0.79	0.015	13%
Ébène verte	1.00	0.013	1.07	0.013	0.90	0.010	11%
Boco	1.14	0.018	1.18	0.033	0.92	0.013	24%

Remarquons encore l'importante différence de classement entre la densité à 12 % du Bois rouge et son infradensité. Cette particularité fait de son bois un matériau relativement différent à l'état vert et à l'état sec à l'air.

L'écart de variation entre la densité anhydre et l'infradensité exprimée par le rapport $\frac{Danh - ID}{ID} \Rightarrow \frac{Panh/Vanh - Panh/Vsat}{Panh/Vsat} \Rightarrow \frac{Vsat - Vanh}{Vanh}$ permet d'appréhender sans mesurer le retrait,

les essences à fort retrait comme le Bois rouge, le Moutende Kouali, Yayamadou marécage ou Boco.

II - 3.3. Mesure du retrait

Les dimensions des échantillons sont mesurées au palmer, aux états saturés, sec à l'air et anhydre. L'état sec à l'air est obtenu après un séjour de trois mois dans une pièce régulièrement climatisée⁹. La plage d'humidité de stabilisation des échantillons, toutes essences confondues, est de 10,27 % à 11,50 %. L'état anhydre est obtenu lorsque le poids de l'échantillon s'est stabilisé dans une étuve à 102 °C.

Le coefficient de retrait volumique est calculé à partir des mesures faites au palmer, entre l'état sec à l'air et l'état anhydre.

Incertitude sur la mesure des retraits :

- L'incertitude sur la mesure de dimension au palmer et de l'ordre de 10 µm.
- L'arête des échantillons mesurés est de 24 mm
- Le retrait minimum mesuré est de 2 %.

Le retrait linéaire (en %) est égal à : (Longueur anhydre - Longueur saturée) x 100 / Longueur saturée.

L'incertitude sur la mesure est donc :

$$E_{\text{Re trait}} = \frac{\text{erreur}(L_{\text{anh}}) + \text{erreur}(L_{\text{sat}})}{L_{\text{anh}} - L_{\text{sat}}} \left[+ \frac{\text{erreur}(L_{\text{sat}})}{L_{\text{sat}}} \right] = \frac{0.01 + 0.01}{0.02 \times 24} = \mathbf{4.2\%}$$

L'erreur maximum sur la mesure du retrait est de 5 %.

Terme négligeable

II - 3.3.1. Résultats

♦ Au vu des résultats, nous pouvons classer les différentes espèces étudiées en 3 classes.

Les essences à fort retrait : le Moutende Kouali, le Bois rouge, le Yayamadou marécage et le Boco. Les essences à retrait moyen : le Grignon et l'Angélique. Les essences à faible retrait : le Wacapou, l'Ebène verte, le Dodomissinga et le Saint-Martin jaune (II - -1).

Tableau II - -2 Retraits linéaires et volumétriques moyens des dix espèces étudiées (20 échantillons par essences) :

Nom commun	Retrait Tangentiel total en %		Retrait Radial total en %		Retrait Volumique total en %		Coefficient de Retrait Volumique en % par % d'humidité		S	Anisotropie du retrait
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type		
Dodomissinga	7.2%	0.3%	1.8%	0.1%	10%	0.4%	0.31	0.02	32%	3.88

⁹ Les conditions climatiques moyennes de Guyane (T = 26 °C et H = 86 %) font qu'un échantillon de bois abrité à l'extérieur, se stabilise à environ 20 % d'humidité relative. Toutefois suivant la saison, la section et nature du bois considéré, cette humidité peut varier de 14 à 21 %. Dans une pièce climatisée en permanence, où l'humidité est d'environ 50 % et la température est en moyenne de 23 °C, le bois se stabilise entre 9 et 10 % d'humidité.

Yayamadou marécage	14.2%	0.9%	5.7%	0.6%	24%	2.0%	0.62	0.05	38%	2.49
Moutende Kouali	15.5%	1.2%	5.9%	0.4%	26%	2.3%	0.70	0.02	37%	2.63
Grignon	10.1%	1.3%	4.1%	0.5%	16%	2.2%	0.57	0.05	28%	2.46
Angélique	9.4%	0.7%	4.5%	0.5%	16%	1.5%	0.48	0.06	33%	2.10
Saint-Martin jaune	7.1%	0.3%	4.1%	0.1%	12%	0.4%	0.58	0.01	21%	1.72
Bois rouge	14.7%	1.3%	7.5%	0.9%	27%	3.1%	0.59	0.06	46%	1.96
Wacapou	7.0%	0.5%	4.8%	0.5%	13%	1.1%	0.64	0.04	21%	1.45
Ébène verte	4.7%	0.2%	5.0%	0.2%	11%	0.5%	0.56	0.02	19%	0.94
Boco	12.0%	0.4%	8.7%	0.6%	25%	1.1%	0.90	0.06	28%	1.38

◆ Notons sur ce tableau que les coefficients de retraits volumiques du Bois rouge, de l'Ébène verte et du Saint-Martin jaune sont très proches (0.59, 0.56, 0.58), alors que le retrait volumique total du Bois rouge (27 %) est plus de 2 fois plus élevé que celui de l'Ébène verte (11 %) ou du Saint-Martin jaune (12 %). L'explication de cette discordance s'explique par la variabilité spécifique de S (humidité au point de saturation des fibres). En effet l'humidité calculée au point de saturation des fibres est d'environ 20 % pour l'Ébène verte ou le Saint-Martin jaune et elle est supérieure à 40 % pour le Bois rouge.

Ces remarques révèlent la nécessité d'une détermination précise de S et plus globalement, elles soulèvent l'importance d'une meilleure connaissance de l'évolution des retraits lorsque l'humidité varie de S à l'état anhydre.

◆ En traçant la courbe des retraits linéaires en fonction de la densité à 12 %, on s'aperçoit que le retrait radial est lié à la densité (le coefficient de corrélation r est de 0,68***) alors que le retrait tangentiel ne l'est pas (r = -0.06 NS). Cette remarque reste valable si l'on considère l'ensemble des essais du CTFT sur les essences guyanaises (II - -22).

Figure II - -1 Retraits radiaux et tangentiels totaux en fonction de la densité à 12%, sur nos essences (à gauche) et sur les données guyanaises du CIRAD (à droite) en gris retrait tangentiel en noir retrait radial.

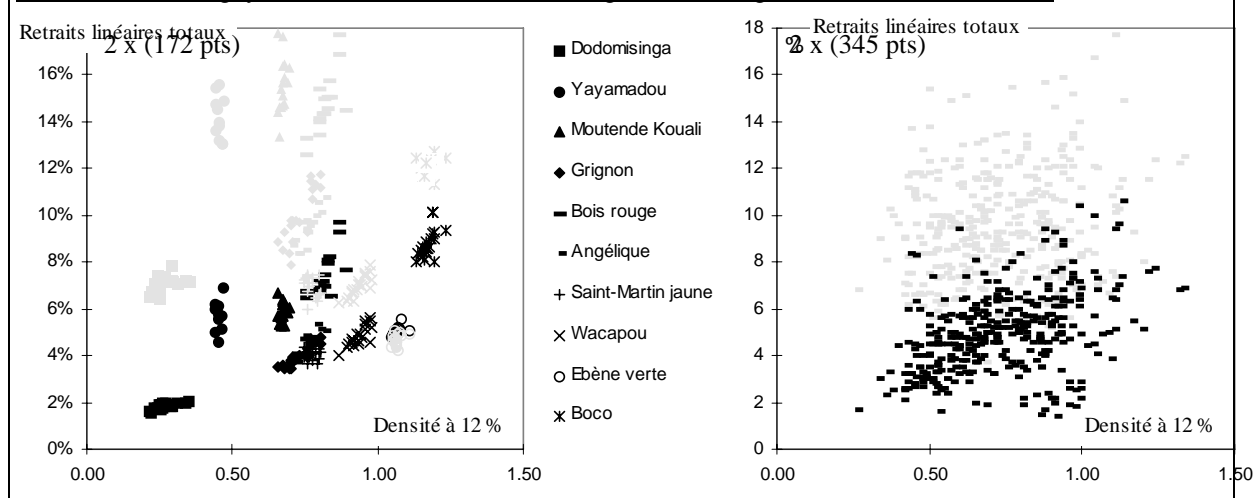
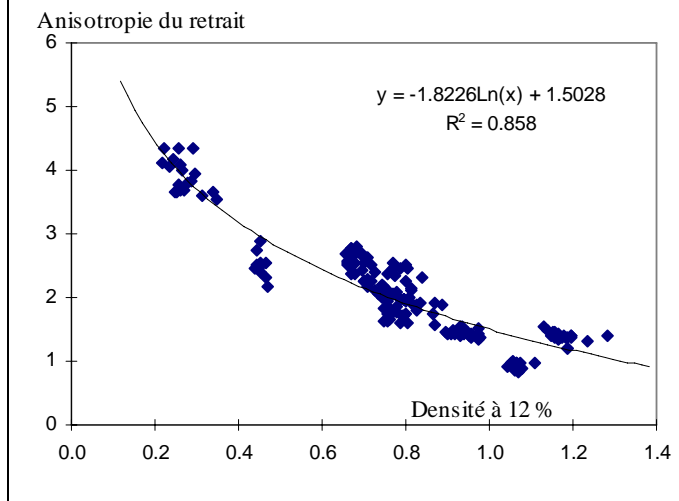


Figure II - 2 Anisotropie du retrait en fonction de la densité (200 couples de mesure)



♦ L'anisotropie du retrait est fortement liée à la densité (II - 3), elle décroît quand la densité augmente. Une des hypothèses qui peut être envisagée pour expliquer ce résultat (qui est d'ailleurs confirmé par les essais CTFT guyanais) est l'effet coquille (KELSEY, 1963). C'est-à-dire que moins le bois est dense, plus les rayons ligneux jouent un rôle de restriction. Le retrait étant limité dans le sens radial, par effet coquille, cette restriction est compensée par un retrait tangentiel plus fort. Nous reconsidérerons cette hypothèse dans le chapitre suivant.

♦ L'échantillon de *Tabebuia capitata* Sandw. que nous avons utilisé, a une anisotropie du retrait très proche de 1. A savoir que les comportements hygroscopiques radiaux et tangentiels sont presque les mêmes.

Ce qui, dans son utilisation, peut être un avantage très important. La question se pose de nouveau : cette particularité est-elle inhérente à l'espèce *Tabebuia capitata*? Car rappelons que la littérature donne une anisotropie de 1,2 à 1,3 pour *Tabebuia serratifolia* Nichols. Ou, cette « homotropie » du retrait n'est-elle inhérente qu'à l'individu et dépend des conditions de croissance, des conditions du milieu ou peut-être même de son génome ? D'après la banque de données du CIRAD-CTFT, l'échantillon n° 23675, identifié comme *Tabebuia sp.* a une anisotropie proche de 1. Or il se rapprocherait plutôt de *Tabebuia serratifolia* du fait de la présence de lapachol dans ses éléments de vaisseaux (*Tabebuia capitata* en est normalement dépourvu). La question reste donc posée.

ESSAIS MECANIQUES

III - Méthodologie générale des essais mécaniques

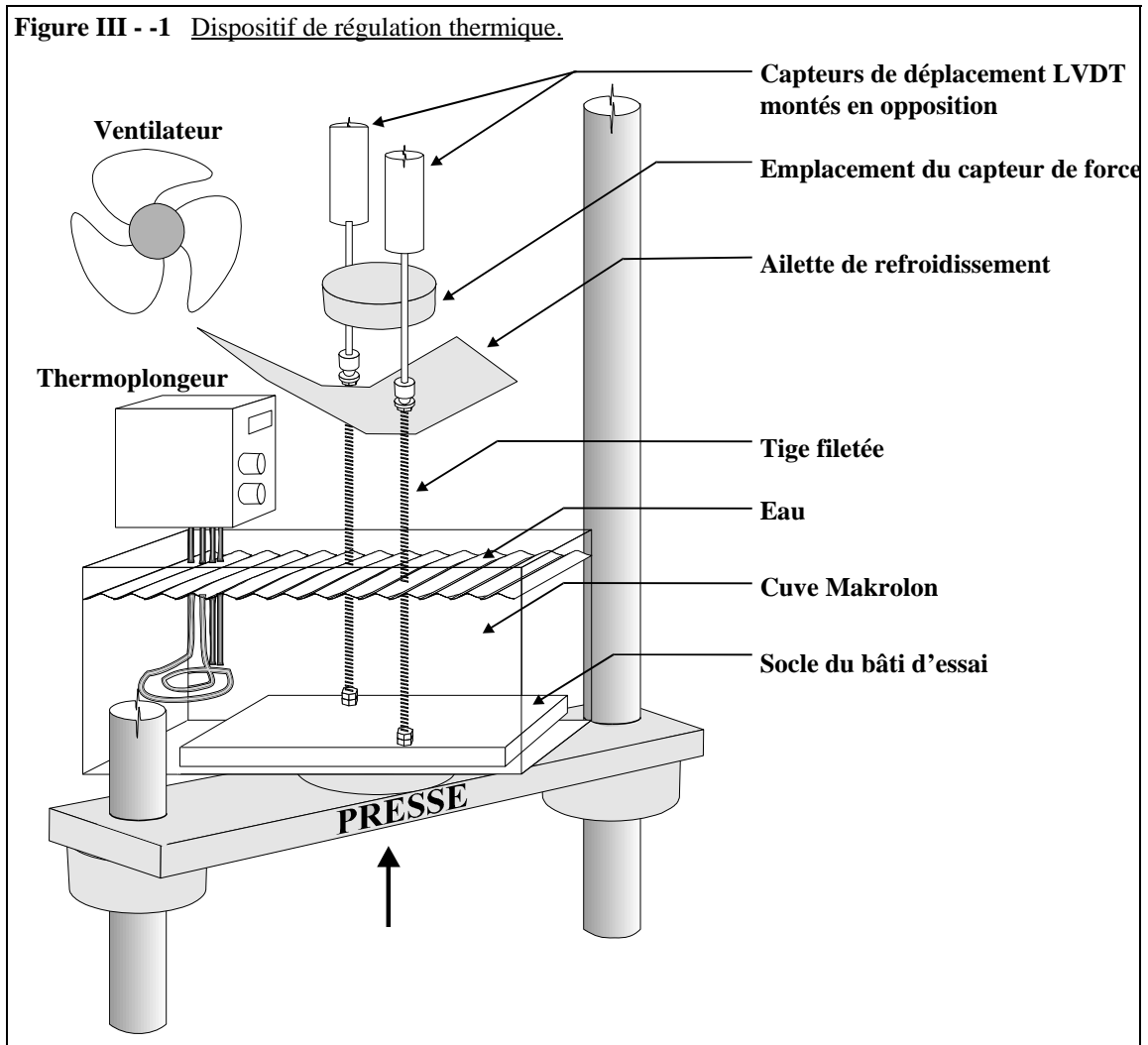
III - 1. Organisation des essais

III - 1.1. Description de la machine d'essais

Tous les essais mécaniques ont été faits à KOUROU sur une presse mécanique de **50 kN** de type « CLASSIC » et de marque Wykeham Farrance England. Cette presse est équipée d'un module d'asservissement de la vitesse de déplacement du plateau et d'un module de conditionnement (alimentation, interface) qui permet la connexion de 4 capteurs analogiques. Les 2 modules de conditionnement sont connectés à un ordinateur par une interface RS-232. Le programme de pilotage en Basic a été adapté et complété pour les trois types d'essais.

Pour les trois essais, nous avons mesuré le déplacement du banc inférieur de la presse par rapport à la traverse supérieure fixe. Les capteurs de déplacement de 76 mm de course, sont de type inductif (technologie **LVDT**) et de marque Penny & Giles. Pour minimiser les erreurs de mesure dues aux déplacements transverses du dispositif, 2 capteurs de déplacement sont montés en opposition de part et d'autre du plateau de la presse (figure III - -1).

L'extrémité de chaque palpeur des capteurs LVDT est munie d'une bille d'acier qui établit le contact



avec le bâti d'essai. L'étalonnage des capteurs de déplacement est fait avec un comparateur Mitutoyo à aiguille dont la précision est de 5 μm . La linéarité des capteurs LVDT équivaut à $\pm 1\%$ de l'étendu de mesure, leur sensibilité est de 0,01 mm.

Pour réaliser les essais nous avons utilisé **3 capteurs de force à jauges** de différentes sensibilités :

- un capteur de 5000 daN et un capteur de 500 daN de type FN 300 TC de marque FGP Instrumentation, ces capteurs ont été étalonnés à l'aide d'un anneau dynamométrique de 1000 daN, leur linéarité équivaut à +/- 0.1 % de l'étendue de mesure,
- un capteur de 200 daN de type AC 200 et de marque SEDEME étalonné avec une série de poids de 5 kg et dont la linéarité équivaut à 0.14 % de l'étendue de mesure.

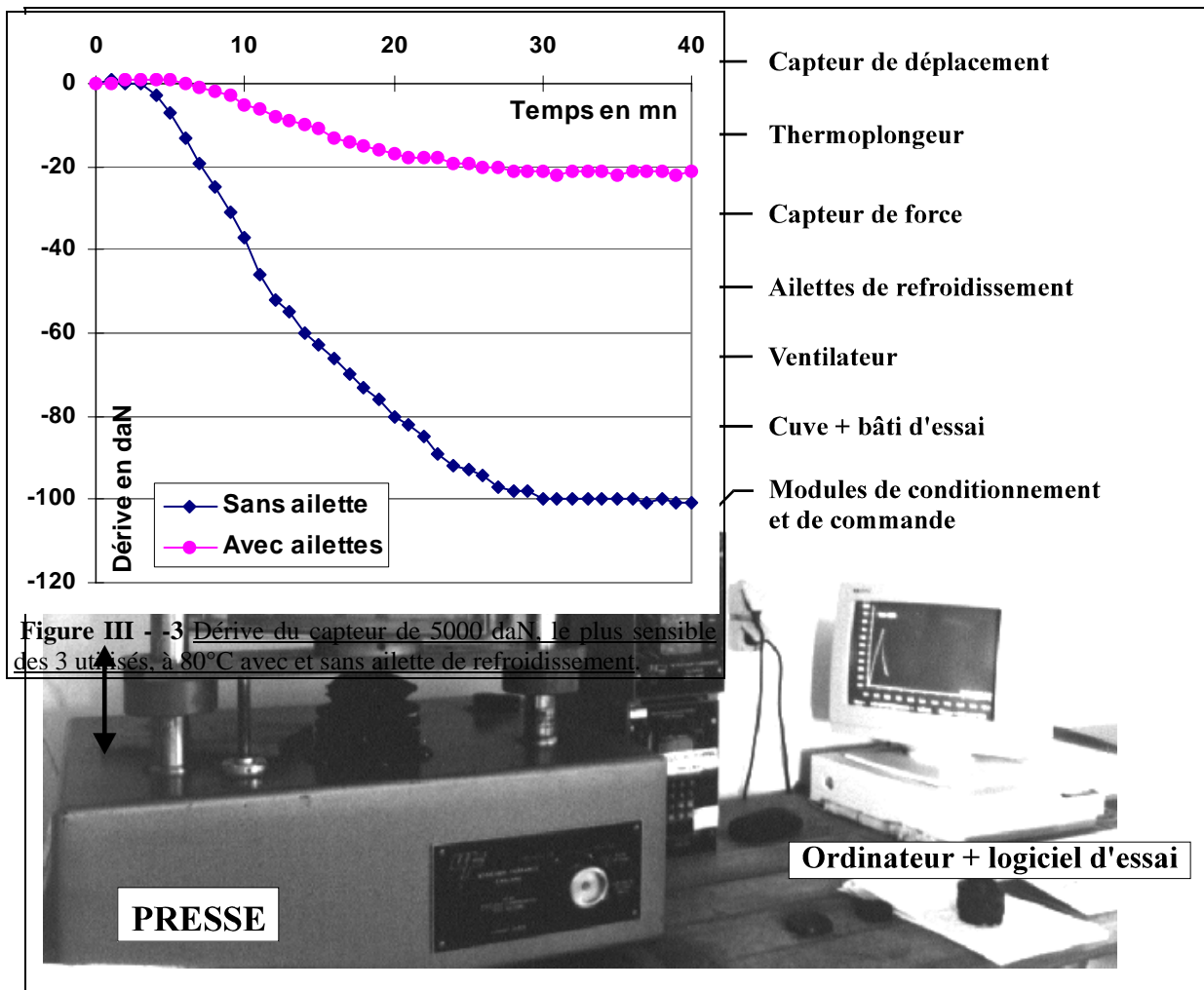
Le Bâti d'essai se compose d'une plaque en inox de 20 mm x 120 mm x 300 mm sur laquelle sont vissées, diamétralement opposées par rapport au centre, 2 tiges filetées en Inox de 300 mm de long, munies à leur extrémité d'une pastille métallique en contact avec les palpeurs des capteurs LVDT (III - -2).

III - 1.2. Le dispositif de régulation thermique

Les essais mécaniques se font pour des températures variant de 25°C à 80°C. L'ensemble du bâti d'essai est placé dans une cuve rectangulaire de 9 litres en Makrolon. Cette cuve est remplie d'eau afin que l'éprouvette d'essai soit totalement immergée. L'eau est chauffée grâce à un thermoplongeur qui repose sur le socle de la presse par l'intermédiaire d'un Statif. Un espace suffisant est laissé entre le corps du thermoplongeur et le bord supérieur de la cuve pour qu'ils ne se touchent pas pendant l'essai (III - -3). La température d'essai est réglée au dixième de degré près et est stable pendant toute la durée de la manipulation. Pour réduire le temps de mise à température des éprouvettes, ces dernières sont préalablement mises à chauffer à la température d'essai dans un bain marie thermorégulé.

III - 1.3. Protection des capteurs contre la dérive thermique et tests de stabilité

Le montage décrit ci-dessus permet une bonne régulation de la température, mais il génère d'autres problèmes comme la dérive thermique des capteurs. Les capteurs de déplacement LVDT sont peu sensibles à ces gammes de température et de plus, ils sont situés assez loin de la source de chaleur. Par contre, les capteurs de force à jauges sont beaucoup plus exposés et plus sensibles.



Plusieurs dispositifs d'isolation ont été testés, finalement nous avons retenu un système de refroidissement par ailettes métalliques (BAILLERES com. pers.). Le système se compose de 2 plaques en inox percées au centre et placées au-dessous du capteur de force. Les ailettes diffusent la chaleur transmise par les pièces du bâti en contact avec l'échantillon. De plus, elles condensent l'eau s'évaporant du bain chauffé. Un petit ventilateur permet d'accélérer l'évaporation de l'eau sur les ailettes. La III - -4 montre l'influence des ailettes sur la dérive des capteurs et la nécessité de préchauffer le dispositif.

L'eau chauffée dans la cuve contenait les extractibles des bois utilisés. Elle était très corrosive pour les différentes pièces métalliques utilisées pour les essais. Lorsque ces pièces n'ont pas pu être faites en inox, elles ont été fabriquées en Dural et recouvertes d'une graisse silicone.

III - 1.4. Déformation élastique du dispositif expérimental

Des essais de mise en charge du dispositif sans éprouvette à différentes températures ont montré que celui-ci se déformait légèrement de façon élastique et en fonction de la température dans le domaine de mesure, le comportement de la cuve Makrolon y est sans doute pour beaucoup. L'équation suivante nous donne l'évolution de la déformation élastique ou **Raideur** du dispositif expérimental en fonction de la température, calculée à partir de la régression linéaire à 5 températures et sur 6 essais par température :

$$R = -82 T + 19980$$

où **R** est la raideur élastique du bâti en **daN/mm** et **T** la température en **°C**.

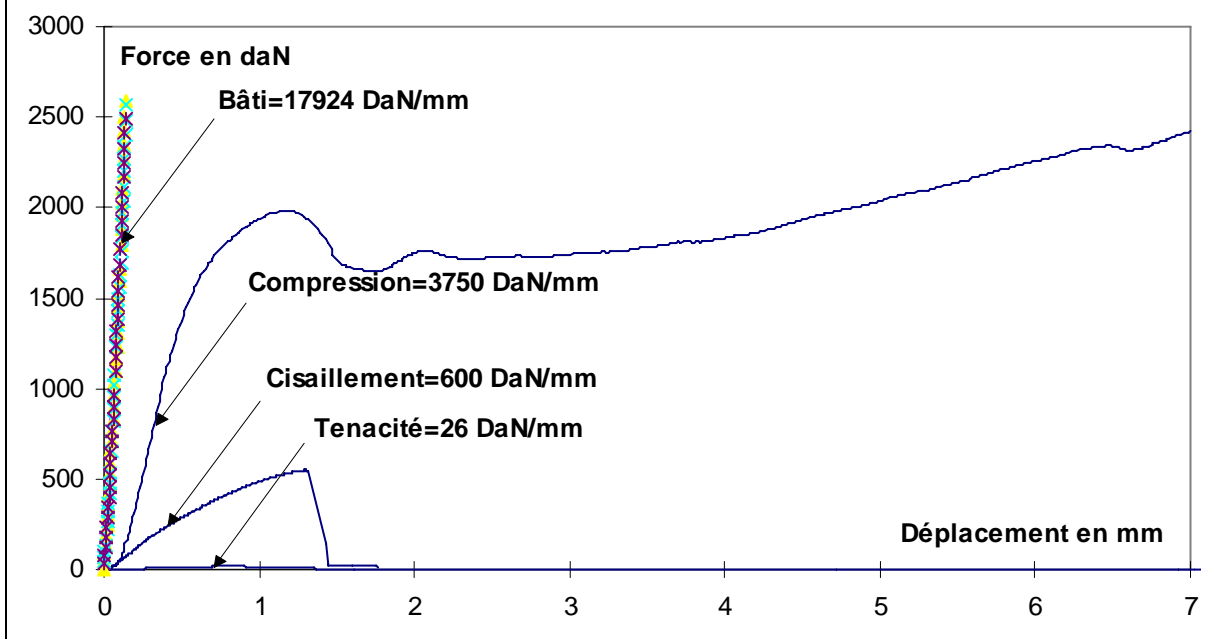
Si cette déformation élastique a peu d'influence sur les mesures des pentes élastiques des essais de ténacité et de cisaillement, moins de 2% sur les valeurs mesurées, elle en a sur le module de compression transverse, jusqu'à 20% pour l'Ebène verte (III - -1). Afin de prendre en compte cette déformation, nous avons corrigé la raideur élastique en compression dans les calculs ultérieurs. Si l'on nomme α l'angle que fait la pente mesurée avec l'axe des abscisses, et si l'on appelle β l'angle que fait la pente du dispositif expérimental avec l'axe des abscisses. La raideur corrigée est alors égale à :

$$R_c = \tan \left[\alpha + \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right]$$

c'est à dire $R_c = \tan \left[\arctan(R_{c_0}) + \left(\frac{\pi}{2} - \arctan(-82T + 19980) \right) \right]$

où **R_{c0}** est la raideur mesurée, **R_c** la raideur corrigée et **T** la température.

Figure III - -2 Comparaison des raideurs entre le bâti et les 3 types d'essais mécaniques à 25°C, pour l'essence testée ayant les propriétés mécaniques les plus élevées : l'Ebène verte.



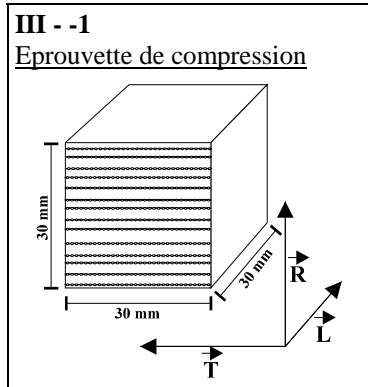
III - 1.5. Mesures physiques sur les éprouvettes d'essai

Pour chaque essence et pour chaque type d'essai, nous avons fait une série de 3 essais à douze températures différentes de 25 à 80°C tous les cinq degrés. Les essais sont présentés dans un document annexe.

Pour l'ensemble des essais, nous avons préalablement saturé les éprouvettes à l'aide d'une cloche à vide. Sur chaque éprouvette, nous avons mesuré les dimensions saturées, le poids saturé, le volume saturé et le poids anhydre après l'essai.

III - 2. Essai de compression radiale

III - 2.1. Description du dispositif



Les essais de compression ont été faits sur des éprouvettes cubiques, de 30 mm de coté, débitées dans les directions de l'orthotropie du bois (Figure III - -3). La direction de compression était radiale. Le diamètre des arbres ayant fourni les éprouvettes, était suffisamment grand pour ne pas contraindre les débits. Nous avons donc choisi de débiter des échantillons assez gros pour améliorer la précision de mesure en augmentant les amplitudes mesurées. Toutefois les éprouvettes cubiques de 40 x 40 x 40 mm³ retenues lors des essais préliminaires, dépassaient la sensibilité du capteur de force lors des essais. Nous nous sommes alors limités à des cubes de 30 mm de coté.

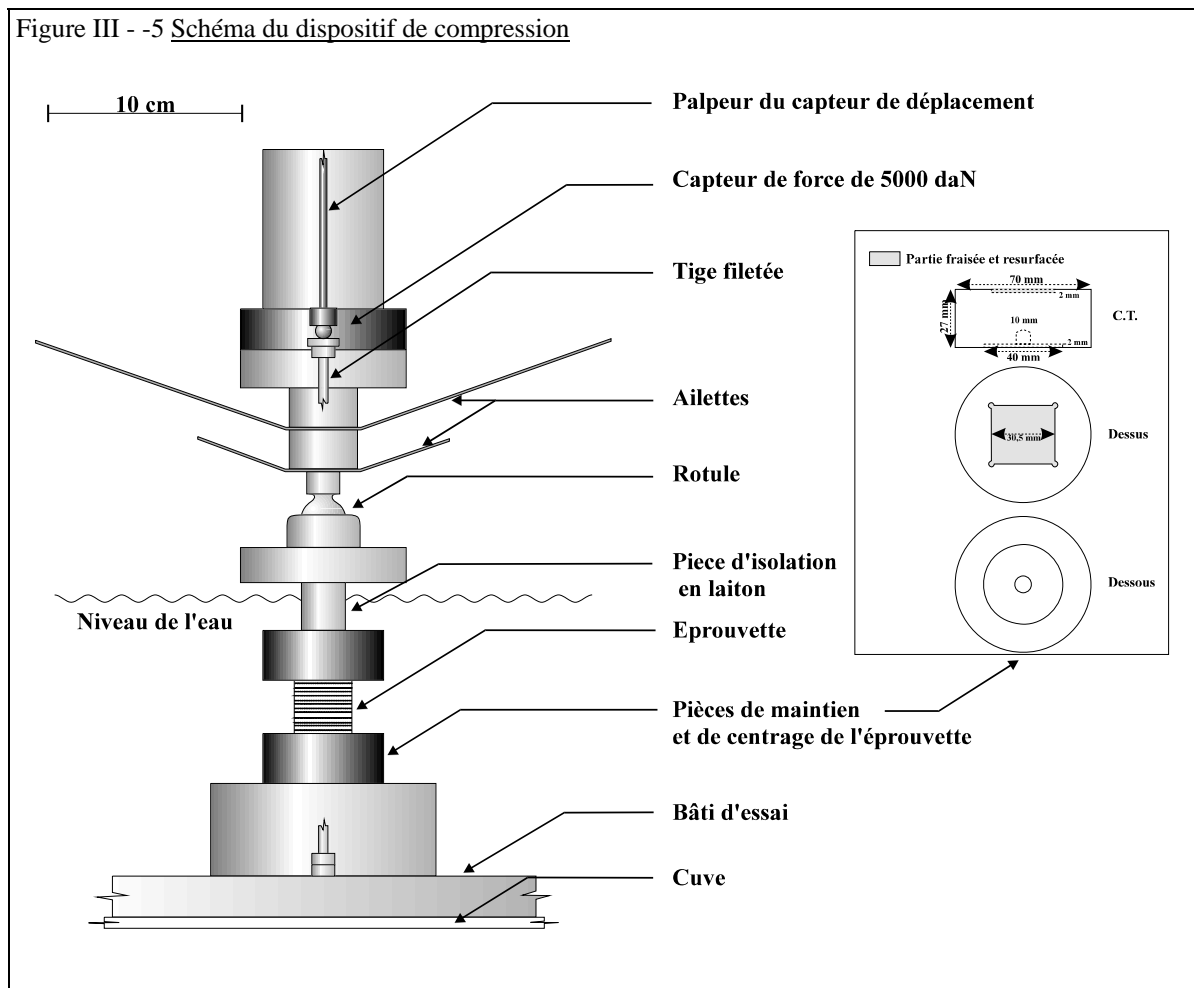
L'éprouvette est centrée et maintenue en place par deux pièces cylindriques en inox légèrement fraisées. Une pièce en laiton permet de ralentir la conduction thermique entre les pièces immergées et le capteur

(Figure III - -4).

Lors de l'essai, le déplacement maximal en compression est de 7 mm. Il correspond à une déformation de 23%. La vitesse d'essai est de 0.5 mm/mn soit **278 microdéformations par seconde** ($\mu\text{def/s}$), la durée de l'essai est de 14 mn. Les efforts mesurés varient de 300 à 2400 daN entre l'essence la moins dense et l'essence la plus dense. Nous avons utilisé le capteur de 5000 daN pour ces essais. En plus des 3 essais de compression radiale par température et par essence, nous avons fait trois essais de compression tangentielle à 30°C pour chaque espèce.

Le montage du dispositif sur rotule permet de limiter les défauts de parallélisme lors de la mise en place des éprouvettes. Toutefois nous le verrons par la suite, la rotule peut amplifier les déformations de biais et être à

Figure III - -5 Schéma du dispositif de compression



l'origine d'erreurs non négligeables sur la mesure de la pente élastique.

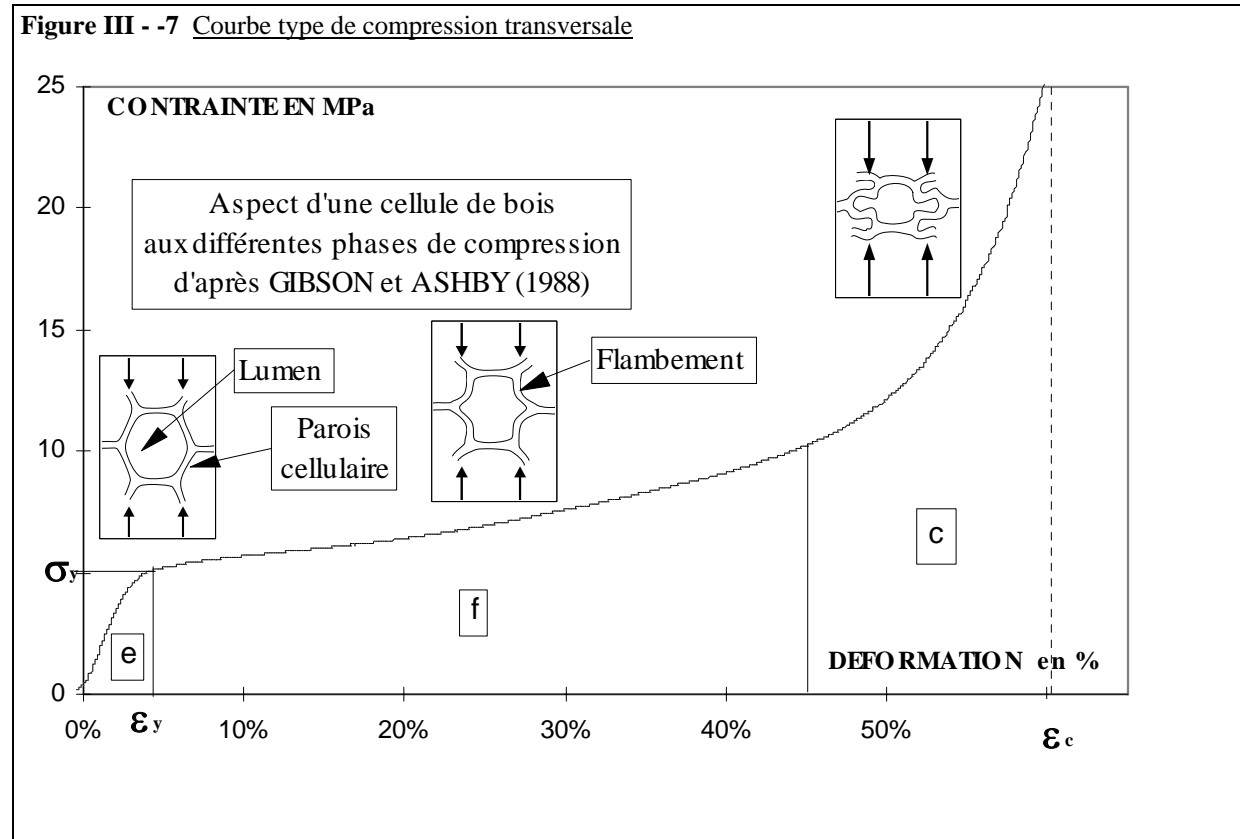
SEICHEPINE (1984) démontre les inconvénients de l'utilisation d'une rotule à l'aide d'un modèle simplifié constitué de deux ressorts de rigidité différente. Il utilise dans son dispositif d'essai un plateau supérieur fixe, qui se bloque une fois qu'il est correctement positionné par rapport à l'échantillon.

III - 2.2. Courbes types

Le comportement du bois lors d'un essai uniaxial de compression transversale se décompose en 3 phases (III - -6) :

- une phase élastique (e) sans dommage pour le matériau,
- une phase de flambement (f) pendant laquelle le lumen des cellules est écrasé,
- une phase de consolidation (c) qui correspond à l'écrasement progressif des parois des cellules.

La pente de la section élastique de la courbe nous donne une assez bonne approximation, suivant le protocole d'essai du module transverse E_r ou E_t . La longueur du plateau de flambement est en relation étroite avec la porosité du bois. Plus la porosité est forte (moins le bois est dense), plus le plateau est grand et inversement plus elle est faible (plus le bois est dense), plus le plateau est petit. Le taux de consolidation ϵ_c de la phase de densification est lui aussi, assez bien corrélé à la porosité (FRANÇOIS, 1992) et à la densité (la porosité est une fonction de la densité : $porosité = 1 - [densité\ anhydre/densité\ de\ la\ matière\ ligneuse]$) car elle exprime la déformation nécessaire à l'écrasement de toutes les cellules de l'éprouvette.



GRIL et NORIMOTO (1993) décrivent ces phénomènes et proposent une modélisation de la courbe de compression radiale basée sur de nombreux essais de LIU, NORIMOTO, MOROOKA (1993). Le modèle sépare la courbe en deux parties par rapport au premier coude défini par la contrainte σ_y et la déformation ϵ_y (III - -8). Dans la première partie la contrainte σ est une fonction linéaire de la déformation ϵ et du module de compression radiale E_r . Dans la seconde partie, intervient entre autre la densité spécifique de l'espèce ρ par rapport à la densité de la matière ligneuse ρ_s .

$$\epsilon < \epsilon_y$$

$$\sigma = \epsilon E_r$$

$$\epsilon > \epsilon_y$$

$$\sigma / \sigma_y = 1 + C \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_d - (\epsilon - \epsilon_y)} - 1 \right)$$

$$\text{où } \epsilon_d = 1 - K(\rho/\rho_s)$$

Où **C** caractérise l'allure de la courbe au premier coude, elle est influencée par la viscoélasticité des parois cellulaires,

et **K** caractérise les déformations latérales lors de l'essai. Il dépend des coefficients de poisson et de la densité.

Plusieurs auteurs ont essayé d'expliquer le comportement du bois en compression transverse, en l'assimilant soit à un composite multicouche TSAI et WU (1980 *in* FRANÇOIS, 1992), soit à un matériau cellulaire à structure en nid d'abeille GIBSON et ASHBY (1988). Ces deux modèles ont permis de comprendre les mécanismes de flambement et de ruptures cellulaires et macrocellulaires. Il est cependant très difficile de tenir compte :

- de la forte hétérogénéité du matériau qui, à tous les niveaux de sa structure (rayons ligneux, bande de parenchyme, distribution des vaisseaux, épaisseur des couches S1, S2 et S3, Structure semicristalline...), présente une importante anisotropie,
- de la forte variabilité intraspécifique et interspécifique du bois dont le seul critère de densité ne peut à lui seul rendre compte.

III - 2.3. Influence de la densité, de la température et de l'humidité

Influence de la densité

LIU, NORIMOTO, MOROOKA (1993) ont fait un travail très complet sur la compression radiale uniaxiale. Ils proposent un ajustement du comportement du module radial E_r et de la contrainte au premier coude σ_y en fonction de la densité. Le modèle est basé sur de nombreux essais réalisés sur 14 espèces dont la densité anhydre varie de .0,1 à 1,3. A 20°C et pour des éprouvettes à 12 % d'humidité. Les ajustements sont les suivants :

$$E_r \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 12150\rho_o^2 - A\rho_o + B$$

$$\sigma_y \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 488 \rho_o^2 - C\rho_o + D$$

où ρ_o est la densité anhydre et A, B, C et D sont des constantes.

FRANCOIS (1992) a fait le même type d'ajustement sur une dizaine d'essences dont la densité à 12 % est comprise entre 0,1 et 0,6. Il propose aussi une relation du type parabolique entre la contrainte au premier coude σ_y et la densité :

$$\sigma_y \text{ (MPa)} = 48.9 \rho^2 - 2,6\rho$$

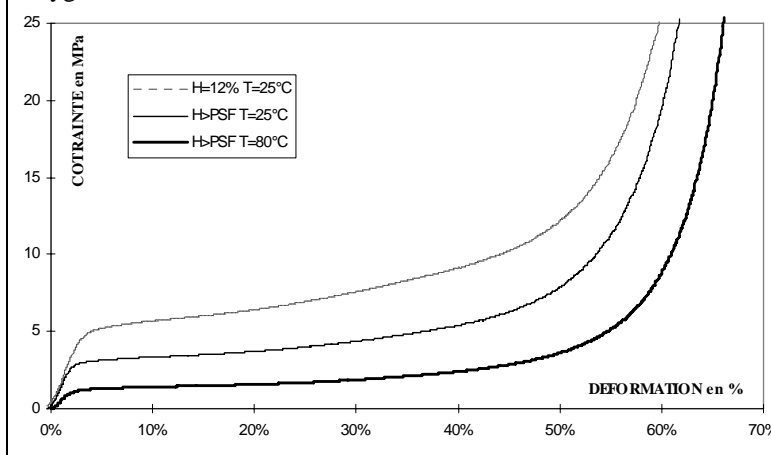
où ρ est la densité à 12 % d'humidité.

Ce résultat est très proche du précédent sachant que 1 MPa = 9,81 kg/cm².

Influence de l'humidité et de la température

Comme sur la plupart de propriétés mécaniques, l'eau et la chaleur ont le même type d'effet sur la

Figure III - -9 Compression tangentielle jusqu'à consolidation d'un échantillon de Simarouba à 3 conditions de température et d'hygrométrie différentes.



compression radiale du bois. Elles le rendent à la fois plus complaisant et plus déformable. Les essais de LIU, NORIMOTO, MOROOKA (1993) leur permettent de remarquer une décroissance importante de la contrainte au premier coude σ_y et du module E_r . Les coefficients de proportionnalité entre les essais à 12 % d'humidité, les essais sur du bois humide à 20°C et les essais sur du bois humide à 100°C, sont de 10:6:2 pour σ_y et de 10:5:1 pour E_r .

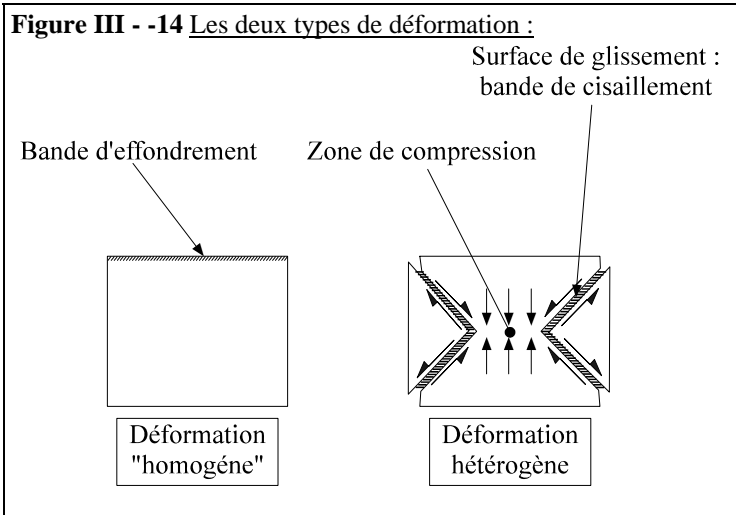
Nous avons réalisé des essais de compression tangentielle sur des échantillons de Simarouba (*Simarouba amara*), dont les dimensions étaient 24T x 40R x 40L mm³ et la densité à

12 % de 0,41, dans trois conditions différentes : à 12 % d'humidité à 25°C (A), saturé à 25°C (B) et saturé à 80°C (C). Les coefficients de proportionnalité entre ces 3 essais sont respectivement (A:B:C) : 10:3,3:1,6 pour E_{te} et 10:5,3:2,3 pour σ_y (Figure III - -10).

III - 2.4. Paramètres mesurés

Avant-propos Le but du protocole est d'évaluer l'influence de la température sur les 3 types d'essais mécaniques réalisés. Nous ne cherchons pas à donner les grandeurs physiques exactes caractérisant les bois utilisés (comme les modules transverses par exemple), les essais réalisés ne sont ni normalisés ni conventionnels pour déterminer ces grandeurs. De plus, ils font souvent apparaître des concentrations de contraintes difficilement estimables. Toutefois, dans la mesure du possible, dans un souci d'homogénéité et afin de pondérer les valeurs mesurées, nous avons ramené nos variables décrivant les essais, à des valeurs équivalentes aux grandeurs techniques classiques.

GIBSON et ASHBY (1988) définissent deux types de déformation suite à une compression. Une déformation homogène diffuse sur tout le volume de l'éprouvette et une déformation non linéaire qui provoque l'apparition de plan de contraintes préférentielles (bandes de cisaillement). Une déformation homogène est cependant beaucoup plus difficile à réaliser expérimentalement et, dans nos essais de compression radiale, nos éprouvettes étant trop élancées, nous l'avons rarement observé. Le comportement des essences les moins denses utilisées se rapproche d'une déformation homogène et la courbe contrainte déformation est proche de la courbe type (III - -11). Toutefois, l'apparition fréquente d'une petite bande d'effondrement proche d'un des deux mors provoque sur la courbe une petite baisse de contrainte. Pour les essences plus denses, l'apparition de bandes de cisaillement entraîne une rupture de l'éprouvette, souvent avant le début du palier de flambement mais parfois après ce palier, comme c'est le cas pour le Boco (III - -12). La déformation hétérogène du bois est souvent comparée aux déformations observées en mécanique des sols, qui font intervenir des surfaces à fortes discontinuités cinématiques : « les surfaces de glissement » (FRANCOIS 1992). Une représentation schématique des deux types de déformation observés est donnée par la Figure III - -13.



Remarque : La rupture en cisaillement est de moins en moins visible quand la température augmente, le matériau étant plus déformable. La rupture est très peu marquée chez certaines espèces, comme le Bois rouge et le Saint-Martin jaune. Ce dernier possède des bandes assez larges de parenchyme tangentiel qui supportent sans doute des déformations plus élevées que les fibres.

Les « descripteurs » de l'essai de compression que nous avons retenus sont les suivants :

- Le premier correspond à la pente de la partie élastique. Il est ramené à un module équivalent, appelons-le E_{re} , il est défini par la formule $E_{re} = \sigma_1 / \epsilon_1$ où σ_1 est l'incrément

de contrainte en MPa de la partie élastique de la courbe et ϵ_1 est l'incrément de déformation élastique correspondante.

- Dans le cas d'une déformation homogène, nous avons défini une contrainte au premier coude de la courbe σ_y et ϵ_y la déformation en ce point (Figure III - -15). Le point (ϵ_y, σ_y) est déterminé comme suit : la contrainte σ_y est l'ordonnée du point d'intersection de la pente élastique et de la pente du plateau de flambement F. La déformation ϵ_y est la valeur de la déformation pour la contrainte σ_y sur la courbe de compression (ϵ, σ) .

Dans le cas d'une déformation hétérogène, nous avons remplacé la contrainte au premier coude et la déformation au premier coude, par la contrainte à la rupture σ_r et la déformation correspondante ϵ_r . Dans tous les cas, nous avons calculé les aires sous la courbe S_1 , S_2 et S_3 correspondant respectivement à 6,67%, 13,33% et 20% de déformation, soit un déplacement de 2, 4 et 6 mm. Nous définissons alors l'**énergie de compression**

$W_{\epsilon\%}$ à 6,67%, 13,33% et à 20% de déformation, correspondant à une énergie par unité de volume et défini par la formule suivante :

$$W_{\epsilon\%} = \frac{S_{\epsilon\%}}{V} = \frac{1}{V} \int_0^{\delta_x} F d\delta \quad \text{en kJ/m}^3$$

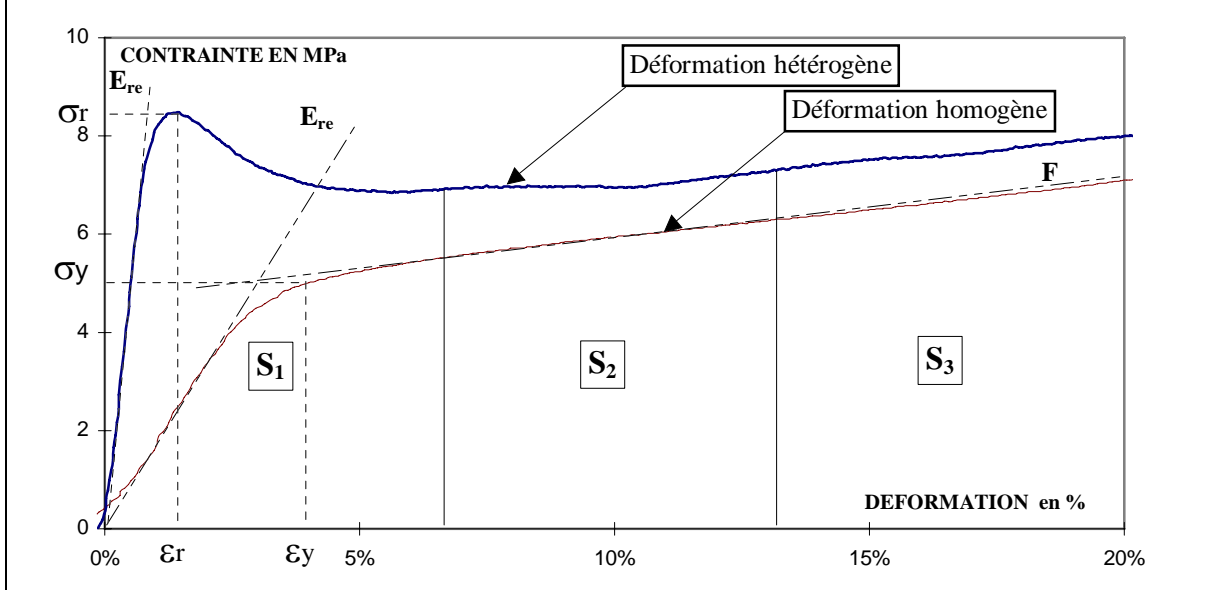
où δ est déplacement en m,

δ_x le déplacement à 2, 4 ou 6 10^{-3} m,

F la force en N.

V le volume initial de l'éprouvette en m^3 .

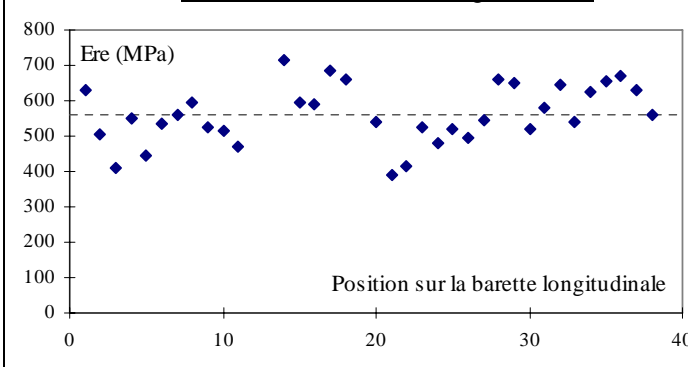
Figure III - -16 Paramètres descripteurs des courbes de compression



III - 2.5. Répétabilité et variabilité des essais

Répétabilité

Figure III - -17 Evolution de E_{re} en fonction de sa position sur la barrette de débits longitudinaux.



Sur une éprouvette d'Angélique, nous avons réalisé une série de 20 répétitions de compression dans le domaine élastique. Entre chaque essai, l'échantillon était repositionné pour être plus proche des conditions réelles de l'essai. Le rapport : écart-type/moyenne de la pente mesurée, nous donne un critère de répétabilité égal à 5 %. Une estimation de l'erreur sur la mesure de la pente élastique est alors de +/- 5 % de la valeur mesurée.

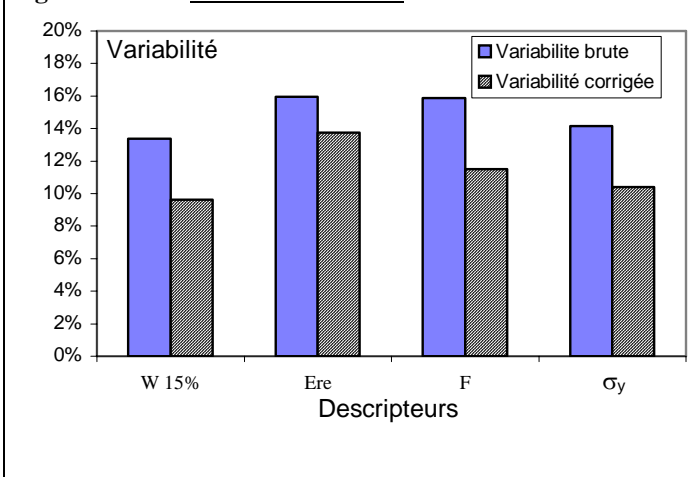
Variabilité

Nous avons effectué 40 essais de compression tangentielle sur 40 éprouvettes

$$\text{Variabilité corrigée en \%} = \frac{\text{écart - type} \left(\frac{\text{descripteur}}{\text{infradensité}^2} \right)}{\text{moyenne} \left(\frac{\text{descripteur}}{\text{infradensité}^2} \right)}$$

cubiques de 40 mm de coté de Bagasse (*Bagassa guianensis*), débitées les unes à la suite des autres sur une même barrette longitudinale (figure III - -19). Un critère de variabilité : $V = \text{écart-type} / \text{moyenne}$ est calculé pour chacun des descripteurs de l'essai (III - -2). L'influence de la fluctuation de la densité sur la variabilité est normalisée en divisant la valeur du descripteur mesuré sur chaque essai par l'infradensité au carré de l'éprouvette concernée (les résultats de la littérature montrent que les grandeurs techniques de l'essai de compression transverse évoluent plutôt comme le carré de la densité, (FRANCOIS, 1992)) :

Figure III - -18 Essais de variabilité



Au vu de ces résultats, plusieurs points sont à noter :

- la variabilité atteint 16 % de la valeur mesurée,
- l'infradensité, qui varie de 4 % par rapport à sa valeur moyenne, n'explique au mieux que 30 % de la variabilité totale,

- la variabilité de la pente (permettant de calculer E_{re}) est la plus élevée et la moins bien corrigée par la densité. Ce résultat que l'on retrouve sur l'ensemble des résultats expérimentaux et qui est confirmé par l'important pourcentage d'erreur des tests de répétabilité, peut avoir plusieurs raisons. Il peut être dû soit à un mauvais centrage de l'éprouvette qui provoque un écrasement en biais, soit à un « parasitage » du dispositif expérimental.

III - 2.6. Essais de compression Tangentielle

En suivant le même protocole que celui des essais de compression radiale, nous avons fait pour chaque essence, 3 essais de compression tangentielle à 30°C. Les Figure III - -20 et Figure III - -21 représentent les 3 essais bruts de compression tangentielle, accompagnés de leurs équivalents radiaux.

Remarques sur l'essai tangential

a - La rupture en cisaillement n'est visible que pour les trois essences les plus denses. Dans l'ensemble, la déformation en compression tangentielle est plus homogène que la déformation radiale. L'éprouvette fait moins le « tonneau » ou plus précisément le coefficient de poisson ν_{RT} (contrainte radiale, élongation tangentielle) est plus grand que le coefficient de poisson ν_{TR} (contrainte tangentielle, élongation radiale). GUITARD (1987) propose d'ailleurs pour un feuillu moyen un $\nu_{RT} = 0,67$ et un $\nu_{TR} = 0,38$. Les deux dernières remarques nous laissent supposer que ce sont les rayons ligneux qui, orientés radialement, entraînent un comportement différent et une rigidité supérieure en compression radiale.

b - Plus la densité est élevée plus les courbes de compression radiale et tangentielle sont proches.

c - Pour la plupart des essences, la pente élastique est plus faible en compression tangentielle qu'en compression radiale (pour le Wacapou et pour l'Ebène verte, les pentes radiales et tangentielles sont quasiment égales).

d - L'anisotropie E_{te}/E_{re} est d'autant plus forte que la densité est faible.

e - Les courbes des propriétés mécaniques en fonction de l'infradensité des différentes essences, sont assez proches en compression radiale et en compression tangentielle. Toutefois si l'on fait une régression linéaire sur ces courbes (propriétés mécaniques = $f(ID)$), la pente de la droite de régression est toujours plus grande pour les essais de compression tangentielle.

f - Certaines essences comme le Yayamadou marécage ou le Moutende Kouali ont une courbe de compression tangentielle beaucoup plus faible que la courbe de compression radiale. Pour tenter d'expliquer ce phénomène, il semblerait intéressant de quantifier soit en volume, soit en quantité de matière ligneuse la proportion de rayons ligneux par rapport à l'ensemble des autres tissus.

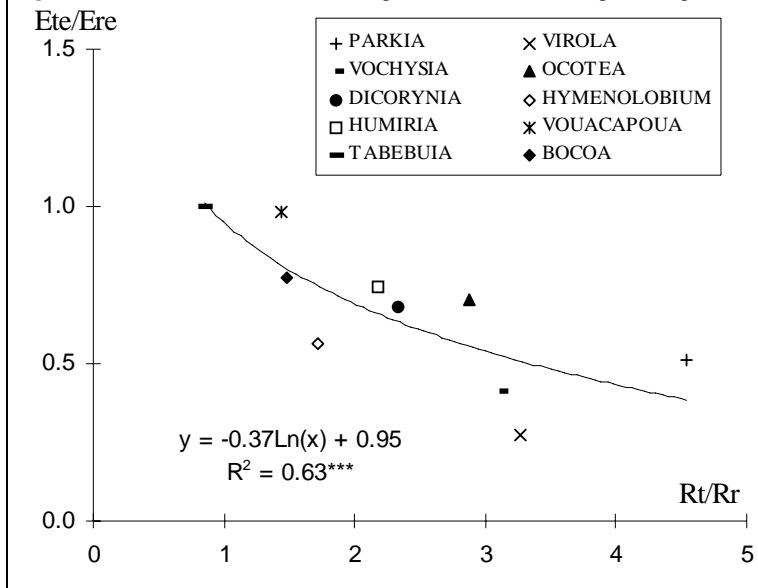
Comparaison entre l'anisotropie élastique E_{te}/E_{re} et l'anisotropie du retrait R_t/R_r tableau III - -1

Tableau III - -1 Valeur de l'anisotropie élastique et l'anisotropie des retraits entre 30 et 12% d'humidité.

Essences	ID	R_t/R_r	E_{te}/E_{re}
Parkia	0.20	4.54	0.51
Virola	0.35	3.27	0.27
Vochysia	0.50	3.12	0.42
Ocotea	0.58	2.87	0.70
Humiria	0.60	2.18	0.75
Dicorynia	0.62	2.34	0.68
Hymenolobium	0.66	1.72	0.56
Vouacapoua	0.79	1.45	0.98
Tabebuia	0.90	0.85	1.00
Bocoa	0.91	1.48	0.77

On observe une assez bonne corrélation entre l'anisotropie des modules équivalents E_{te}/E_{re} et l'anisotropie du retrait R_t/R_r (Figure III - -22). L'anisotropie du retrait est aussi corrélée avec l'anisotropie des autres descripteurs de l'essai : énergies de compression, contrainte au premier coude. D'après le nuage de points, il est possible d'ajuster une courbe de tendance dont l'équation est une fonction logarithme et de tirer la conclusion suivante : plus la rigidité radiale est grande par rapport à la rigidité tangentielle, plus l'anisotropie du retrait est forte et, ceci est d'autant plus vrai que la densité est faible.

Figure III - -23 Relation entre l'anisotropie du retrait et l'anisotropie élastique

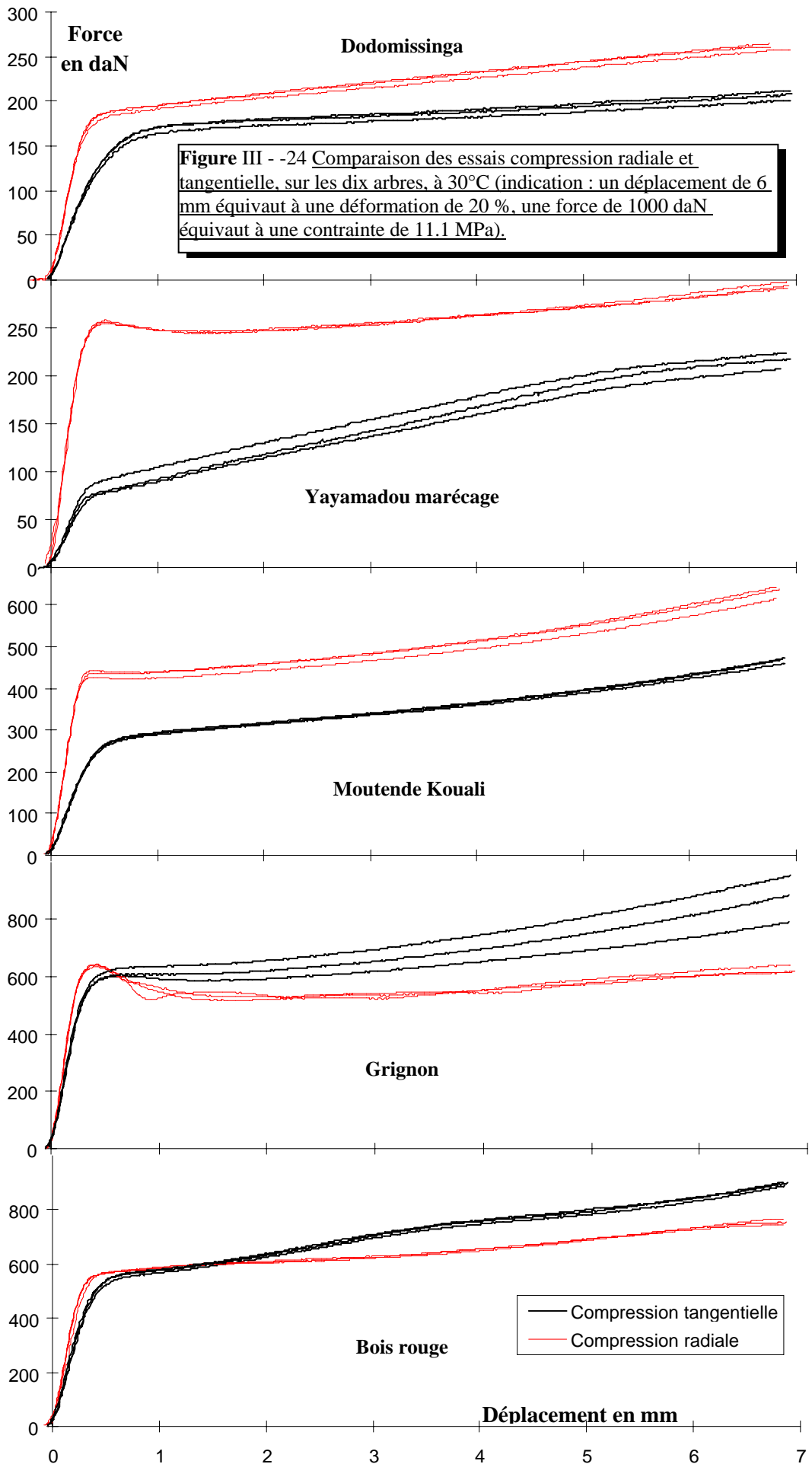


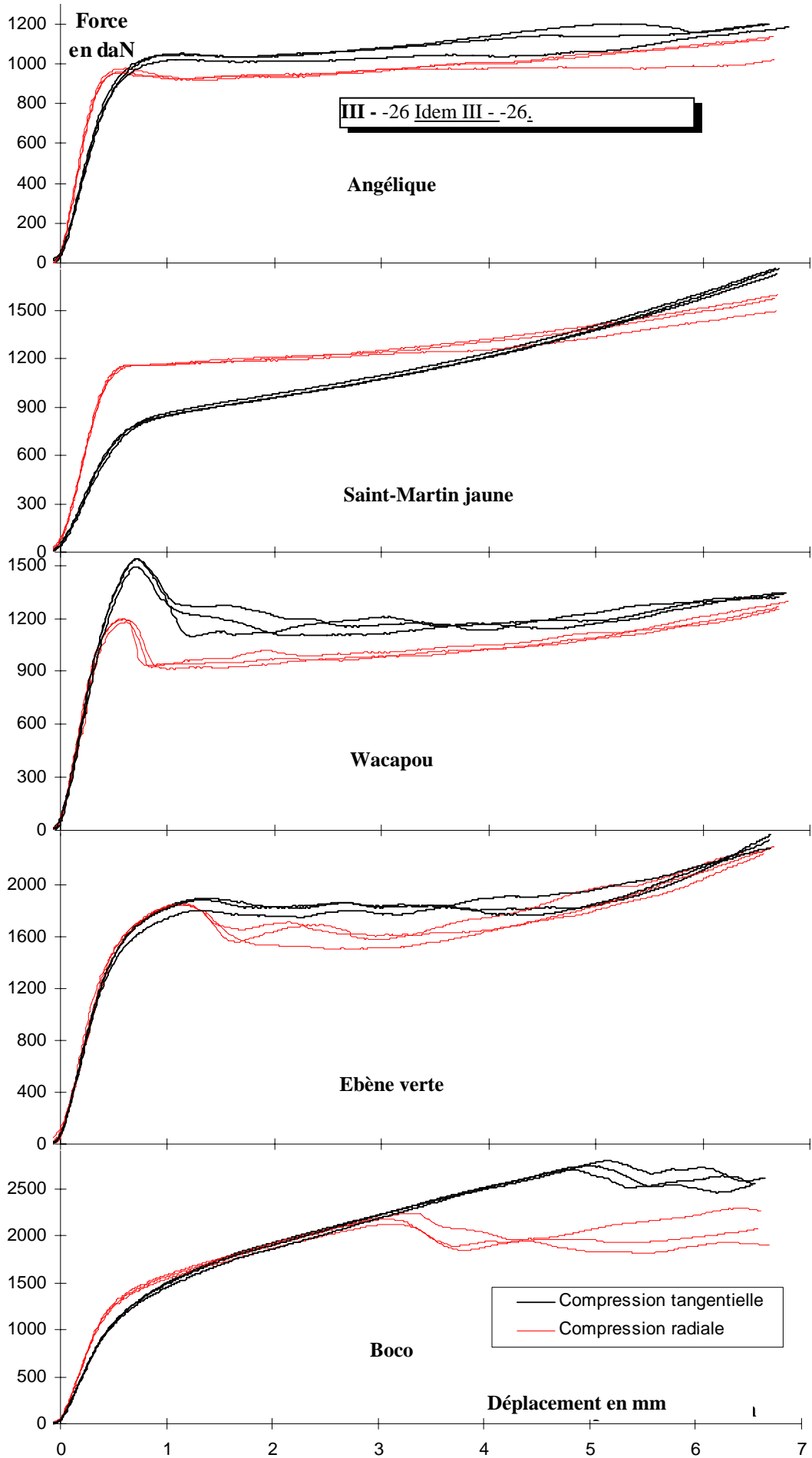
sèche, saison humide), sont a priori plus homogènes que les bois tempérés. Ils n'ont pas de bois initial, pas de bois final, pas de zone initiale poreuse. Dans cette structure anatomique homogène, en nid d'abeille, les rayons ligneux des essences de faible densité peuvent être suffisamment rigides pour jouer un rôle non négligeable dans la rigidité radiale. Quant aux essences ayant des densités plus forte la rigidité transversale des fibres, dont les parois sont plus épaisses et le diamètre plus petit, est sans doute dominante par rapport à la rigidité apportée par les rayons ligneux. Dans nos manipulations, il nous semble **le pourcentage de rayons ligneux**, surtout pour les essences les moins denses, peut être le facteur prédominant de l'anisotropie du retrait. Cependant, il est sans doute vraisemblable que chaque essence a un comportement spécifique et que l'anisotropie, aussi bien des variations dimensionnelles que des propriétés mécaniques, ne peut-être expliquée par un seul critère.

Sans vouloir alimenter les nombreuses controverses qui règnent sur l'anisotropie du retrait, rappelons les 3 théories principales qui permettent de comprendre l'hygroexpansion différentielle entre la direction radiale et tangentielle (SKAAR 1988).

- 1- Une différence de macrostructure radiale et tangentielle, présence de rayons ligneux, alternance de couches tangentielles de bois initial et de bois final pour les bois tempérés.
- 2 - Une différence d'orientation des microfibrilles de la couche S_2 entre les parois radiales et tangentielles.
- 3 - Une différence de lignification entre la paroi radiale et tangentielle.

Les bois guyanais à croissance dite continue (bien qu'elle soit tout de même rythmée par les alternances saison





III - 3. Essai de cisaillement radial

L'essai de cisaillement est un essai délicat. La meilleure façon d'estimer les grandeurs techniques de cisaillement est souvent un essai indirect de torsion ou de traction diagonale. Toutefois la méthode du cube unique proposée par SEICHEPINE 1980, apporte certainement une bonne approximation des modules de cisaillement.

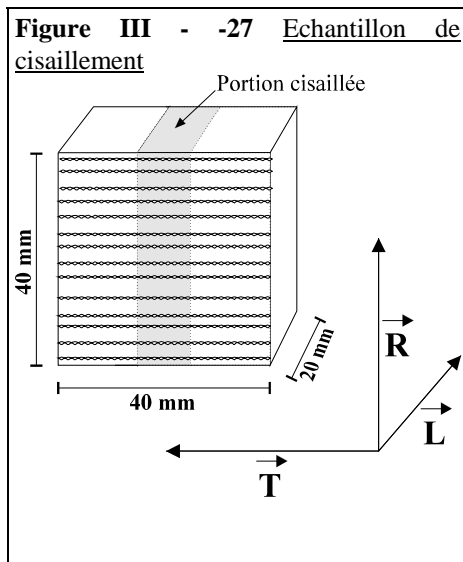
Au-delà de la limite élastique en cisaillement, le comportement du bois est mal connu. Les essais normalisés NF B 51 012 de type massicotage (l'effort de cisaillement ne s'exerce que sur un seul plan : le plan de cisaillement) apportent peu d'information à ce sujet, la rupture étant très proche de la limite élastique.

Notre essai de cisaillement est un essai original mis au point à partir d'une idée de B. THIBAUT. Il permet une assez bonne approche du cisaillement du plan radial-tangentiel à des déformations élevées.

III - 3.1. Description du dispositif

Les essais de cisaillement ont été faits sur des éprouvettes de $20L \times 40R \times 40T \text{ mm}^3$ (Figure III - -28). Le bâti d'essai est le même que celui des essais de compression, le capteur de force est de 500 daN.

Le dispositif spécifique de cisaillement se compose de deux pièces en dural équipées chacune de deux mâchoires dentées en inox bloquant l'échantillon en place.



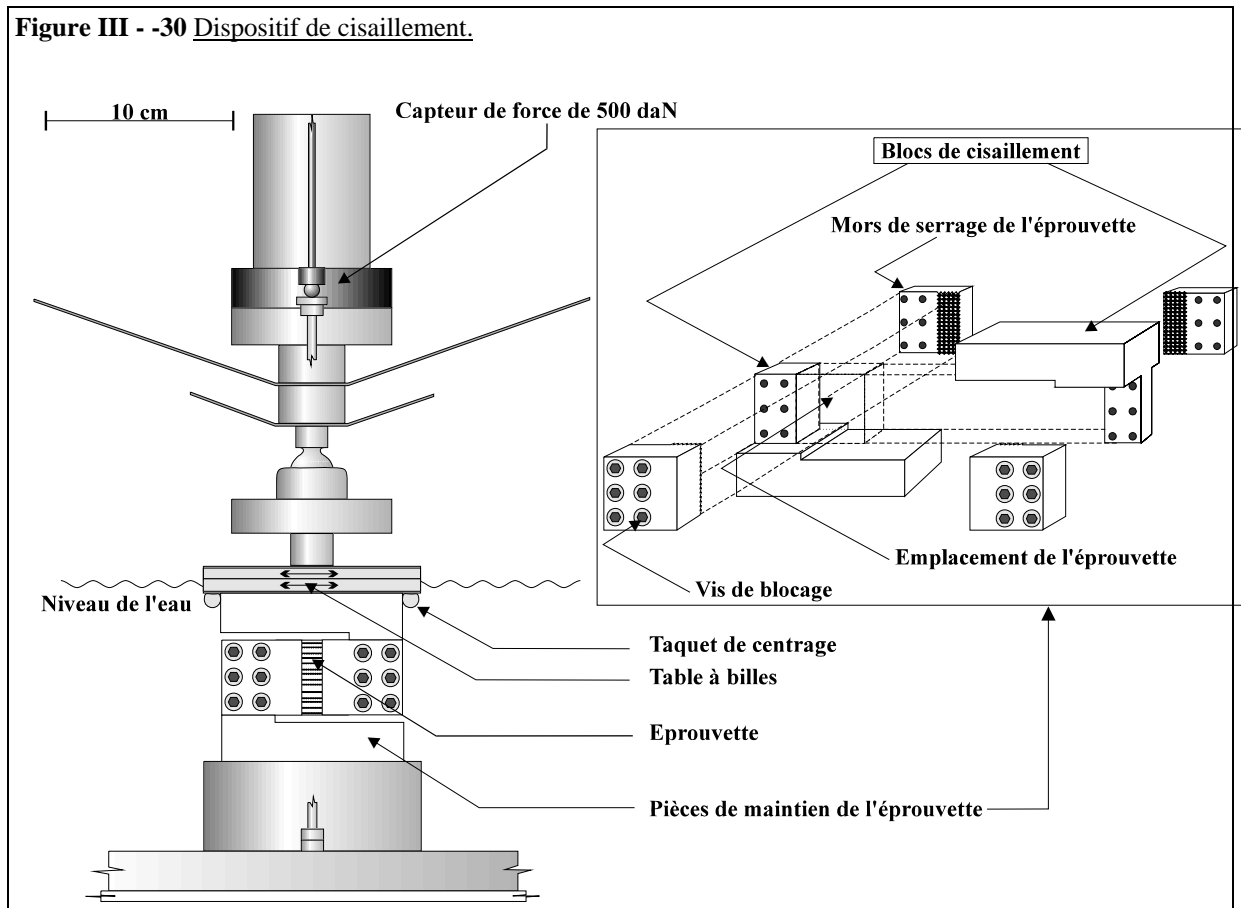
L'éprouvette est donc maintenue entre un mors supérieur et un mors inférieur (Figure III - -29). Lors du montage de l'éprouvette, le dispositif est calé sur un socle en dural. Ainsi la portion cisailée a une largeur constante de 10 mm dans la direction tangentielle. Le volume cisailé est donc de $10T \times 20L \times 40R \text{ mm}^3$. Le jeu entre la mâchoire supérieure et la mâchoire inférieure est de 5 mm. Le cisaillement maximum possible du dispositif est donc de $\text{ArcTan}(5/10) = 26,6^\circ$. Dans nos essais, nous nous sommes limités à un déplacement de 3 mm, soit un angle de cisaillement maximum de $16,7^\circ$.

Une table à bille centrée sur la pièce supérieure de cisaillement permet une certaine liberté de mouvement dans la direction tangentielle lors de l'essai. L'ensemble du poids de la table à bille et du bloc supérieur (en prenant en compte la poussée d'Archimède des pièces immergées), entraîne une précontrainte d'environ 1,2 daN.

La vitesse d'essai est de 0,3 mm/mn soit **500 microdéformations par seconde**. La durée d'essai est d'environ 10 mn. Les efforts mesurés varient de 100 à 500 daN entre l'essence la moins dense et l'essence la plus dense.

Dans notre essai, la direction de l'effort est radiale, le plan de cisaillement est radial-longitudinal et le parallélogramme cisailé est radial-tangentiel.

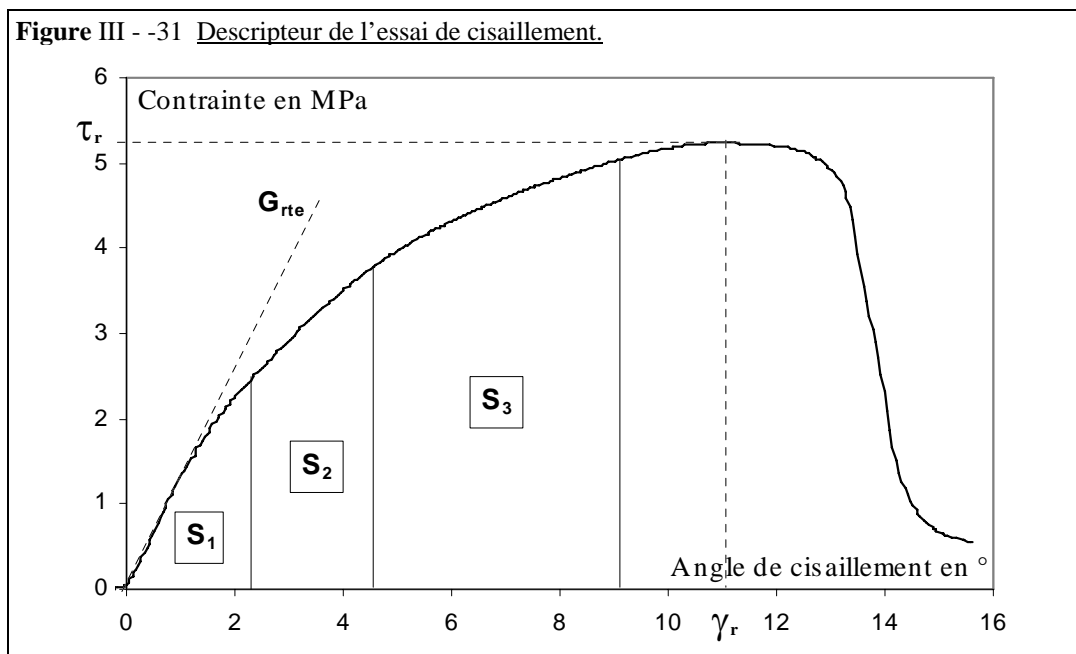
Figure III - -30 Dispositif de cisaillement.



III - 3.2. Courbes types et paramètres mesurés

De même que l'essai de compression, cet essai de cisaillement n'est pas conçu pour mesurer les véritables grandeurs techniques élastiques caractérisant les bois utilisés, mais plutôt pour analyser l'évolution avec la température de certaines grandeurs mécaniques propres à l'essai. Les essais plus appropriés pour mesurer les grandeurs techniques se font sur des échantillons libres, placés sur des mâchoires lubrifiées. Le cisaillement est alors estimé directement sur les faces libres du cube grâce, soit à des jauges, soit à des capteurs extensométriques amovibles (EL AMRI 1987). Ce type d'essai n'est pas réalisable à température élevée, ni pour des fortes déformations.

Figure III - -31 Descripteur de l'essai de cisaillement.



Cependant pour les mêmes raisons que pour l'essai de compression, nous avons ramené la pente élastique de la courbe d'essais à un équivalent module G_{re} :

$$G_{re} = \tau / \gamma$$

où γ est l'angle de cisaillement en radian et τ est la contrainte à la limite élastique,

$$\tau \text{ (MPa)} = \text{Force en N} / (\text{section cisailée en mm}^2 \approx 800 \text{ mm}^2)$$

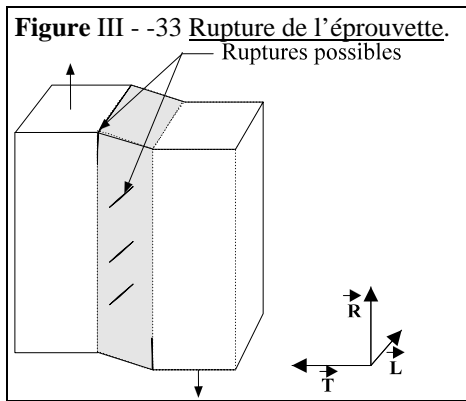
Les autres descripteurs de l'essai (Figure III - -32) sont :

- 3 énergies par unité de volume cisailé W_{γ° pour des déplacements lors de l'essai de 0.4, 0.8 et 1.6 mm, soit des angles de cisaillement de **2.3, 4.6, 9.1** degrés, calculées comme suit,

$$W_{\gamma^\circ} = \frac{S_{\gamma^\circ}}{V} = \frac{1}{V} \int_0^{\delta_x} F d\delta \quad \text{en kJ/m}^3$$

- où δ est déplacement en m,
- δ_x le déplacement à 0.4, 0.8 ou 1.6 10^{-3} m,
- F la force en N,
- V le volume de la portion cisailée en m^3 ,

- la contrainte à la rupture τ_r en MPa et l'angle de cisaillement à la rupture γ_r en degrés.



La rupture de l'éprouvette se produit pour des déformations assez fortes. Les fentes de rupture sont situées soit le long des mors soit au milieu de l'éprouvette, orientées à 45° par rapport à la direction de l'effort (Figure III - -34).

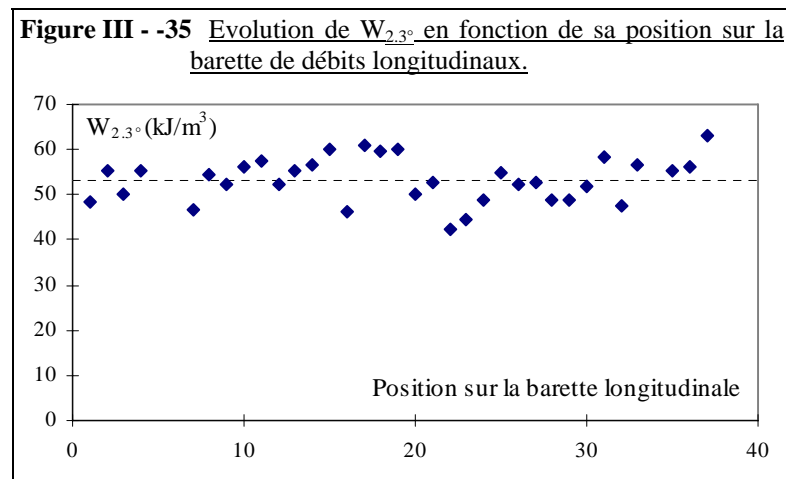
Quelles sont les causes de la rupture : limite de la résistance à la traction, à la fissuration, au cisaillement ? Quelle est l'influence de la table à bille ? Cette influence est-elle répétable d'un essai sur l'autre ?

III - 3.3. Variabilité et répétabilité des

essais

Répétabilité

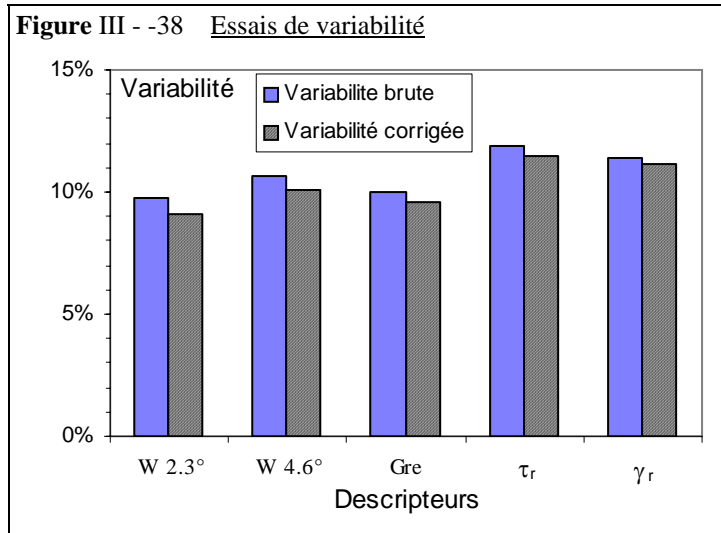
Sur une éprouvette d'Ebène verte, nous avons réalisé une série de 20 répétitions de cisaillement RT dans le domaine élastique. Le rapport : écart-type/moyenne de la pente mesurée, nous donne un critère de répétabilité égale à 4,5 %. Une estimation de l'erreur sur la mesure de la pente élastique est alors de +/- 4,5 % la valeur mesurée.



Variabilité

De même que pour les essais de compression, nous avons effectué 36 essais de cisaillement RT sur 36 éprouvettes de Bagasse, débitées à partir d'une même barette longitudinale (figure III - -36). Le même critère de variabilité : $V = \text{écart-type} / \text{moyenne}$ est calculé pour chacun des descripteurs de l'essai. L'influence de la fluctuation de la densité sur la variabilité est normalisée en divisant la valeur du descripteur mesuré sur chaque essai par l'**infradensité** de l'éprouvette

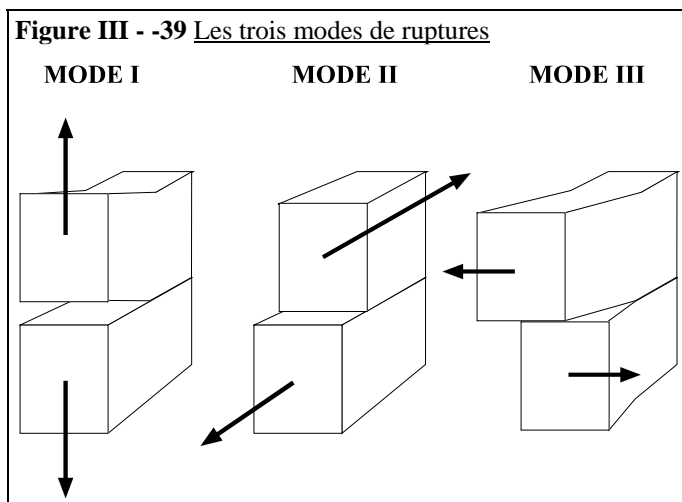
concernée (Figure III - -37)



La variabilité des descripteurs de l'essai de cisaillement est de l'ordre de 10 %, sauf pour la contrainte et l'angle de cisaillement à la rupture où elle est d'environ 12 %.

L'infradensité qui varie de 4.5 % par rapport à sa valeur moyenne, n'a pas un rôle très important sur la variabilité de l'essai, puisqu'elle explique au mieux 7 % de celle-ci.

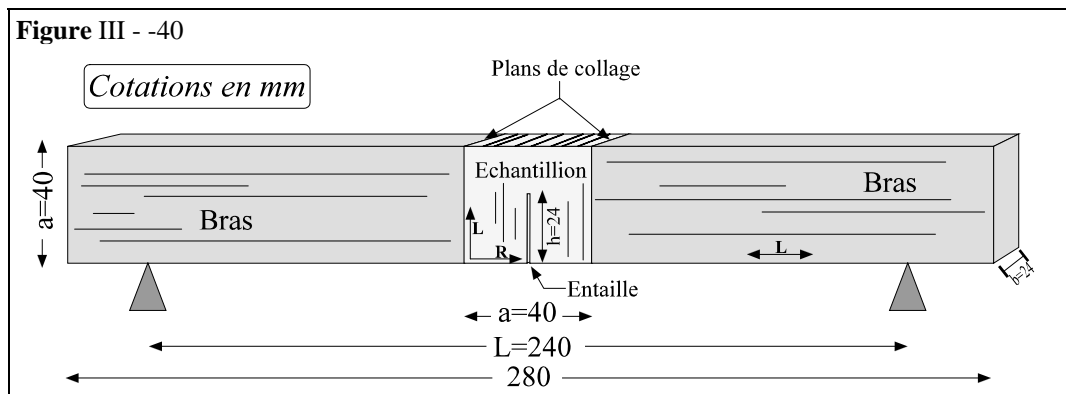
III - 4. Essai de ténacité ou de propagation de fissure



L'essai de ténacité, défini par GUSTAFSSON (1990), est un essai de flexion 3 points sur une éprouvette pré-entailée. L'éprouvette d'essai est du type **SENB** (Single Edge Notched specimen in Bending). La fissure se propage en **Mode I**. Rappelons que la mécanique de la rupture définit trois modes de fissuration élémentaires : le mode I où la fissure est ouverte, le mode II où la fissure est cisailée longitudinalement et le mode III où la fissure est cisailée transversalement (figure). Le plan de l'entaille (i,j) est orienté **TL**.

III - 4.1. Description du dispositif

L'éprouvette d'essai, dont les dimensions sont proportionnelles à celles préconisées par LARSEN et GUSTAFSSON (1991) se compose de trois parties. Une partie centrale qui est l'échantillon à tester et deux bras latéraux qui donnent à l'éprouvette une



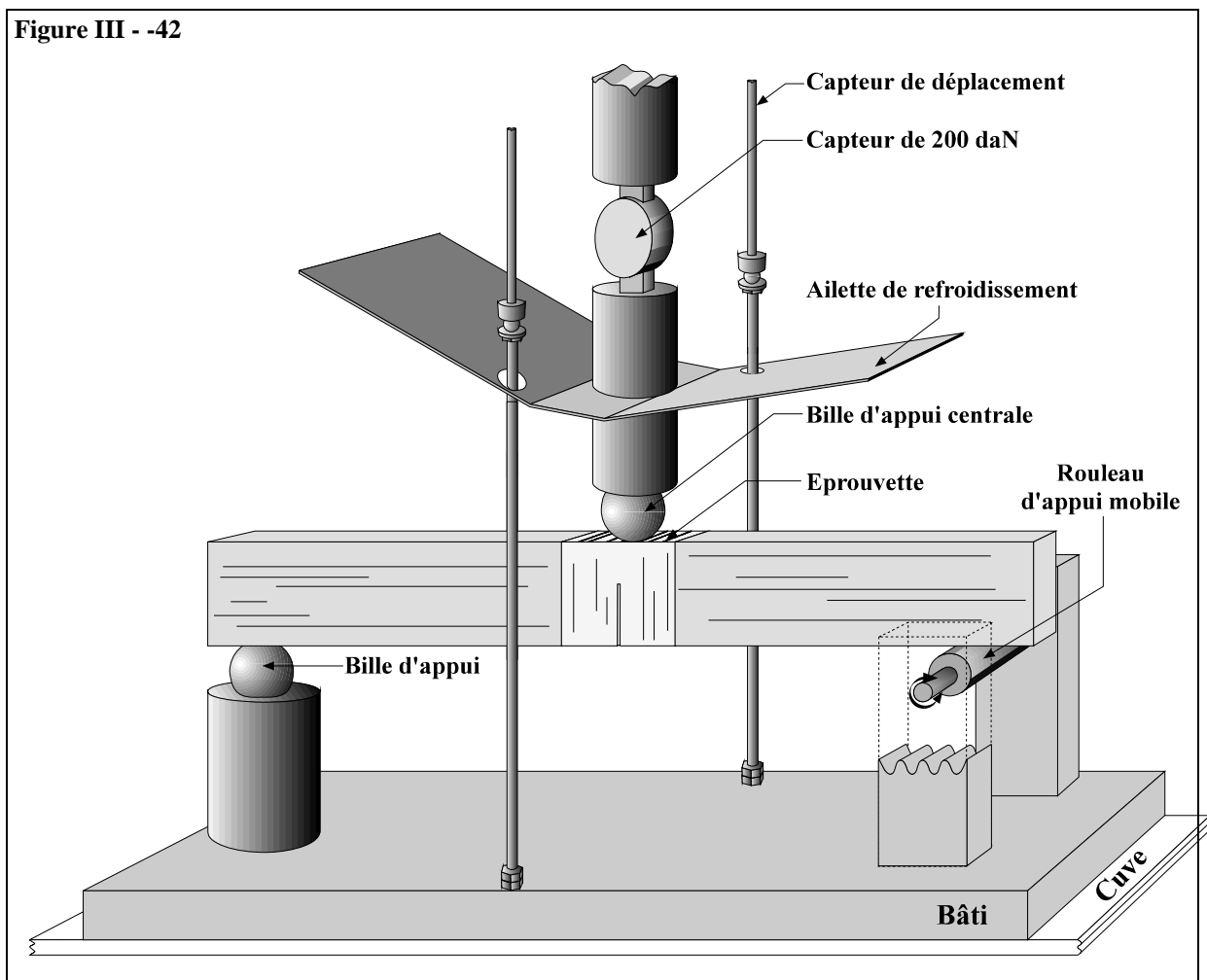
dimension suffisante pour réaliser un essai 3 points. Les trois parties qui sont maintenues à l'état vert sont collées avec une colle spéciale catalysée par l'eau de type MDI (diphényl Méthane-4,4 Diisocyanate). Les bras doivent avoir un module longitudinal et des modules transversaux suffisamment grands pour éviter de perturber l'essai en flexion et en poinçonnement sur les appuis. Ils sont en Coeur dehors (*Diplotropis purpurea*), leur densité moyenne à 12 % d'humidité est de 0,95 et leurs dimensions sont de 24T x 40R x 120L mm³.

Les dimensions de l'échantillon central sont de 24T x 40R x 40L mm³, une entaille centrale de 24 mm de long et de 1 mm de large est faite à la scie à ruban dans le plan TL. Les directions des plans de collage sont TL pour l'échantillon et RT pour les bras (Figure III - -41).

Le dispositif de flexion est différent des dispositifs précédents. Il se compose de deux points d'appuis distants de 24 cm. L'un des appuis est une bille en acier de 25 mm de diamètre et l'autre est un rouleau en dural de 15 mm de diamètre. Ce système permet de corriger les éventuels défauts de parallélisme entre les bras et l'éprouvette. La force est appliquée au centre de l'éprouvette par une bille en acier de 25 mm de diamètre (Figure III - -43). Le capteur utilisé est le capteur de 200 daN. Le déplacement du plateau est mesuré par les capteurs LVDT de la même manière que pour les autres essais.

Lors de l'essai, la vitesse de montée de la traverse est de 0,3 mm/mn. A température ambiante la rupture intervient dans les 3 mn. A partir de 3 mm de déplacement (la rupture a lieu entre 1 et 2 mm suivant la

Figure III - -42



température), la vitesse augmente à 2 mm/mn. Nous n'avons que très rarement observé une rupture totale des deux parties de l'éprouvette, ceci pour deux raisons :

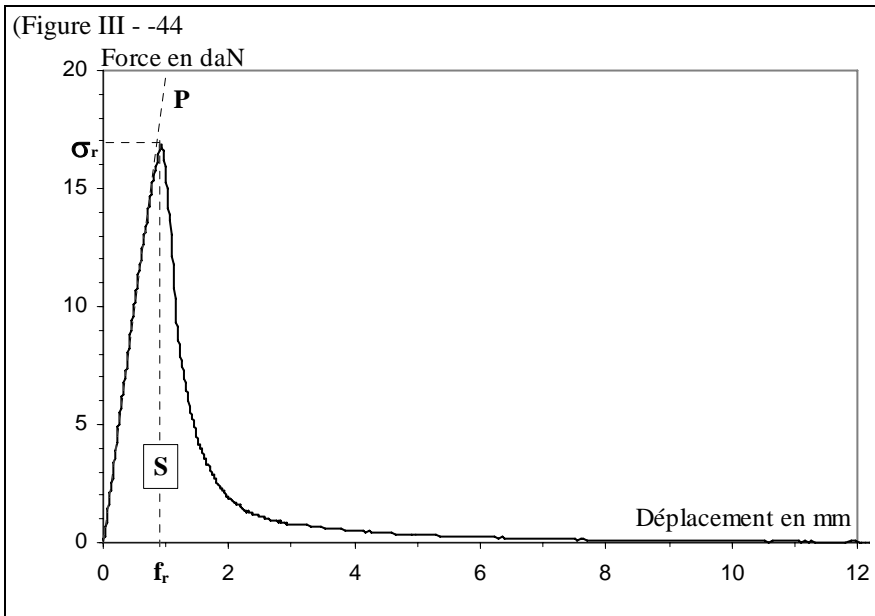
- dans le milieu hygrothermique de l'essai, le ligament qui retient les deux parties de l'éprouvette ensemble est beaucoup plus souple et déformable,
- dans un essai « normal » (à l'air), c'est le poids propre de l'éprouvette qui provoque la séparation des deux morceaux de l'éprouvette, dans notre cas, au poids propre de l'éprouvette s'oppose la poussée d'Archimède, la force appliquée sur le ligament est donc très faible par rapport à sa « déformabilité ».

Fort de ces remarques, nous avons arrêté l'essai lorsque la force mesurée pour le point $n(x,y)$ où x est le déplacement et y la force, était égale à la force mesurée au point n-100. La fréquence d'acquisition est d'un couple de mesure par seconde. Selon l'essence et la température considérées, le déplacement mesuré lors de l'essai a varié de 10 mm à 20 mm.

Une fois l'éprouvette rompue, les deux éléments de l'échantillon testé sont séparés de leur bras respectif. Une partie permet de mesurer l'infradensité, l'autre partie est utilisée pour la mesure de l'angle du fil et pour l'estimation de la surface créée.

III - 4.2. Courbes types et paramètres mesurés

La courbe de rupture en mode I, peut être divisée en deux parties, l'une avant et l'autre après la rupture :



- dans la première partie élastique, la courbe est croissante et linéaire,
- dans la seconde partie, la courbe décroît de façon hyperbolique jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette (Figure III - -45).

Le critère classique de description de l'essai retenu par GUSTAFSSON (1990) est l'énergie de rupture $G_{f,I}$. Cette énergie correspond à la somme du travail réalisé par l'appui central et par le poids propre de l'éprouvette divisée par la surface rompue. Dans notre cas, il faut soustraire au poids propre de l'éprouvette la

poussée d'Archimède correspondant au volume d'eau déplacée par l'éprouvette :

$$G_{f,I} = \frac{1}{S} \left(\int_0^{\delta_x} F d\delta + Mg\delta_x - Vg \right) \text{ en J/m}^2$$

- où
- S est la surface rompue en m^2 ,
 - F est la force appliquée en N,
 - δ_x est la flèche jusqu'à rupture complète en m,
 - Mg est le poids de l'éprouvette en N
 - et Vg est la force exercée par le volume d'eau déplacée par l'éprouvette en N.

La valeur du terme : $Mg\delta_x - Vg$ étant négligeable par rapport à la valeur de $Fd\delta$, nous ne l'avons pas pris en compte dans le calcul.

Les autres critères que nous avons retenus pour décrire cet essai, sont la pente élastique, le déplacement et la contrainte à la rupture.

Le déplacement à la rupture est utilisé brut et assimilé à la flèche de l'éprouvette à la rupture $f_{r,I}$.

Par contre, comme pour les essais précédents la pente et la contrainte à la rupture sont ramenées à des grandeurs techniques équivalentes simplifiées.

La contrainte équivalente à la rupture $\sigma_{r,I}$ est calculée comme si il s'agissait d'une poutre simple ayant pour section le segment rompu $((a-h) \times b)$. On a alors :

$$\sigma_{r,I} = \frac{3FL}{2b(a-h)^2} \quad \text{en (MPa)}$$

où F est la force appliquée en N,
L est la largeur entre les deux appuis, $L \approx 240$ mm,
a est la hauteur de l'éprouvette, $a \approx 40$ mm,
h est la hauteur de la fente, $h \approx 24$ mm,
la longueur du ligament est $(a-h) \approx 16$ mm,
b est la largeur de l'éprouvette, $b \approx 24$ mm.

Afin de prendre en compte les dimensions spécifiques de chaque éprouvette [notamment de chaque ligament rompu $((a-h) \times b)$], nous avons transformé la pente à l'origine en un module équivalent $P_{f,I}$. $P_{f,I}$ est calculé comme s'il s'agissait d'un essai de flexion trois points (GUITARD, 1987) ayant pour section le segment rompu $((a-h) \times b)$:

$$P_{f,I} = \frac{F}{f} \frac{L^3}{4b(a-h)^3} / 10 \quad \text{en (MPa)}$$

où $\frac{F}{f}$ est la pente de la tangente à l'origine de la courbe d'essai en N/mm^2 .

Evidemment $P_{f,I}$ n'est pas une grandeur technique. Pour avoir une approximation de E_r il faudrait tenir compte : de la géométrie de l'éprouvette, de la concentration de contrainte au sommet de l'entaille et considérer séparément le rôle de chaque portion différente de l'éprouvette sur la déformation de celle-ci.

Les bras de l'éprouvette étant sollicités dans une direction perpendiculaire aux fibres, on peut considérer que leur rigidité est bien plus grande que celle de l'échantillon central sollicité dans une direction parallèle aux fibres. Dans le calcul de $P_{f,I}$ la déformation se rapporte à la longueur de l'éprouvette située entre les deux plots du dispositif d'essai. Or dans la réalité, seul l'échantillon central se déforme de façon significative et plus particulièrement la portion de bois correspondant au ligament crée par l'entaille. De la sorte, la valeur de $P_{f,I}$ réel est fortement sous estimé. C'est pourquoi, arbitrairement, la valeur du module calculé a été divisée par dix pour être du même ordre de grandeur que le module équivalent en compression, au moins pour l'essence la moins dense.

III - 4.3. Influence de quelques paramètres sur l'énergie de rupture $G_{f,I}$

Effet de la taille de l'éprouvette SENB sur $G_{f,I}$:

PERSSON, GUSTAFSSON et PETERSSON (1993) ont expérimenté trois types d'éprouvettes de tailles différentes (40 mm, 80 mm et 160 mm de haut, l'éprouvette est homothétique). Ils montrent à partir de leurs résultats expérimentaux et par un calcul par éléments finis, où le bois est assimilé à un matériau élasto-plastique, que la zone de dispersion plastique (créée par le point d'appui central) augmente lorsque la taille de l'éprouvette augmente. Quand la hauteur de l'éprouvette augmente, la courbe de rupture n'est pas tout à fait homothétique, et l'énergie de rupture $G_{f,I}$ croît.

Influence de l'humidité, de la densité et de l'orthotropie RT sur $G_{f,I}$:

Dans leurs travaux sur le bois de plantation de *Pinus resinosa* Ait., SMITH et CHUI (1994) montrent que l'énergie de rupture en mode I est influencée par l'humidité du bois et la direction du plan orthogonale à la rupture. L'énergie de rupture croît lorsque l'humidité du bois baisse du point de saturation des fibres jusqu'à 18 % (maximum), elle redescend ensuite rapidement lorsque l'humidité continue à baisser. L'énergie moyenne à 5 % d'humidité est d'environ $300 J/m^2$, à 18 % elle est de $550 J/m^2$ et au-dessus du point de saturation des fibres, elle est de $450 J/m^2$. Remarquons que lorsque le bois est amené à de faibles humidités, les micro-fissures qui apparaissent lors du séchage peuvent participer à diminuer l'énergie de rupture.

Smith et Chui ont aussi montré que l'énergie de rupture étaient maximale ($G_{f,I} \approx 560 J/m^2$) lorsque le plan de rupture était orienté de 60° par rapport à la direction radiale. Les valeurs de $G_{f,I}$ sont comparables en rupture radiale pure ou tangentielle pure ($G_{f,I} \approx 350 J/m^2$). Dans le cas des bois guyanais (angiospermes, dicotylédones), la présence d'un contre-fil important fait que la valeur de $G_{f,I}$ dans le plan de rupture RL est souvent plus forte que celle mesurée dans le plan de rupture TL. Les mesures de $G_{f,I}$ réalisés par I CHOUQUET (com. pers) dans le plan de rupture RL, sur du bois d'Angélique, sont au moins deux fois supérieures à nos valeurs mesurées dans le plan de rupture RL (dans les mêmes conditions d'essai).

Smith et Chui ainsi que KRETSHMANN et al (1990) ont aussi démontré que l'énergie de rupture est liée positivement à la densité lorsque les essais sont faits sur des éprouvettes dont l'humidité relative est

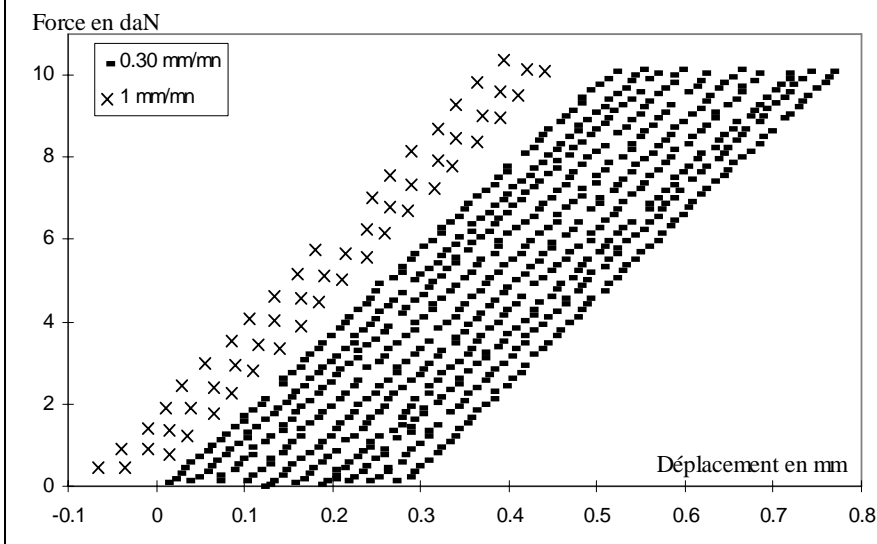
inférieure au point de saturation des fibres. Par contre, si le bois est au-dessus du point de saturation des fibres, $G_{f,I}$ et la densité ne sont pas statistiquement liés (au moins dans cadre d'une étude intraspécifique).

III - 4.4. Variabilité et répétabilité des essais

Répétabilité

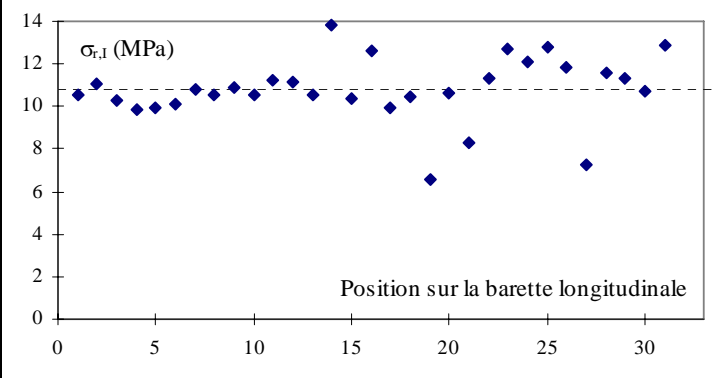
Sur une éprouvette SENB de Dodomissinga, nous avons réalisé une série de répétitions de flexion dans le domaine élastique

Figure III - -46 Essais de répétabilité dans le domaine élastique d'une éprouvette SENB de *Parkia sp.* à deux vitesses de chargement différentes.



représenté Figure III - -47. Entre chaque essai, l'échantillon était repositionné pour être plus proche des conditions réelles de l'essai. Le rapport : écart-type/moyenne de la pente mesurée, nous donne un critère de répétabilité égale à 0.91 %. Une estimation de l'erreur sur la mesure de la pente élastique est alors de +/- 1 % de la valeur mesurée. La répétabilité de cet essai est bien meilleure que celle des essais décrits précédemment. Les risques d'erreur de mesure sur le dispositif d'essai trois points sont donc moins importants.

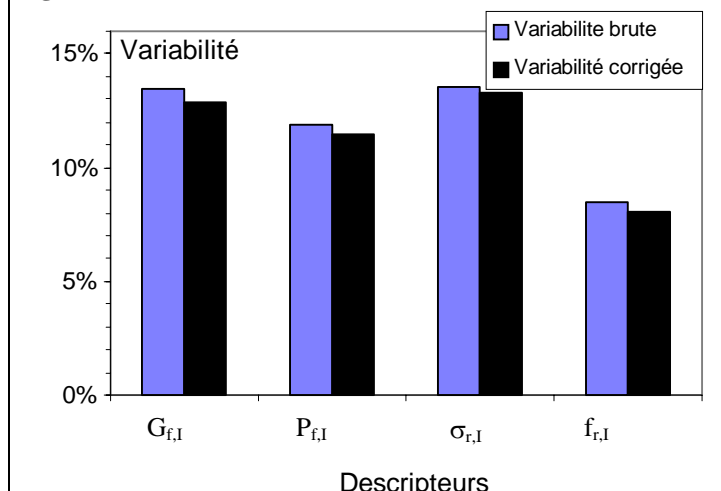
Figure III - -48 Evolution de $\sigma_{r,I}$ en fonction de sa position sur la barrette de débits longitudinaux.



Variabilité

De même que pour les essais de compression et de cisaillement, nous avons effectué 33 essais de rupture sur 33 éprouvettes de Bagasse (figure III - -49). Le même critère de variabilité : $V = \text{écart-type} / \text{moyenne}$ est calculé pour chacun des descripteurs de l'essai. L'influence de la fluctuation de la densité sur la variabilité est normalisée en divisant la valeur du descripteur mesurée sur chaque essai par l'infradensité de l'éprouvette concernée (Figure III - -50).

Figure III - -51 Essais de variabilité



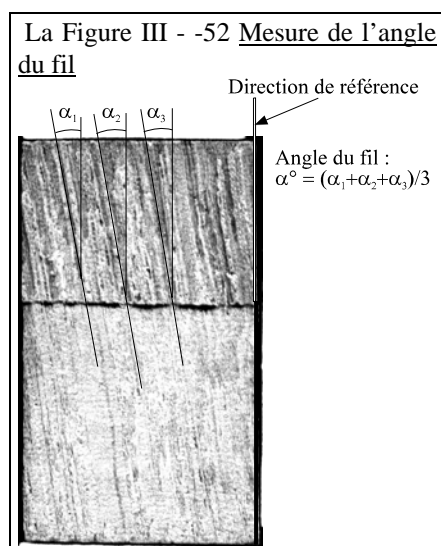
La variabilité des descripteurs de l'essai de cisaillement varie entre 12 et 13,5 %, sauf pour la flèche à la rupture qui plus stable environ 8 %.

En général, la rupture de l'éprouvette est prévisible pour un déplacement d'environ 1 mm à la température ambiante (dans les dimensions et les conditions de l'essai), alors que la contrainte à la rupture est beaucoup plus variable.

L'infradensité qui varie de 2,9 % par rapport à sa valeur moyenne, n'a pas un rôle très important sur la variabilité de l'essai, puisqu'elle explique au mieux 5 % de celle-ci.

III - 4.5. Mesure de l'angle du fil

La méthode utilisée pour mesurer l'angle du fil dans le plan de rupture est assez simple. Elle consiste à scanner le plan de rupture puis à contraster légèrement l'image obtenue. On trace alors à l'aide d'un logiciel approprié, une direction de référence parallèle à l'un des deux cotés longitudinaux de l'éprouvette et 3 droites qui suivent localement l'angle du fil. L'angle du fil moyen pour chaque éprouvette est la moyenne des angles que fait chacune des droites avec la direction de référence. La Figure III - -53 représente une image d'un échantillon de Saint-Martin jaune dont l'angle du fil est élevé environ 10°.



Mise à part le Saint-Martin jaune, l'angle du fil des espèces étudiées est relativement faible (tableau III - -2). Concrètement l'importance de l'angle du fil moyen nous donne une assez bonne approximation de l'importance du **contre-fil**¹⁰ des individus étudiés. Il arrive fréquemment que l'angle du fil du plan de rupture (par exemple 15°) soit l'opposé des angles du fil des plans de collage de l'éprouvette (-15°).

Dans l'ensemble, de par sa faible amplitude de variation l'angle du fil n'a pas une grande influence sur les descripteurs des essais. Cependant mis à part le Wacapou et pour une température équivalente, la tendance générale est : plus l'angle du fil est fort, plus l'énergie de rupture est faible.

Tableau III - -3 Résultats des mesures d'angle du fil (en °), pour les 10 essences étudiées.

ESPECE	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Dodomissinga	1.63	1.02	0.23	4.30
Yayamadou marécage	0.82	0.52	0.07	2.23
Moutende Kouali	4.04	2.13	0.53	9.07
Grignon	2.31	1.31	0.60	5.73
Angélique	1.98	1.03	0.63	4.27
Saint-martin jaune	9.70	6.43	0.47	21.40
Bois rouge	4.02	1.31	1.17	7.37
Wacapou	2.88	2.42	0.20	8.27
Ébène verte	1.62	1.15	0.13	3.97
Boco	1.73	1.09	0.40	5.73

III - 4.6. Mesure indirecte de la surface créée

La surface créée lors de l'essai de ténacité n'est pas plane. Le but de la manipulation est d'estimer la véritable surface créée à l'aide d'un des profils transversaux du plan de rupture. Les différentes étapes permettant de mesurer la longueur réelle du profil, sont schématisées Figure III - -54 :

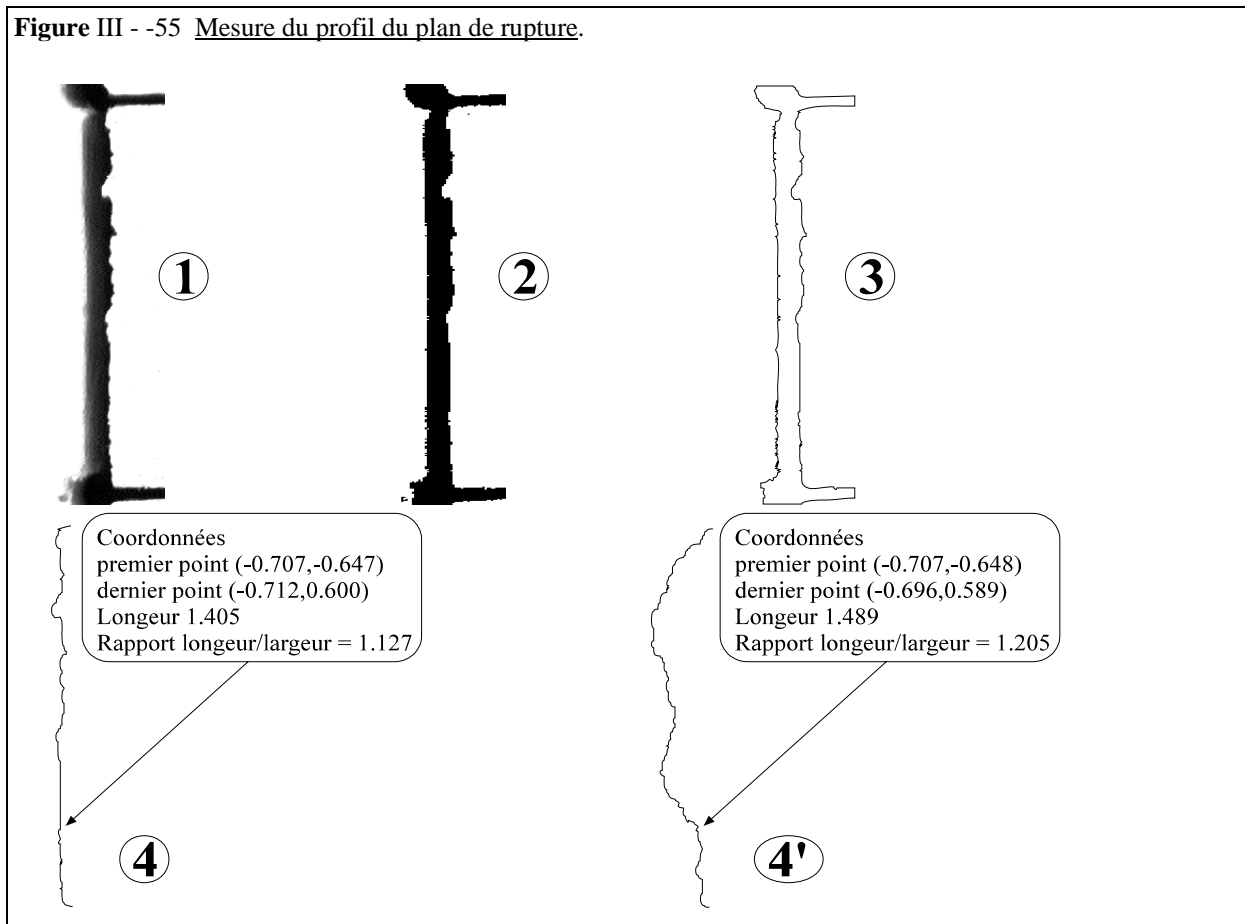
- 1 - la section transversale (RT) de l'échantillon est d'abord peinte en blanc puis numériser à l'aide d'un scanner à main, l'image obtenue est en 256 niveaux de gris et a une résolution de 400 DPI (1 pixel = 63.5 µm),
- 2 - Un logiciel de PAO permet de transformer cette image de 256 niveaux de gris en une image à deux couleurs (noir et blanc), afin d'accentuer le profil du plan de rupture,
- 3 - Le logiciel Coreldraw 5.0 peut extraire la limite noir/blanc de l'image bicolore, il crée à partir de cette limite un contour vectoriel continu,
- 4 - A partir de ce contour, nous extrayons la partie correspondant au plan de rupture, un autre logiciel permet de mesurer la longueur¹¹ et la largeur de la ligne brisée obtenue,

¹⁰ Rappelons que le **contre-fil**, très fréquent dans les bois tropicaux, est constitué de couches de bois orientées alternativement à droite puis à gauche par rapport à la direction longitudinale. Ces couches peuvent avoir de 0,5 à 3 cm d'épaisseur (observations faites sur les essences guyanaises fréquentes en scierie), certaines essences ont presque systématiquement un contre-fil important comme le *Caryocar glabrum*, le *Brosimum rubescens* ou les *Bagassa sp.* Toutefois, la présence d'un contre-fil important varie fréquemment non seulement d'une espèce à l'autre, mais souvent entre individus. Le contre-fil apporte certainement au tronc de l'arbre une meilleure résistance mécanique à la torsion.

¹¹ La longueur de la ligne brisée est la somme des normes de tous les vecteurs qui la constitue.

- 4'- A titre de comparaison, nous avons représenté le profil d'un essai dont le plan de rupture était radial-longitudinal, alors que dans nos essais, le plan de rupture était tangentiel-longitudinal (4); le contre-fil donne au plan de rupture RL, un profil beaucoup plus sinueux.

Figure III - -55 Mesure du profil du plan de rupture.



Il semble qu'il existe deux types de rupture, un mode hétérogène et un mode homogène.

- Le mode hétérogène est caractéristique des essences de faible ou de moyenne infradensité : Grignon, Dodomissinga, Yayamadou, Bois rouge et Angélique. La rupture adopte un profil en dent de scie d'un élément de vaisseau à l'autre.
- Dans le mode homogène, la rupture se fait dans le même type d'élément anatomique tangentiel, soit dans une bande de parenchyme (Saint-Martin jaune, Wacapou), soit dans une bande de fibre (Boco, Ebène verte). Lorsque la rupture se propage sur un même plan tangentiel, le plan de rupture paraît lisse et brillant et $G_{1,f}$ est petit. Néanmoins, la rupture est souvent crénelée ou en mode mixte.

Tableau III - -4 Rapport de la longueur du profil de rupture sur la largeur du plan de rupture (TL), pour les 10 essences étudiées.

ESPECE	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Dodomissinga	1.07	0.04	1.03	1.27
Yayamadou marécage	1.10	0.06	1.03	1.27
Moutende Kouali	1.11	0.07	1.03	1.46
Grignon	1.26	0.07	1.15	1.43
Angélique	1.11	0.05	1.03	1.25
Saint-martin jaune	1.11	0.08	1.03	1.45
Bois rouge	1.07	0.02	1.05	1.13
Wacapou	1.10	0.06	1.03	1.30
Ébène verte	1.10	0.08	1.04	1.52
Boco	1.19	0.06	1.06	1.31

La méthode que nous avons utilisée sous-estime sans doute la véritable surface créée. Elle n'est pas assez précise pour déceler le mode de rupture homogène, par exemple. Toutefois, elle révèle les plans de

La largeur de la ligne brisée est la distance entre le premier et le dernier point de celle-ci.

ruptures ayant un profil vraiment tourmenté, comme ceux correspondant à la colonne « maximum » du Tableau III - -5. C'est pourquoi, dans le calcul de l'énergie de rupture $G_{r,1}$, nous avons multiplié la surface (du ligament rompu lors de l'essai) par R = longueur du profil de rupture / largeur du plan de rupture (environ 24 mm).

IV - Résultats des essais mécaniques et commentaires

Résultats bruts : Description des annexes

Les 1080 (+90) courbes brutes (force-déplacement), regroupant les trois types d'essais mécaniques réalisés figurent dans un document annexe. Les courbes ne sont pas recalées par rapport au point d'intersection de la pente de la courbe et de l'axe des abscisses. L'abscisse de la courbe de ténacité est limitée à 10 mm, bien que le déplacement maximum puisse être de 20 mm. Remarquons encore sur cette courbe, le léger artefact causé par le changement de vitesse (le changement de vitesse est effectué à partir d'un déplacement de 3 mm) dont l'amplitude varie suivant l'espèce et la température.

ANNEXE I : Relation entre les descripteurs des essais et l'**infradensité**.

Annexe I-1 : Evolution des descripteurs de l'essai de **compression** en fonction de l'infradensité des éprouvettes.

Annexe I-2 : Evolution des descripteurs de l'essai de **cisaillement** en fonction de l'infradensité des éprouvettes.

Annexe I-3 : Evolution des descripteurs de l'essai de **ténacité** en fonction de l'infradensité des éprouvettes.

ANNEXE II : Relation entre les descripteurs des essais et la **température**.

Annexe II-1 : Evolution des descripteurs de l'essai de **compression** en fonction de la température d'essai.

Annexe II-2 : Evolution des descripteurs de l'essai de **cisaillement** en fonction de la température d'essai.

Annexe II-3 : Evolution des descripteurs de l'essai de **ténacité** en fonction de la température d'essai.

Tous les essais ont été utilisés pour le traitement des données. Seuls deux modules de compression radiale E_{re} (*Humiria* à 25°C) ont été éliminés. Lors de l'essai, la compression n'avait pas été homogène et les deux échantillons étaient de façon flagrante, plus écrasés d'un côté que de l'autre.

IV - 1. Influence de la densité sur les différents descripteurs mécaniques

Dans les différents ajustements de cette partie, le nombre de degrés de liberté minimum par régression est de 30 (entre 31 et 38 observations par température). Le seuil de signification à 1 % du coefficient de détermination R^2 est de 0,31 et le seuil de signification à 1 % est 0,20. Nous utiliserons très souvent le coefficient de détermination R^2 (égal au coefficient de corrélation au carré) pour caractériser l'intensité des liaisons entre les paramètres étudiés.

IV - 1.1. Rôle de l'infradensité sur l'essai de compression radiale

Mise à part la déformation ϵ_y au premier coude de la courbe de compression radiale, les autres descripteurs sont très liés à l'infradensité et ceci quelle que soit la température.

La courbe de tendance la plus simple pour ajuster un nuage de points (descripteur en fonction de l'infradensité à une température donnée) est une **fonction puissance du type** :

$$y = bx^a + c.$$

Cette courbe d'ajustement doit-elle passer par l'origine ?

- Il n'existe pas de bois dont la densité est nulle, le bois le plus léger de la xylothèque du CIRAD Montpellier appartient à l'espèce *Aeschynomene elaphroxylon* (Fabacées) et sa densité à 12 % varie entre 0,06 et 0,08 (DETIENNE com. pers.).

- Les meilleurs ajustements réalisables à partir des données du CIRAD sur différentes propriétés mécaniques, dans la direction longitudinale, en fonction de la densité à 12%, privilégient une équation du type $y = bx^a$. Cette courbe passe par zéro. Les ajustements¹² sont d'ailleurs très proches d'une relation linéaire.

Nous avons testé d'abord la formule complète, puis, chaque fois que le terme constant c était petit par rapport aux valeurs du descripteur, la formule réduite passant par l'origine.

En fait dans l'ajustement choisi : **Critère = $b * \text{Infradensité}^a + c$** , pour chaque température considérée, a , b et c peuvent varier. Nous avons limité le nombre de variable à deux au maximum, b étant la variable principale. Compte tenu des faibles variations d'allure finale des courbes, dans la fenêtre de densité considérée, lorsque la puissance a varie, nous avons privilégié les familles de courbes, avec ce paramètre indépendant de la température. Ainsi seul b varie en fonction de la température et l'analyse est plus simple. Les variables sont déterminées de manière à ce que la moyenne des douze coefficients de détermination (un coefficient par température), soit maximale. L'outil utilisé pour déterminer les variables est le solveur de Microsoft Excel Version 5.0, il permet entre autres de fixer certaines contraintes comme $c > 0$ par exemple (voir annexe).

IV - 1.1.1. Energies de compression $W_{6.67\%}$

a - Energie de compression pour une déformation de 6.67 %

Tableau IV - -1 Valeurs des variables des ajustements de $W_{6.67\%}$ aux 12 températures

T°C	a _{cst}	b ₀	c ₀	R ²	a _{cst}	b ₁	R ²
25	2.07	1300	57	0.93	1.73	1293	0.93
30	2.07	1243	53	0.94	1.73	1228	0.93
35	2.07	1210	40	0.92	1.73	1179	0.91
40	2.07	1136	47	0.92	1.73	1122	0.91
45	2.07	1022	46	0.87	1.73	1013	0.86
50	2.07	975	26	0.90	1.73	937	0.88
55	2.07	864	32	0.91	1.73	848	0.90
60	2.07	764	36	0.93	1.73	762	0.92
65	2.07	555	56	0.90	1.73	604	0.90
70	2.07	447	60	0.93	1.73	512	0.92
75	2.07	367	57	0.91	1.73	434	0.89
80	2.07	321	47	0.93	1.73	373	0.91
$\overline{R^2}$				0.9148			0.9045

L'optimisation par le solveur a donné deux familles de courbes :

- L'une passant par l'origine : $W_{6.67\%} = b_1 ID^{1.73}$ (ID = infradensité) où seul b_1 varie en fonction de température d'essai.

- L'autre ne passant pas par l'origine :

$$W_{6.67\%} = b_0 ID^{2.07} + c_0$$

où b_0 et c_0 varient en fonction de la température.

Les valeurs des variables b_0 , b_1 et c_0 (en kJ/m^3) et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau IV - -1. Dans l'ensemble les

deux ajustements sont très proches, la différence résulte essentiellement dans le comportement « fort » de l'espèce la moins dense, *Parkia* sp. (figure IV - -1).

¹² Les ajustements ont été réalisés à partir des données du CIRAD sur plus 890 espèces, les équations sont les suivantes (unités MPa) :

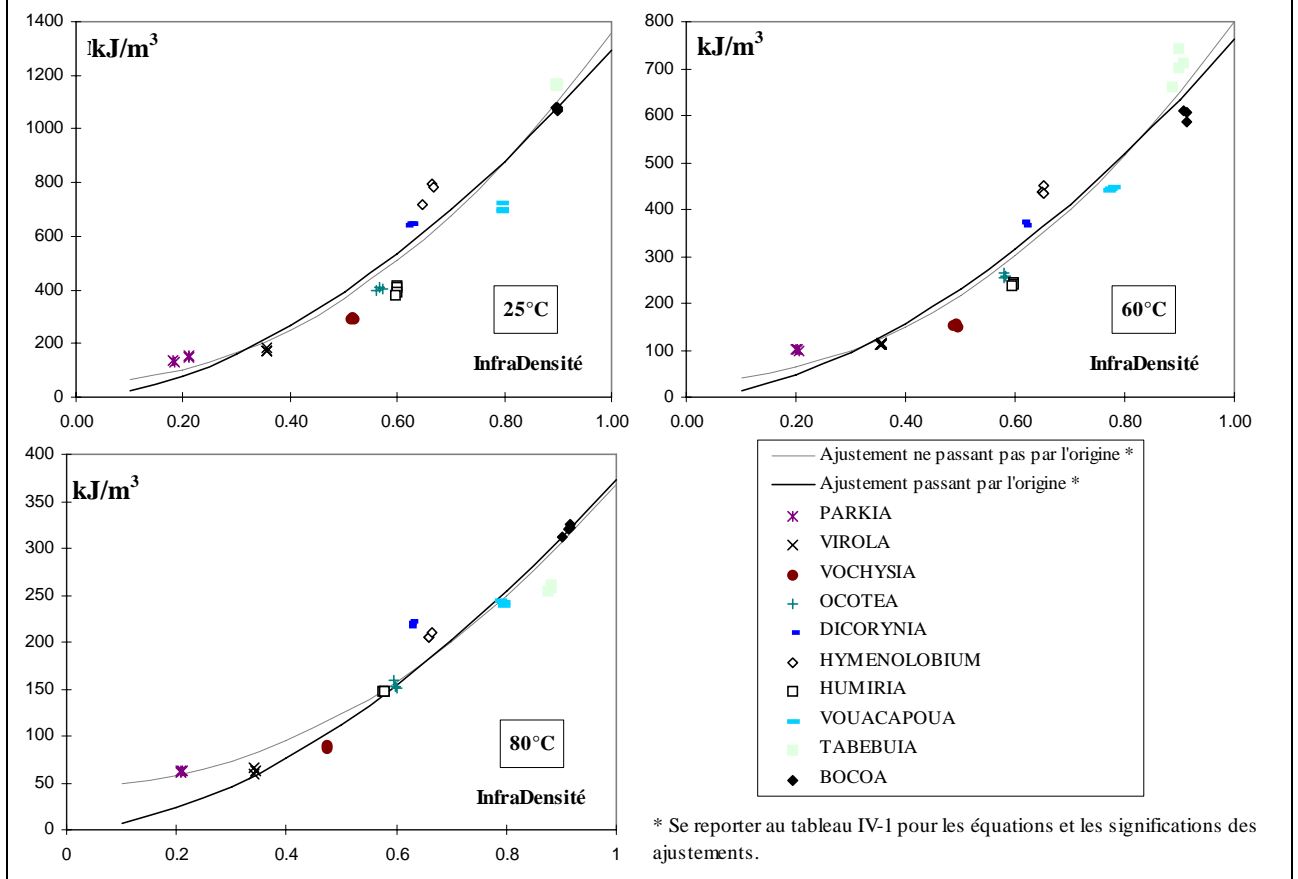
Contrainte à la rupture en compression axiale : $\sigma = 86 D^{1.06}$ ($R^2 = 0.84$).

Contrainte à la rupture en cisaillement axial : $\tau = 11 D^{1.03}$ ($R^2 = 0.54$).

Module longitudinal en flexion statique (essais 3 points) : $E_1 = 17,6 D^{1.04}$ ($R^2 = 0.70$).

Où D est la densité à 12 %, elle couvre une plage de 0,13 à 1,33 pour l'ensemble des espèces.

Figure IV - -1 Exemple d'ajustements de $W_{6,67\%}$ en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes



b - Energie de compression pour une déformation de 13.3 % et de 20 %

De même pour les énergies à 13.3 % et à 20 % de déformation, deux familles de courbes optimales sont proposées :

Energie à 13.3 % de déformation

$$W_{13.3\%} = b_3 \text{ID}^{2.09}$$

ou $W_{13.3\%} = b_2 \text{ID}^{2.49} + c_1$

Energie à 20 % de déformation

$$W_{20\%} = b_4 \text{ID}^{2.19}$$

ou $W_{20\%} = b_5 \text{ID}^{2.58} + c_2$

ID = infradensité

Les valeurs des variables b_i et c_i et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau IV - -2 (unités en kJ/m^3).

Les figures (Figure IV - -2 et Figure IV - -3) donnent une représentation graphique des différentes équations de $W_{13.3\%}$ et $W_{20\%}$ en fonction de l'infradensité à 3 températures d'essai 25, 60 et 80°C.

Tableau IV - 3

Valeurs des variables des ajustements de $W_{13,3\%}$ aux 12 températures

T°C	a _{est}	b ₂	c ₁	R ²	a _{est}	b ₃	R ²
25	2.49	2901	238	0.93	2.09	3074	0.92
30	2.49	2840	206	0.94	2.09	2957	0.93
35	2.49	2716	188	0.93	2.09	2812	0.92
40	2.49	2617	184	0.93	2.09	2717	0.92
45	2.49	2322	181	0.88	2.09	2437	0.87
50	2.49	2287	117	0.91	2.09	2292	0.90
55	2.49	2136	105	0.93	2.09	2136	0.92
60	2.49	1949	100	0.95	2.09	1959	0.94
65	2.49	1562	113	0.94	2.09	1628	0.93
70	2.49	1322	116	0.96	2.09	1416	0.95
75	2.49	1119	112	0.93	2.09	1221	0.92
80	2.49	992	88	0.92	2.09	1062	0.91
$\overline{R^2}$				0.9284			0.9184

Valeurs des variables des ajustements de $W_{20\%}$ aux 12 températures

T°C	a _{est}	b ₄	c ₂	R ²	a _{est}	b ₅	R ²
25	2.58	4626	421	0.93	2.19	4999	0.92
30	2.58	4512	362	0.94	2.19	4795	0.92
35	2.58	4291	337	0.92	2.19	4544	0.92
40	2.58	4104	335	0.93	2.19	4377	0.92
45	2.58	3719	317	0.88	2.19	3984	0.86
50	2.58	3695	208	0.91	2.19	3762	0.90
55	2.58	3511	180	0.93	2.19	3548	0.92
60	2.58	3278	159	0.95	2.19	3299	0.94
65	2.58	2739	165	0.93	2.19	2815	0.92
70	2.58	2415	159	0.95	2.19	2510	0.94
75	2.58	2109	147	0.92	2.19	2204	0.91
80	2.58	1896	110	0.90	2.19	1938	0.89
$\overline{R^2}$				0.9239			0.9135

Figure IV - 4 Exemple d'ajustements de $W_{13,3\%}$ en fonction de l'infra-densité pour trois températures différentes

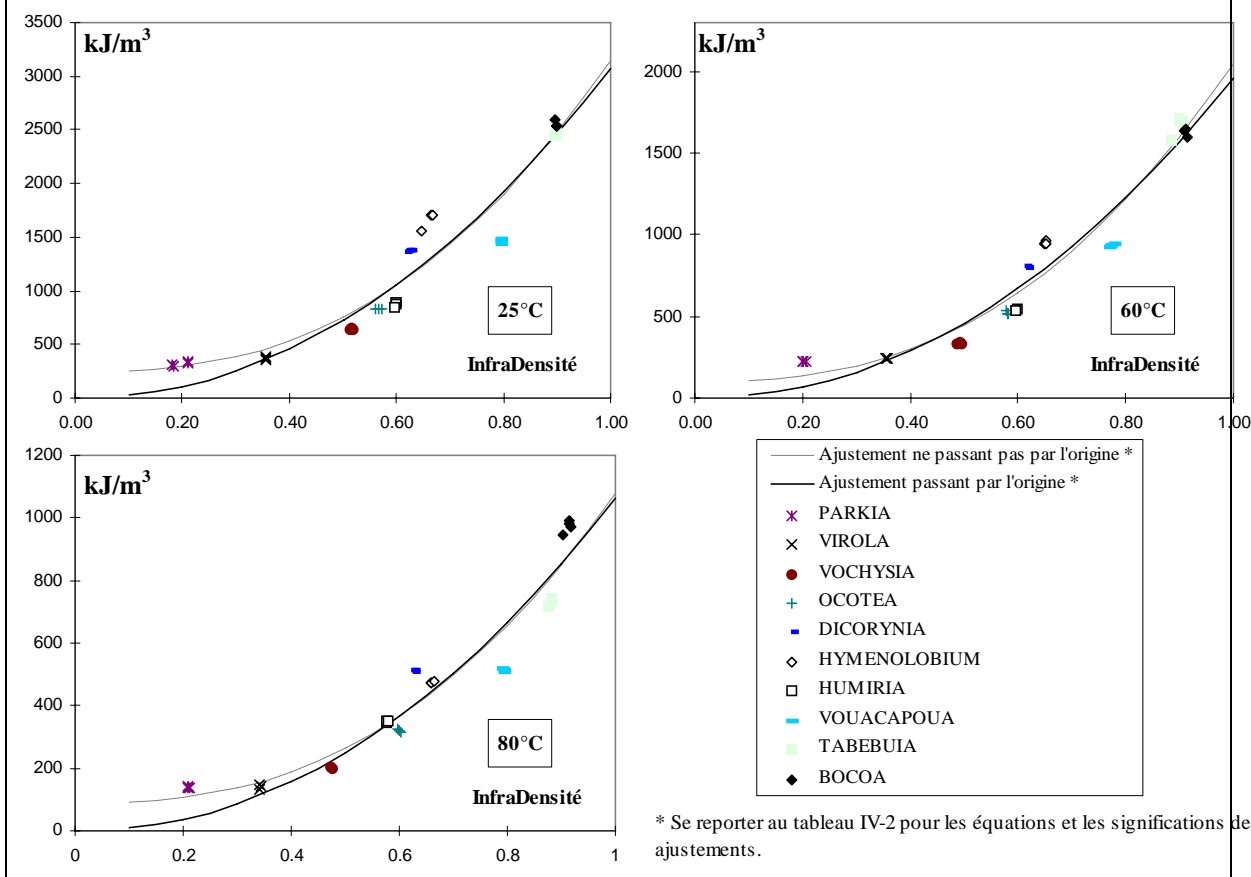
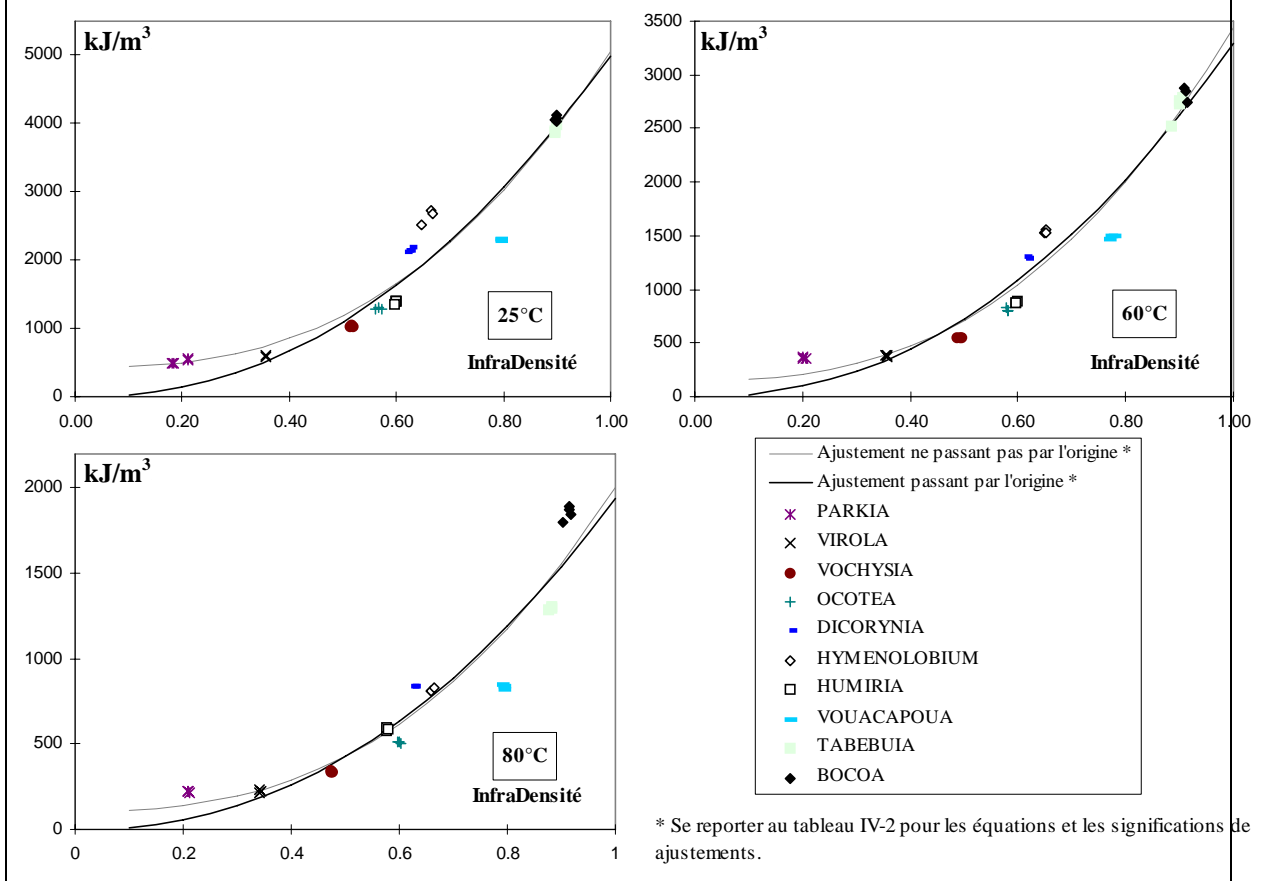


Figure IV - -5 Exemple d'ajustements de $W_{20\%}$ en fonction de l'infra densité pour trois températures différentes

Les allures des courbes pour les trois niveaux de déformation sont très similaires. Il paraît raisonnable de proposer pour ces trois descripteurs une seule famille de courbe du type :

$$W_{\varepsilon\%} = b ID^2$$

c - Relation entre les descripteurs $W_{\varepsilon\%}$.

Les corrélations entre les trois descripteurs sont particulièrement élevées (tableau IV - -6 et figure IV - -4).

A partir de l'enregistrement complet de la courbe effort déformation, il est possible de calculer pour tout couple de valeur (σ, ε) enregistré un grand nombre d'énergies $W_{\varepsilon\%}$ dont la représentation graphique donne l'allure de la courbe $W(\varepsilon)$ pour un essai. **Au-delà du premier coude**, ces représentations sont rendues très fidèlement par une famille de courbe du type

$$W_{\varepsilon\%} = B \varepsilon^4 \quad \text{où } \varepsilon \text{ est la déformation en \%}.$$

Figure IV - -7 Relation entre les différents $W_{\epsilon\%}$

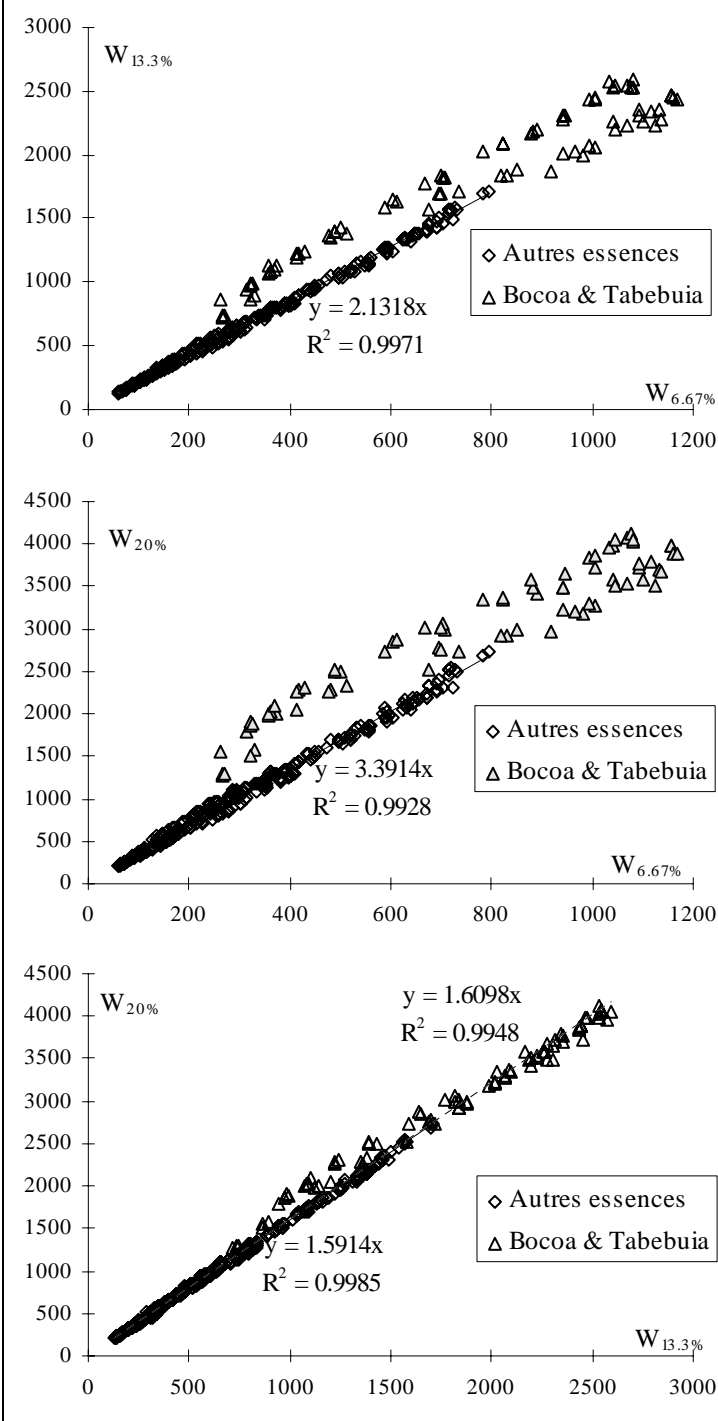


Tableau IV - -5 Coefficients de corrélation entre les trois énergies de compression (390 points)

	$W_{6.67\%}$	$W_{13.3\%}$	$W_{20\%}$
$W_{6.67\%}$	1		
$W_{13.3\%}$	0.97	1	
$W_{20\%}$	0.95	0.99	1

Par ailleurs, il s'avère que les paramètres B et A peuvent être estimés avec une très bonne précision avec seulement 4 points correspondant à l'origine et aux descripteurs $W_{6.67\%}$, $W_{13.3\%}$ et $W_{20\%}$ mesurés. L'analyse permet de ne retenir qu'une seule famille de courbes du type $W_{\epsilon\%} = B \epsilon^{1.1}$ pour toutes les essences en dehors des deux plus denses (Ebène verte et Boco) qui ont un comportement particulier. La figure

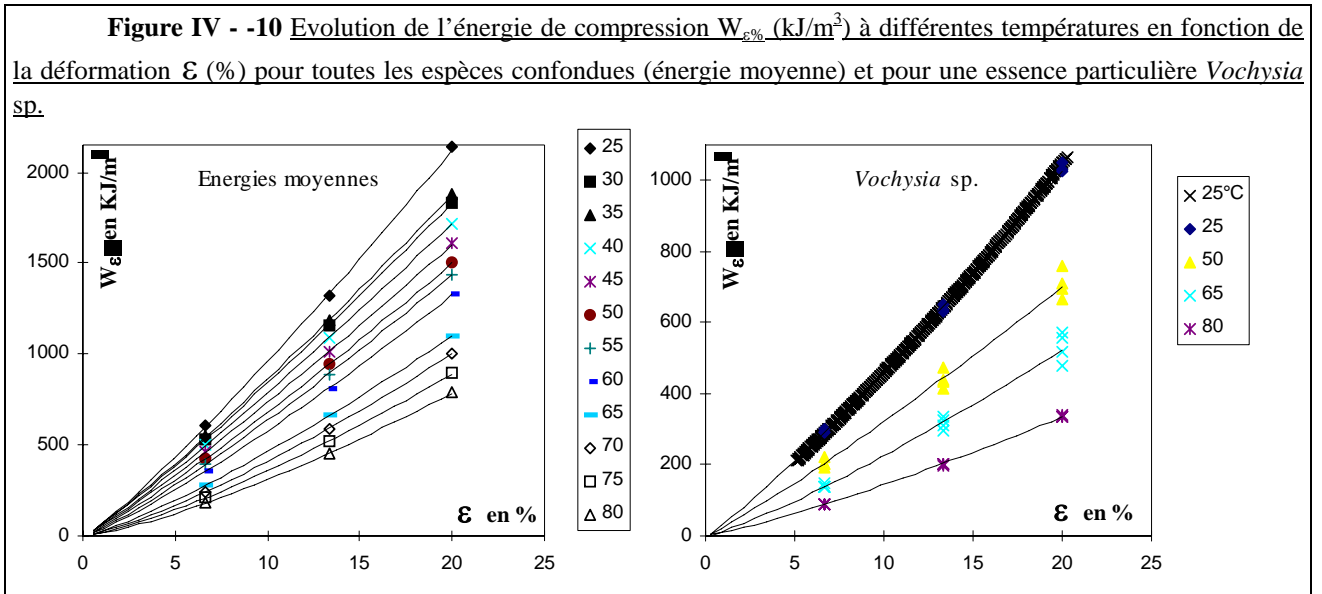
Les autres descripteurs de l'essai (Figure IV - -8) sont :

- 3 énergies par unité de volume cisailé W° pour des déplacements lors de l'essai de 0.4, 0.8 et 1.6 mm, soit des angles de cisaillement de 2.3, 4.6, 9.1 degrés nous donne les valeurs de B pour les dix essences à trois températures différentes.

Nous avons représenté pour un essai de compression sur *Vochysia* à 25°C, la courbe représentant l'évolution de l'énergie de compression en fonction de la déformation pour chaque couple de valeur (effort, déformation) enregistré lors de l'essai (soit 331 points schématisés par des « x » sur la figure Figure IV - -9).

Tableau IV - -6 Valeur de B pour les dix essences à trois températures différentes (A = 1.1).

Essences	25°C	50°C	80°C
<i>Parkia</i>	18.9	14.4	8.1
<i>Virola</i>	21.8	17.1	8.3
<i>Vochysia</i>	37.9	26.0	12.2
<i>Ocotea</i>	48.0	35.8	18.9
<i>Humiria</i>	51.1	39.6	21.1
<i>Dicorynia</i>	79.7	56.4	30.5
<i>Hymenolobium</i>	97.3	68.0	29.3
<i>Vouacapoua</i>	85.3	64.0	30.6
<i>Tabebuia</i>	144.5	115.6	45.6
<i>Bocoa</i>	148.9	121.9	63.6



IV - 1.1.2. Module équivalent E_{re}

L'évolution du module équivalent E_{re} est beaucoup plus linéaire que celle des descripteurs précédents. Les deux familles de courbes proposées sont les suivantes :

$$E_{re} = b_7 ID^{1.07}$$

ou $E_{re} = b_6 ID^{1.33} + c_3$

ID = infradensité

A titre d'information nous proposons aussi une famille de courbe, où la puissance varie en fonction de la température (courbes en pointillés sur la figure Figure IV - -11):

(1) $E_{re} = b_8 ID^{a_0}$

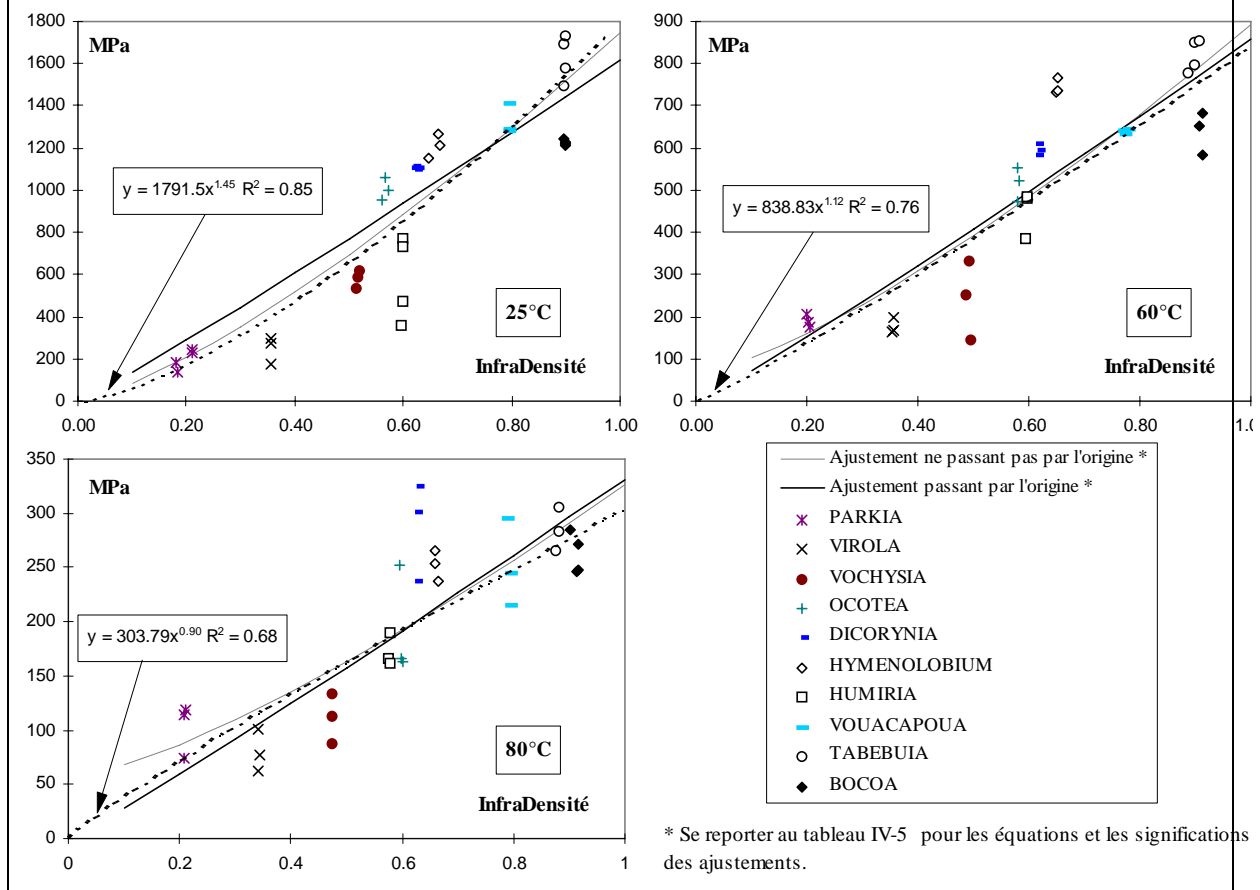
Les valeurs des variables a_i , b_i et c_i et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau Figure IV - -12 (unités en MPa).

Tableau IV - -7 Valeurs des variables des ajustements de E_{re} aux 12 températures

T°C	a_{cst}	b_6	c_3	R^2	a_{cst}	b_7	R^2	a_0	b_8	R^2
25	1.33	1744	2	0.86	1.07	1618	0.85	1.45	1792	0.85
30	1.33	1615	42	0.88	1.07	1545	0.87	1.30	1646	0.88
35	1.33	1694	0	0.87	1.07	1563	0.85	1.31	1645	0.87
40	1.33	1502	54	0.87	1.07	1461	0.87	1.22	1504	0.87
45	1.33	1431	20	0.85	1.07	1343	0.84	1.27	1408	0.85
50	1.33	1157	54	0.83	1.07	1144	0.83	1.19	1164	0.83
55	1.33	1015	61	0.77	1.07	1026	0.78	1.20	1040	0.78
60	1.33	830	63	0.76	1.07	858	0.76	1.12	839	0.76
65	1.33	560	89	0.55	1.07	648	0.56	1.04	609	0.56
70	1.33	378	99	0.61	1.07	496	0.59	0.84	446	0.63
75	1.33	299	85	0.64	1.07	402	0.61	0.77	353	0.66
80	1.33	271	55	0.67	1.07	331	0.67	0.90	304	0.68
$\overline{R^2}$				0.7630			0.7564			0.7693

Il apparaît clairement sur les graphes de la figure Figure IV - -13 que les différentes familles de courbes décrivent bien les variations de E_{re} dans la plage expérimentée. Il y a fort intérêt, faute d'informations pertinentes, à choisir la famille la plus simple.

Figure IV - -14 Exemple d'ajustements de E_{re} en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes



IV - 1.1.3. Contrainte au premier coude σ_y

Comme dans le paragraphe précédent, trois familles de courbes sont proposées, deux familles avec une puissance indépendante de la température :

$$\sigma_y = b_{10} ID^{1.47} \quad \text{ou} \quad \sigma_y = b_9 ID^{1.76} + c_4$$

et une famille où la puissance varie en fonction de la température (courbes en pointillée sur la figure Figure IV - -15):

$$\sigma_y = b_{11} ID^{a_1} \quad ID = \text{infradensité}$$

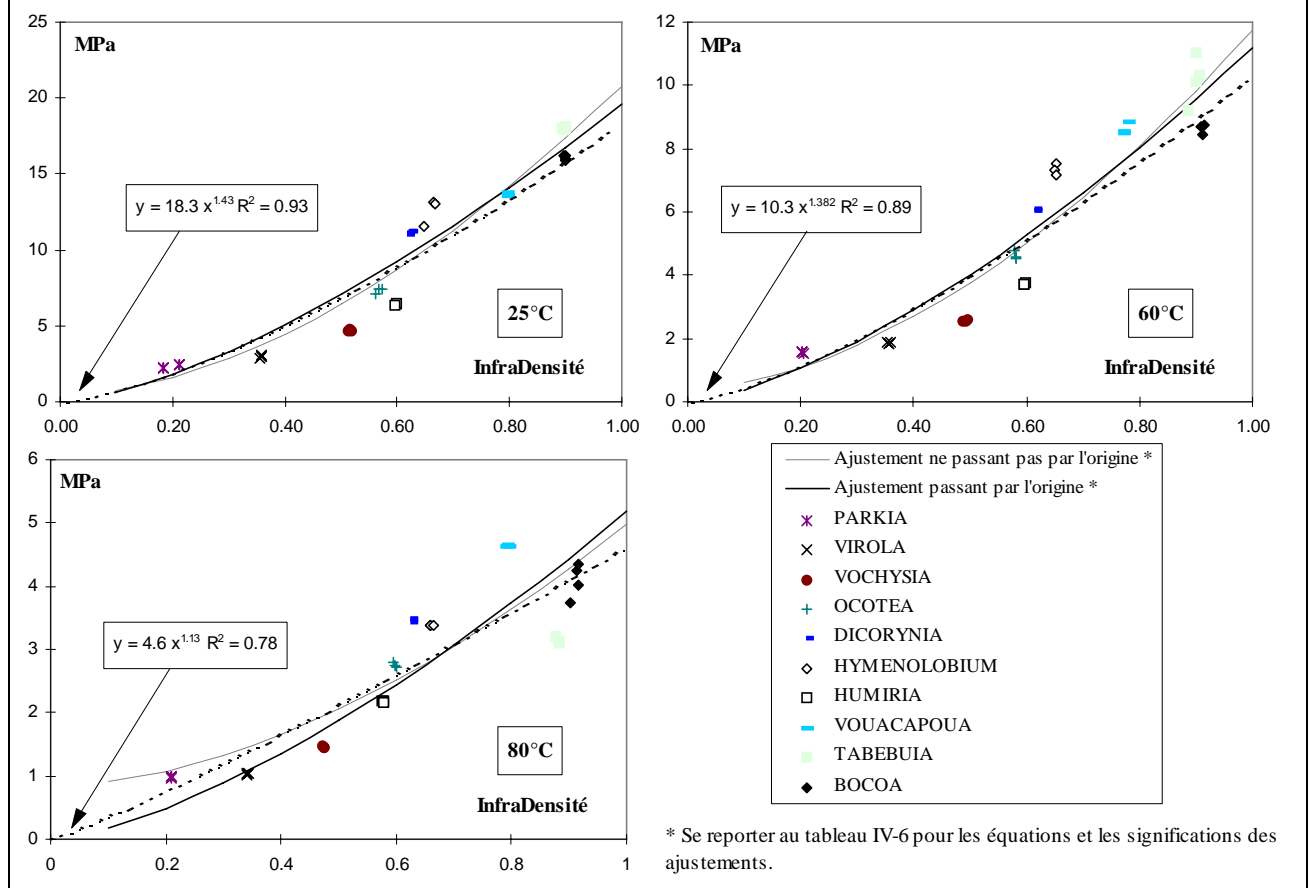
Les valeurs des variables a_i , b_i et c_i et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau La Figure IV - -16 (unités en MPa).

Le comportement vis-à-vis de l'infradensité est intermédiaire entre ceux des descripteurs $W_{\epsilon\%}$ et celui du module équivalent. A nouveau la figure Figure IV - -17 permet de justifier l'utilisation de la famille de courbe la plus simple.

Tableau IV - -8 Valeurs des variables des ajustements de σ_y aux 12 températures

T°C	a _{cst}	b ₉	c ₄	R ²	a _{cst}	b ₁₀	R ²	a ₁	b ₁₁	R ²
25	1.76	20.3	0.42	0.93	1.47	19.5	0.92	1.43	18.3	0.93
30	1.76	19.6	0.34	0.94	1.47	18.5	0.92	1.40	17.0	0.93
35	1.76	19.2	0.10	0.93	1.47	17.9	0.91	1.47	16.8	0.92
40	1.76	17.6	0.38	0.90	1.47	16.9	0.89	1.42	15.6	0.90
45	1.76	16.0	0.31	0.90	1.47	15.2	0.88	1.43	14.2	0.89
50	1.76	15.3	0.01	0.93	1.47	14.1	0.91	1.46	13.2	0.92
55	1.76	13.2	0.21	0.91	1.47	12.6	0.90	1.41	11.6	0.90
60	1.76	11.3	0.42	0.89	1.47	11.2	0.89	1.38	10.3	0.89
65	1.76	7.7	0.94	0.80	1.47	8.6	0.80	1.23	7.7	0.81
70	1.76	6.1	1.01	0.77	1.47	7.3	0.77	1.24	6.7	0.80
75	1.76	4.9	0.99	0.70	1.47	6.1	0.69	1.16	5.5	0.74
80	1.76	4.2	0.83	0.75	1.47	5.2	0.74	1.13	4.6	0.78
$\overline{R^2}$				0.8622			0.8524			0.8672

Figure IV - -18 Exemple d'ajustements de σ_y en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes



IV - 1.1.4. Déformation au premier coude ϵ_y

Dans nos essais, la déformation au premier coude n'est pas influencée par la variation de densité (Annexe I-1). La moyenne de ϵ_y toutes densités et toutes températures confondues est de 2 % de déformation (écart-type = 0,39 %).

IV - 1.1.5. Synthèse

Afin de résumer le comportement du bois en compression radiale en fonction de sa densité, et en simplifiant modérément, nous pouvons proposer les familles de courbes suivantes :

- L'énergie de compression ($W_{\epsilon\%}$) croit de façon parabolique quand l'infradensité (ID) augmente,

$$W_{\epsilon\%} = b_{A\epsilon\%} ID^2$$

- Le module équivalent (E_{re}) croit linéairement quand augmente l'infradensité,

$$E_{re} = b_B ID$$

- La contrainte au premier coude (σ_y) croit de façon intermédiaire,

$$\sigma_y = b_C ID^{1.5}$$

Nous verrons plus loin l'évolution des variables b_i en fonction de la température.

Tableau IV - -9 Valeurs des variables $b_{A\epsilon\%}$, b_B , b_C aux 12 températures

T°C	a_{cst}	$b_{A6.67\%}$	R^2	a_{cst}	$b_{A13.3\%}$	R^2	a_{cst}	$b_{A20\epsilon\%}$	R^2	a_{cst}	E_{re}	R^2	a_{cst}	σ_y	R^2
25	2	1377	0.93	2	3016	0.92	2	4800	0.92	1	1581	0.84	1.5	19.7	0.92
30	2	1317	0.93	2	2894	0.93	2	4579	0.92	1	1507	0.87	1.5	18.7	0.93
35	2	1260	0.91	2	2755	0.92	2	4352	0.92	1	1526	0.84	1.5	18.0	0.91
40	2	1201	0.91	2	2661	0.92	2	4187	0.92	1	1425	0.86	1.5	17.0	0.90
45	2	1088	0.86	2	2385	0.87	2	3803	0.86	1	1310	0.83	1.5	15.4	0.89
50	2	1004	0.90	2	2243	0.89	2	3593	0.89	1	1117	0.82	1.5	14.3	0.91
55	2	906	0.91	2	2093	0.91	2	3393	0.91	1	1003	0.77	1.5	12.7	0.90
60	2	813	0.92	2	1919	0.94	2	3157	0.93	1	839	0.76	1.5	11.3	0.89
65	2	645	0.87	2	1594	0.92	2	2690	0.92	1	633	0.56	1.5	8.7	0.80
70	2	543	0.88	2	1389	0.95	2	2405	0.93	1	485	0.61	1.5	7.3	0.77
75	2	460	0.84	2	1197	0.92	2	2111	0.90	1	393	0.63	1.5	6.1	0.68
80	2	396	0.86	2	1041	0.91	2	1855	0.88	1	324	0.68	1.5	5.2	0.73
$\overline{R^2}$			0.893			0.917			0.910			0.755			0.852

IV - 1.2. Rôle de l'infradensité sur l'essai de cisaillement RT

Hormis l'angle de cisaillement à la rupture, les autres descripteurs de l'essai de cisaillement sont très liés à la densité.

IV - 1.2.1. Energies de cisaillement W_γ

L'énergie de cisaillement, contrairement à l'énergie de compression, croit presque linéairement lorsque l'infradensité augmente. L'énergie de cisaillement pour un angle de cisaillement de 2.3° ($W_{2.3^\circ}$) est d'ailleurs ajustée à une droite passant par zéro (figure (Figure IV - -19). Les deux autres énergies mesurées $W_{4.6^\circ}$ et $W_{9.1^\circ}$ sont ajustées par une fonction puissance passant par zéro.

$$W_{2.3^\circ} = b_{12} ID$$

$$W_{4.6^\circ} = b_{13} ID^{1.10}$$

$$W_{9.1^\circ} = b_{14} ID^{1.37}$$

ID = infradensité

Les valeurs des variables b_i et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau Figure IV - -20 (unités en kJ/m³). Des exemples sont donnés dans les figures IV - -21 et (Figure IV - -22).

Tableau IV - -10 Valeurs des variables des ajustements de W_γ aux 12 températures d'essai, à gauche, ajustement de l'énergie pour un angle de cisaillement de 2.3° ($W_{2.3^\circ}$), au centre, ajustement de l'énergie pour un angle 4.6° ($W_{4.6^\circ}$), à droite, ajustement de l'énergie pour un angle de 9.1° ($W_{9.1^\circ}$).

T°C	a _{cst}	b ₁₂	R ²	a _{cst}	b ₁₃	R ²	a _{cst}	b ₁₄	R ²
25	1.00	58	0.88	1.10	211	0.85	1.37	746	0.90
30	1.00	56	0.86	1.10	204	0.86	1.37	744	0.91
35	1.00	53	0.90	1.10	194	0.89	1.37	702	0.88
40	1.00	50	0.92	1.10	186	0.90	1.37	667	0.90
45	1.00	49	0.86	1.10	178	0.86	1.37	613	0.88
50	1.00	46	0.90	1.10	165	0.87	1.37	579	0.89
55	1.00	42	0.92	1.10	149	0.90	1.37	528	0.90
60	1.00	39	0.91	1.10	131	0.90	1.37	456	0.92
65	1.00	32	0.86	1.10	111	0.88	1.37	376	0.92
70	1.00	26	0.83	1.10	89	0.86	1.37	294	0.86
75	1.00	22	0.83	1.10	74	0.84	1.37	249	0.85
80	1.00	18	0.82	1.10	62	0.84	1.37	215	0.89
\overline{R}^2			0.8728			0.8710			0.8927

Evolution de W_γ en fonction de l'angle de cisaillement

Les corrélations entre les trois énergies de cisaillement sont aussi très élevées (figure IV - -23 et tableau Figure IV - -24).

De la même manière que pour les énergies de compression il est possible de représenter les variations de l'énergie de cisaillement avec l'angle de cisaillement par une famille de courbes du type :

$W_\gamma = C \gamma^{1.6}$ où γ est l'angle de cisaillement en degrés, au-delà de la limite de linéarité de la portion initiale.

La variable C diminue quand la température augmente, à titre indicatif nous donnons les valeurs de C à trois températures, pour les dix essences dans le tableau IV - -12.

Nous avons représenté pour un essai de compression sur *Vochysia* à 25°C , la courbe représentant l'évolution de l'énergie de cisaillement en fonction de l'angle de cisaillement pour chaque couple de valeur (effort, angle) enregistré lors de l'essai (soit 168 points schématisés par des « x » sur la figure Figure IV - -25.

Tableau IV - -11 Coefficients de corrélation entre les trois énergies de cisaillement (390 points)

	$W_{2.3^\circ}$	$W_{4.6^\circ}$	$W_{9.1^\circ}$
$W_{2.3^\circ}$	1		
$W_{4.6^\circ}$	0.99	1	
$W_{9.1^\circ}$	0.98	0.99	1

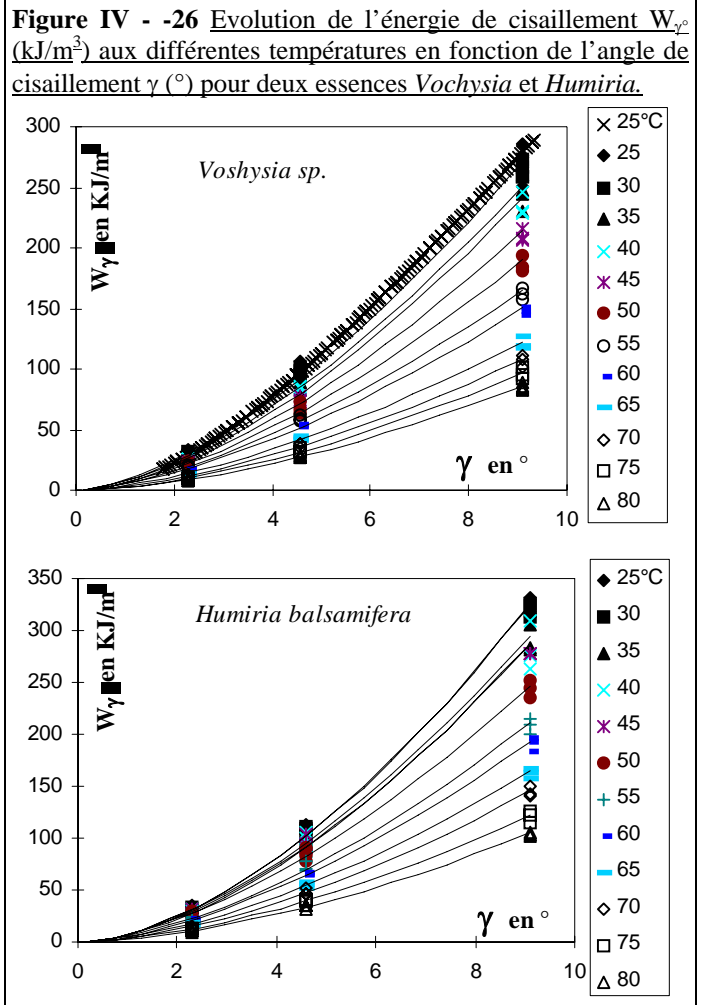
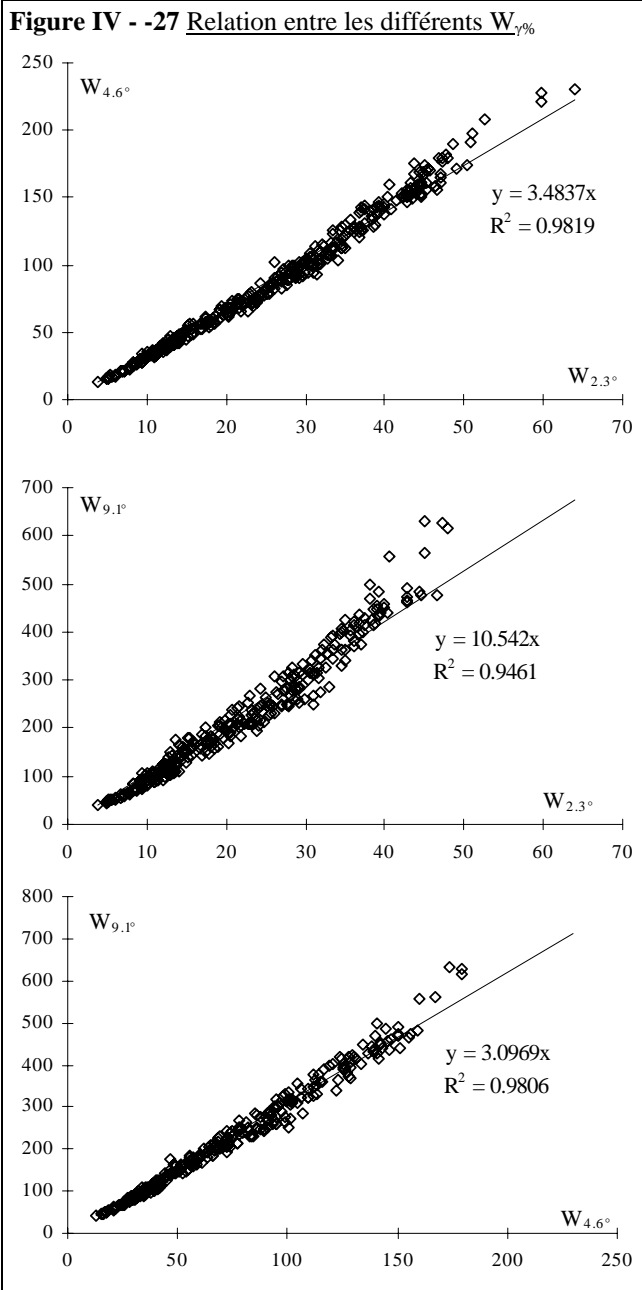


Tableau IV - -13 Valeur de C pour les dix essences à trois températures différentes.

Essences	30°C	50°C	80°C
<i>Parkia</i>	3.53	2.90	1.36
<i>Virola</i>	3.32	2.73	1.34
<i>Vochysia</i>	7.85	5.50	2.52
<i>Ocotea</i>	9.32	6.76	3.14
<i>Humiria</i>	9.36	7.17	3.04
<i>Dicorynia</i>	12.57	10.50	4.14
<i>Hymenolobium</i>	13.67	10.24	4.01
<i>Vouacapoua</i>	14.07	11.46	4.63
<i>Tabebuia</i>	18.50	16.11	5.06
<i>Bocoa</i>	13.80	12.35	4.80

Figure IV - -28 Exemple d'ajustements de $W_{4,6^\circ}$ et de $W_{9,1^\circ}$ en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes, même légende que la figure IV - -29.

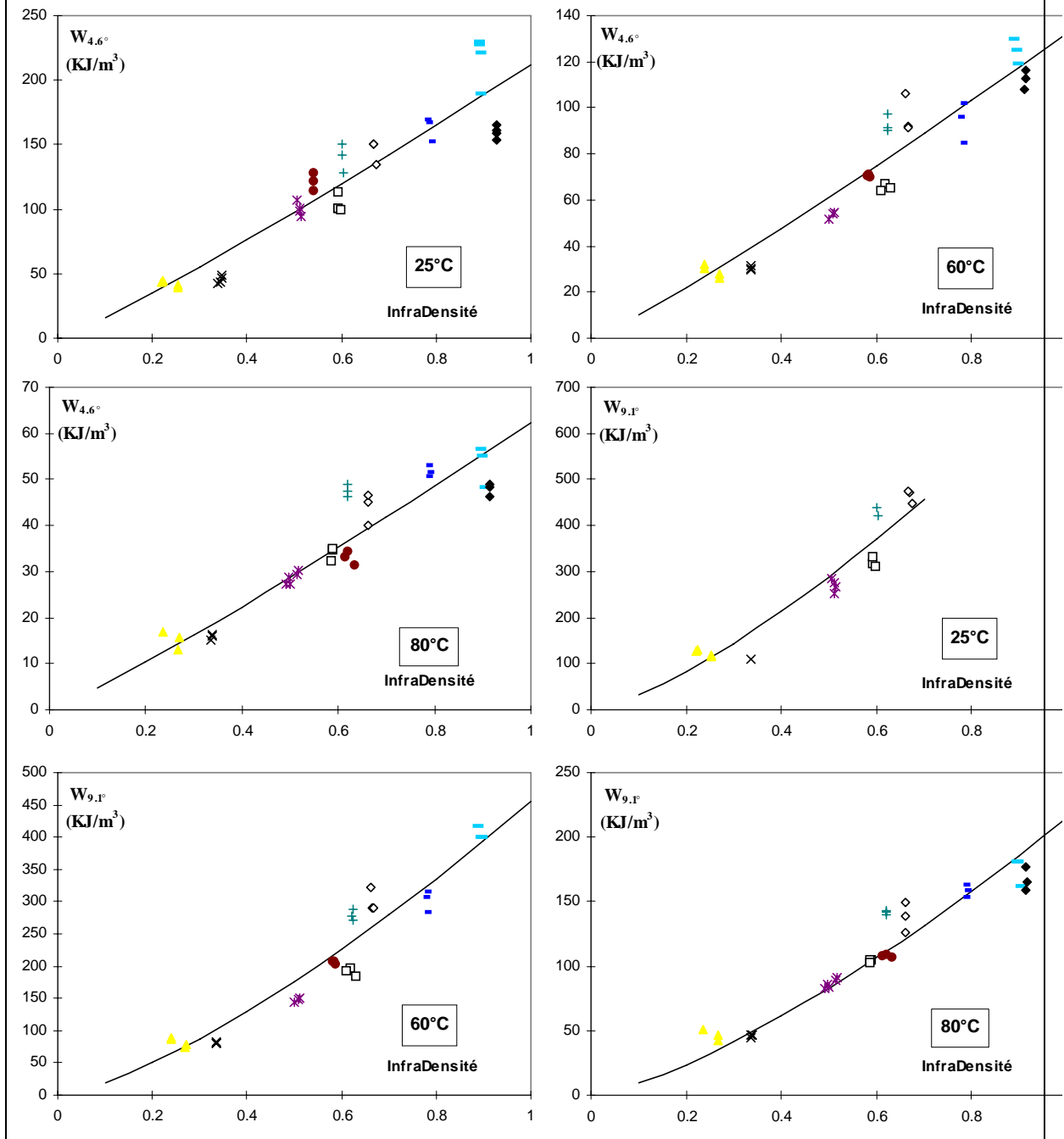
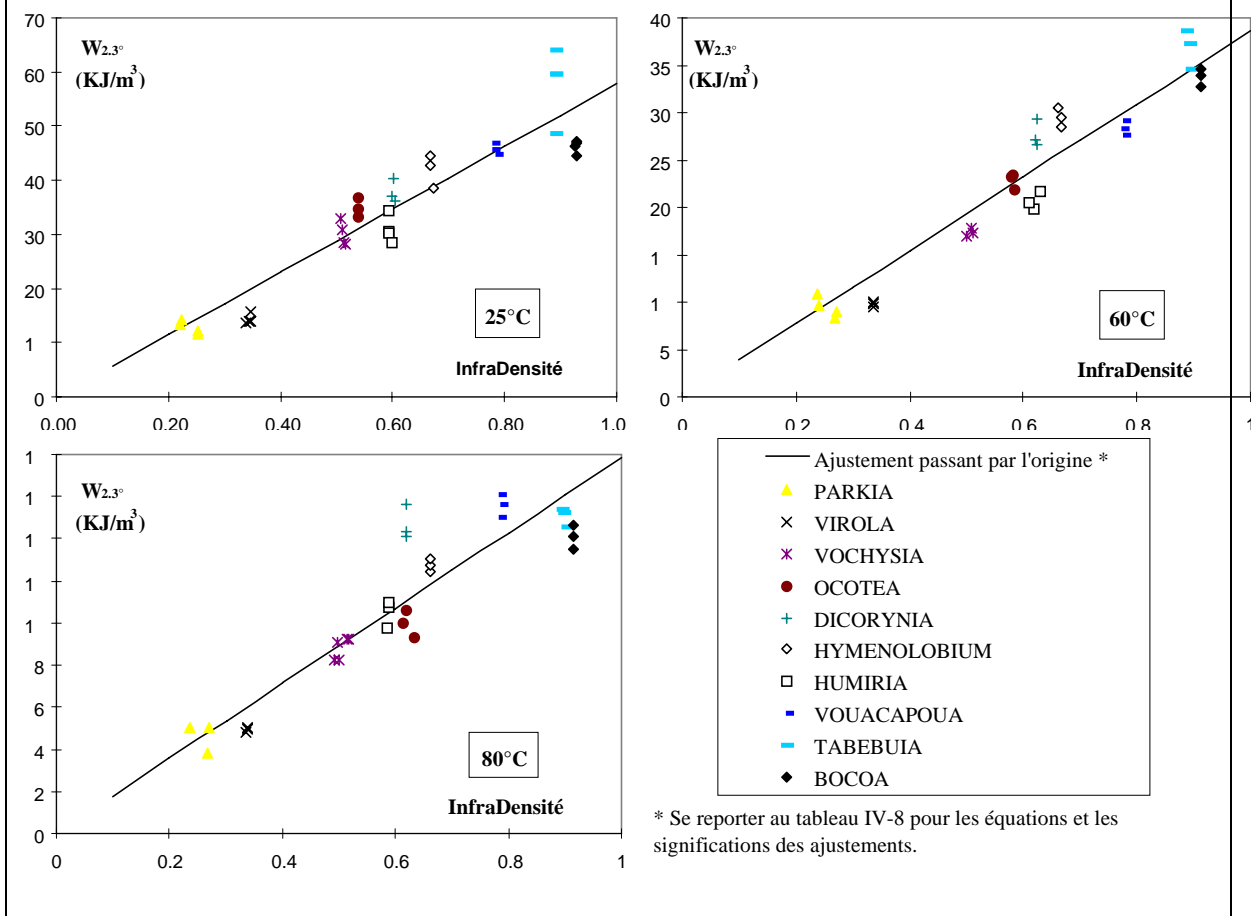


Figure IV - -30 Exemple d'ajustements de $W_{2,3}$ en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes



IV - 1.2.2. Module équivalent G_{re}

Le module équivalent G_{re} est très lié à la densité de façon presque linéaire (graphique Figure IV - -31) :

$$G_{re} = b_{15} ID^{1.05} \quad ID = \text{infradensité}$$

Les valeurs des variables b_i (MPa) et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau IV - -14.

Tableau IV - -15 Valeurs des variables des ajustements aux 12 températures d'essai, à gauche, ajustement du module équivalent (G_{re}) en MPa, au centre, ajustement de la contrainte à la rupture cisaillement (τ_r) en MPa, à droite, ajustement de l'angle de rupture en cisaillement (γ_r) en °.

T°C	a_{cst}	b_{15}	R^2
25	1.05	75.2	0.91
30	1.05	74.0	0.91
35	1.05	71.0	0.92
40	1.05	67.6	0.95
45	1.05	65.8	0.91
50	1.05	62.3	0.94
55	1.05	58.2	0.93
60	1.05	52.4	0.93
65	1.05	44.7	0.91
70	1.05	35.2	0.84
75	1.05	29.3	0.86
80	1.05	24.1	0.82
\bar{R}^2			0.9031

a_{cst}	b_{16}	R^2
1.35	6.6	0.86
1.35	6.6	0.88
1.35	6.4	0.88
1.35	6.1	0.90
1.35	5.8	0.87
1.35	5.4	0.88
1.35	4.8	0.87
1.35	4.2	0.89
1.35	3.6	0.88
1.35	3.0	0.84
1.35	2.6	0.83
1.35	2.3	0.91
		0.8745

a_{cst}	b_{cst}	c_3	R^2
1.00	-4.35	10.65	0.20
1.00	-4.35	11.25	0.32
1.00	-4.35	11.54	0.54
1.00	-4.35	11.88	0.31
1.00	-4.35	12.25	0.27
1.00	-4.35	12.18	0.19
1.00	-4.35	12.94	0.43
1.00	-4.35	13.11	0.52
1.00	-4.35	13.75	0.47
1.00	-4.35	14.53	0.23
1.00	-4.35	14.93	0.37
1.00	-4.35	15.11	0.35
			0.3505

Figure IV - -32 Exemple d'ajustements de G_{re} en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes

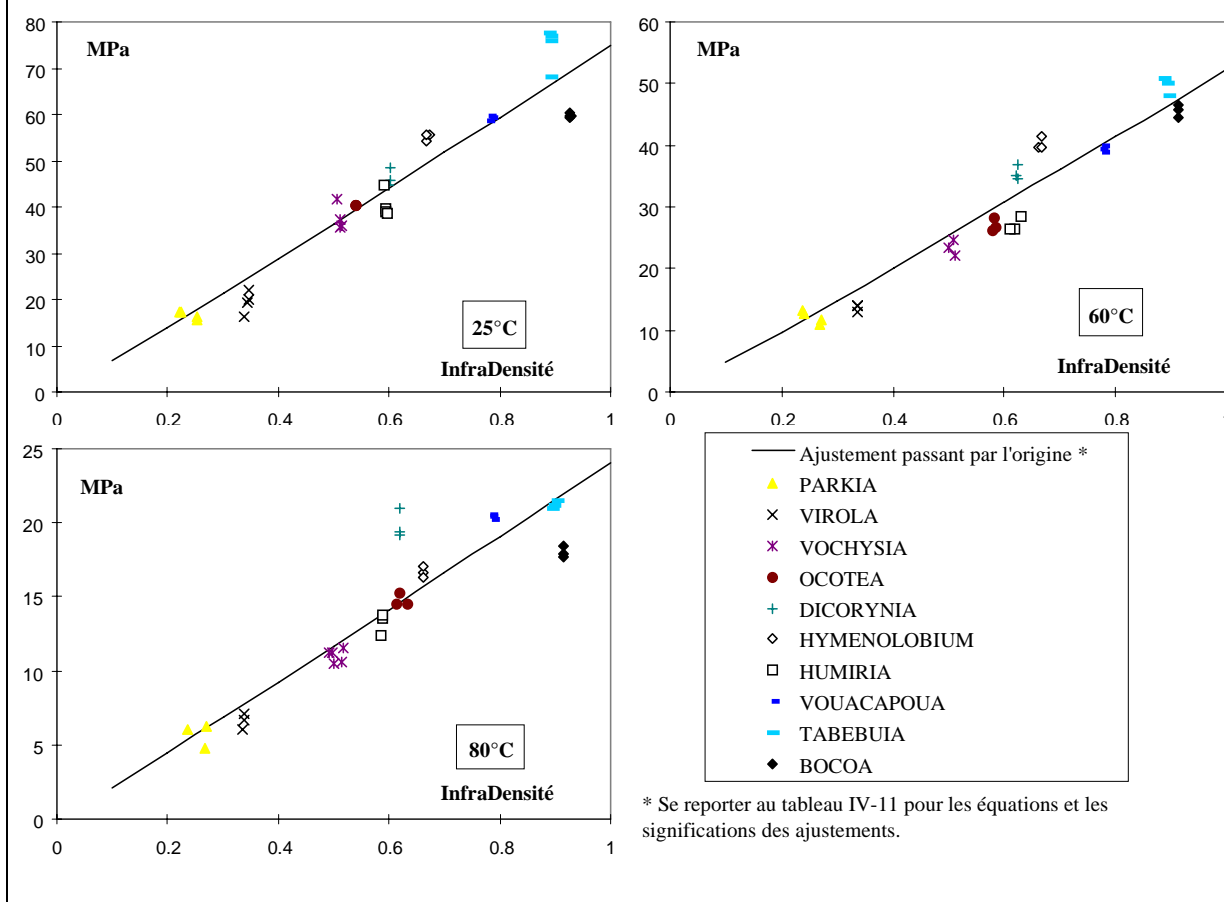


Figure IV - -33 Exemple d'ajustements de τ_r en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes

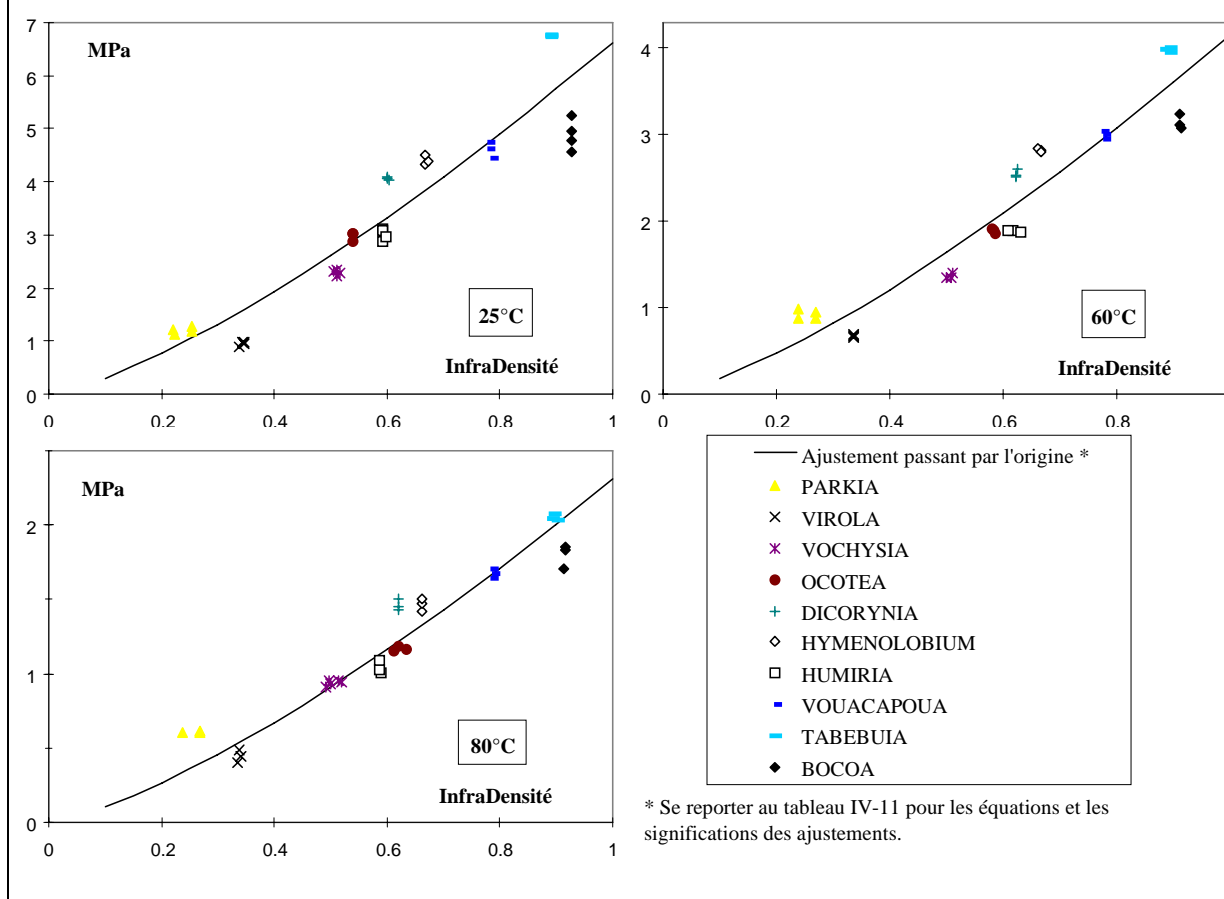
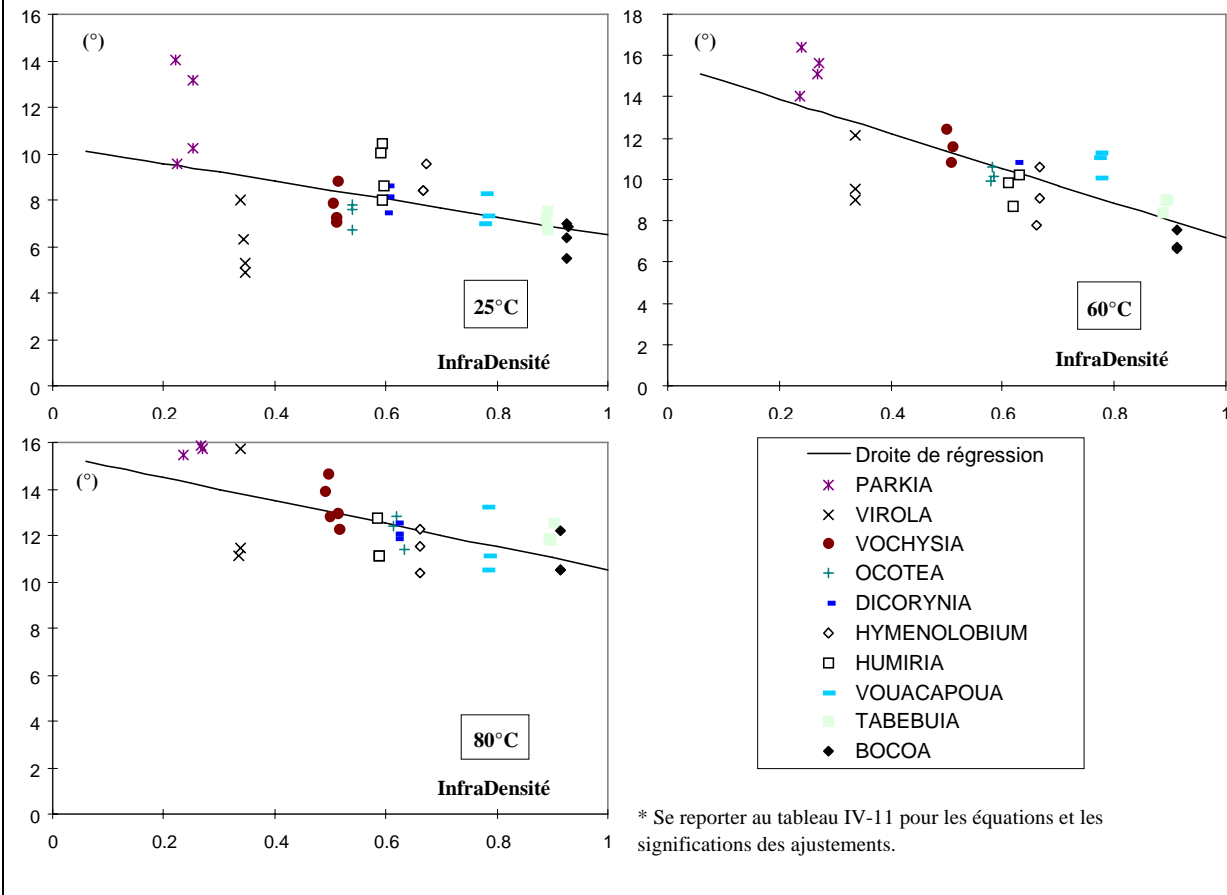


Figure IV - -34 Exemple d'ajustements de γ_r en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes

IV - 1.2.3. Contrainte à la rupture τ_r

La contrainte à la rupture τ_r est très liée à la densité (figure IV-12), la famille de courbes d'ajustement ressemble à celle de $W_{9,1^\circ}$.

$$\tau_r = b_{16} \text{ID}^{1.35}$$

Les valeurs des variables b_i (MPa) et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau Figure IV - -35

IV - 1.2.4. Angle à la rupture γ_r

L'angle à la rupture est moins bien lié à la densité que les descripteurs précédents, toute fois γ_r décroît significativement (au moins au seuil de 1 %, $R^2 = 0.2$) quand l'infradensité augmente (figure du Tableau IV - -16). Une famille de représentation linéaire peut être utilisée :

$$\gamma_r = -4.35 \text{ID} + c_5$$

ID = infradensité

Les valeurs des variables b_i , c_i et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau Figure IV - -36

IV - 1.2.5. Synthèse

Nous pouvons proposer pour résumer le comportement du bois en cisaillement RT, les familles de courbes suivantes :

- des droites passant par l'origine pour Gre, $W_{2.3^\circ}$ et $W_{4.6^\circ}$,
- et une fonction puissance d'exposant 1.35 pour $W_{9,1^\circ}$ et τ_r (tableau IV - -17).

Tableau IV - 18 Valeurs des variables b_{12} , b_{13} , b_{14} , b_{15} et b_{16} pour les familles de courbes simplifiées.

T°C	a _{cst}	b ₁₂	R ²	a _{cst}	b ₁₃	R ²	a _{cst}	b ₁₄	R ²	a _{cst}	b ₁₅	R ²	a _{cst}	b ₁₆	R ²
25	1	57.8	0.88	1	203	0.85	1.35	738	0.90	1	73.9	0.91	1.35	6.63	0.86
30	1	55.9	0.86	1	197	0.86	1.35	736	0.91	1	72.7	0.91	1.35	6.58	0.88
35	1	52.6	0.90	1	187	0.88	1.35	695	0.88	1	69.7	0.92	1.35	6.38	0.88
40	1	50.0	0.92	1	179	0.88	1.35	661	0.90	1	66.4	0.94	1.35	6.09	0.90
45	1	49.0	0.86	1	173	0.85	1.35	608	0.88	1	64.7	0.91	1.35	5.82	0.87
50	1	46.2	0.90	1	159	0.85	1.35	574	0.88	1	61.2	0.94	1.35	5.36	0.88
55	1	42.3	0.92	1	144	0.88	1.35	524	0.90	1	57.1	0.93	1.35	4.83	0.87
60	1	38.7	0.91	1	127	0.89	1.35	452	0.91	1	51.5	0.92	1.35	4.16	0.89
65	1	32.4	0.86	1	107	0.87	1.35	374	0.92	1	44.0	0.90	1.35	3.57	0.88
70	1	25.9	0.83	1	86	0.86	1.35	293	0.87	1	34.6	0.85	1.35	2.98	0.84
75	1	21.6	0.83	1	72	0.86	1.35	247	0.86	1	28.8	0.87	1.35	2.59	0.83
80	1	17.8	0.82	1	60	0.86	1.35	213	0.89	1	23.7	0.82	1.35	2.31	0.91
\bar{R}^2			0.873			0.866			0.892			0.902			0.874

IV - 1.3. Rôle de l'infradensité sur l'essai de ténacité en mode I

Dans l'ensemble, les relations entre les descripteurs de l'essai de ténacité et la densité sont moins bonnes que les deux autres essais décrits précédemment. C'est une constatation que l'on retrouve dans les travaux de BAILLERES (1994) ou ceux de SMITH et CHUI (1994).

IV - 1.3.1. Energie de rupture $G_{f,I}$

Tableau IV - 19 Valeurs des variables des ajustements de $G_{f,I}$ aux 12 températures

T°C	a _{cst}	b ₁₈	R ²	a _{cst}	b ₁₉	c ₆	R ²
25	0.42	417.2	0.49	1.00	334.6	126.10	0.49
30	0.42	399.5	0.57	1.00	294.6	137.00	0.55
35	0.42	403.4	0.50	1.00	277.3	151.43	0.46
40	0.42	391.9	0.32	1.00	194.2	195.51	0.27
45	0.42	424.6	0.32	1.00	205.5	214.66	0.25
50	0.42	428.8	0.24	1.00	196.5	224.63	0.33
55	0.42	412.0	0.42	1.00	213.8	199.02	0.38
60	0.42	441.5	0.27	1.00	213.5	223.84	0.33
65	0.42	461.6	0.31	1.00	294.7	187.71	0.39
70	0.42	442.5	0.29	1.00	278.2	182.65	0.24
75	0.42	445.7	0.26	1.00	317.5	159.65	0.34
80	0.42	375.3	0.24	1.00	218.6	166.62	0.20
\bar{R}^2			0.3514				0.3518

La liaison entre l'énergie de rupture et la densité n'est pas très forte, toutefois $G_{f,I}$ croit toujours significativement (au moins au seuil de 1 %) quand l'infradensité augmente (figure IV - 1). L'analyse a été faite avec deux familles de courbes :

$$G_{f,I} = b_{18} ID^{0.42}$$

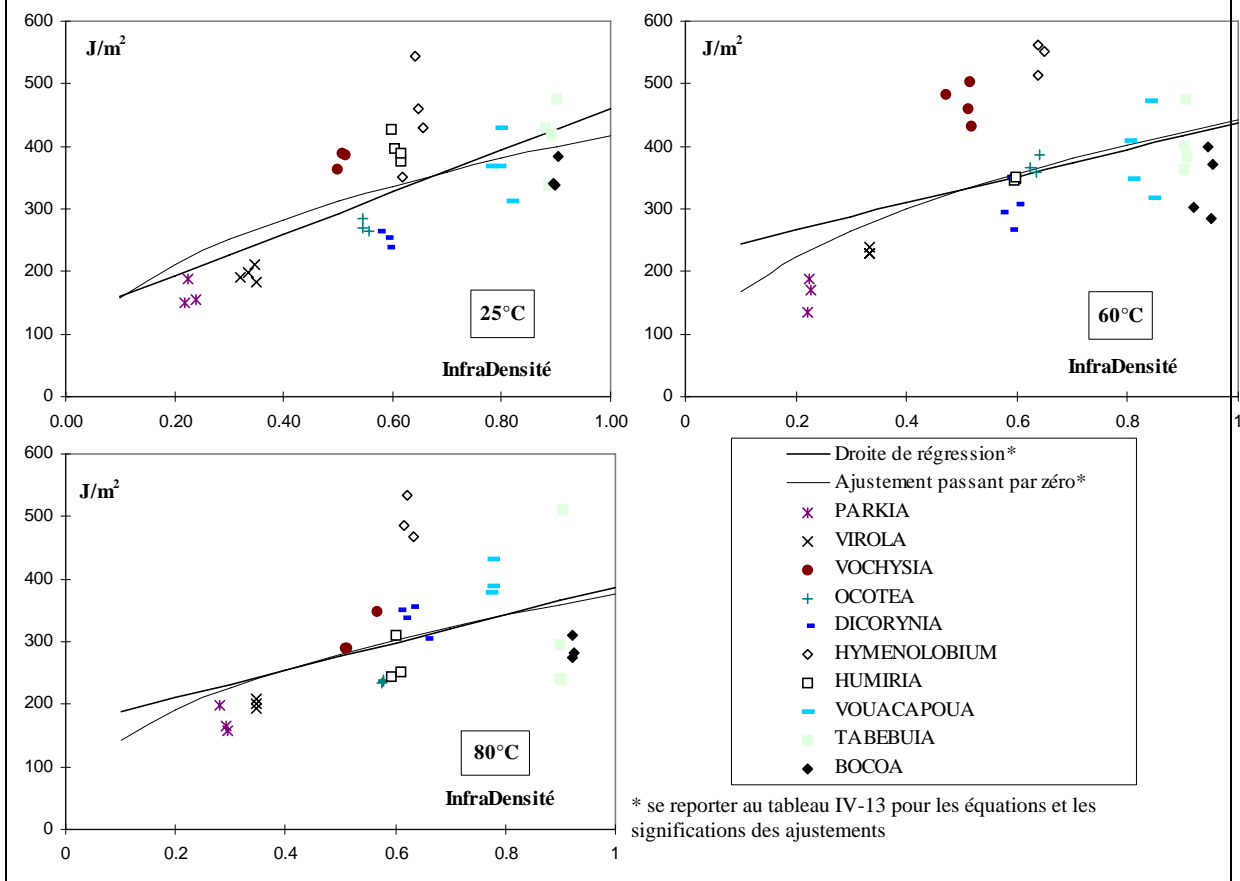
ou $G_{f,I} = b_{19} ID + c_6$

ID = infradensité

Les valeurs des variables b_i et c_i et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau IV - 19 (unités en J/m²). Il faut noter la mauvaise corrélation pour les températures élevées, due aux faibles valeurs

d'énergie de rupture mesurées pour les bois les plus denses à ces températures (voir annexe I-3).

Figure IV - -38 Exemple d'ajustements de $G_{f,I}$ en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes



IV - 1.3.2. Module équivalent $P_{f,I}$

Tableau IV - -2 Valeurs des variables des ajustements de $P_{f,I}$ aux 12 températures

T°C	a_{cst}	b_{20}	R^2	a_2	b_{21}	R^2
25	0.64	745	0.79	1.02	855	0.85
30	0.64	703	0.76	1.04	812	0.81
35	0.64	687	0.78	0.97	777	0.79
40	0.64	637	0.74	0.86	682	0.75
45	0.64	601	0.83	0.93	663	0.89
50	0.64	534	0.69	0.82	565	0.70
55	0.64	474	0.82	0.86	511	0.84
60	0.64	426	0.76	0.81	449	0.76
65	0.64	368	0.76	0.82	393	0.76
70	0.64	313	0.71	0.67	316	0.71
75	0.64	254	0.45	0.52	241	0.53
80	0.64	204	0.04	0.40	184	0.33
\overline{R}^2			0.6763			0.7255

La liaison entre le module équivalent $P_{f,I}$ et la densité est meilleure que $G_{f,I}$ (figure IV - -39). Deux familles de courbes sont proposées :

$$P_{f,I} = b_{20} ID^{0.64}$$

ou
$$P_{f,I} = b_{21} ID^{a_2}$$

$$ID = \text{infradensité}$$

Les valeurs des variables b_i et c_i et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau IV - -40 (unités en MPa).

L'ajustement à puissance variable améliore les corrélations entre les critères, mais il permet surtout de visualiser l'évolution de la courbe d'ajustement en fonction de la température (figure IV - -41). Nous remarquons que plus la température augmente, moins $P_{f,I}$ est sensible à la

variation de densité. A 80°C, $P_{f,I}$ croît peu quand la densité augmente. Dans notre échantillonnage plus la température est élevée, moins la pente élastique de l'essai de ténacité est sensible à la densité.

Figure IV - 42 Evolution de l'allure de la courbe d'ajustement de $P_{f,I} : f(ID)$ en fonction de la température. Pour plus de lisibilité chaque courbe est décalée de 0.1ID

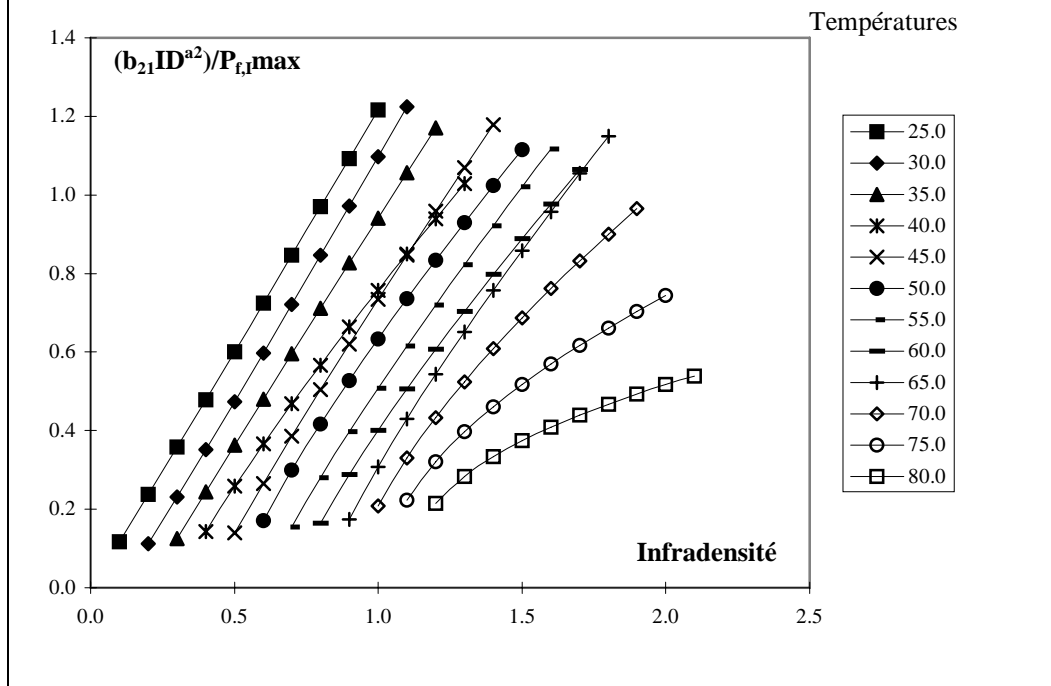
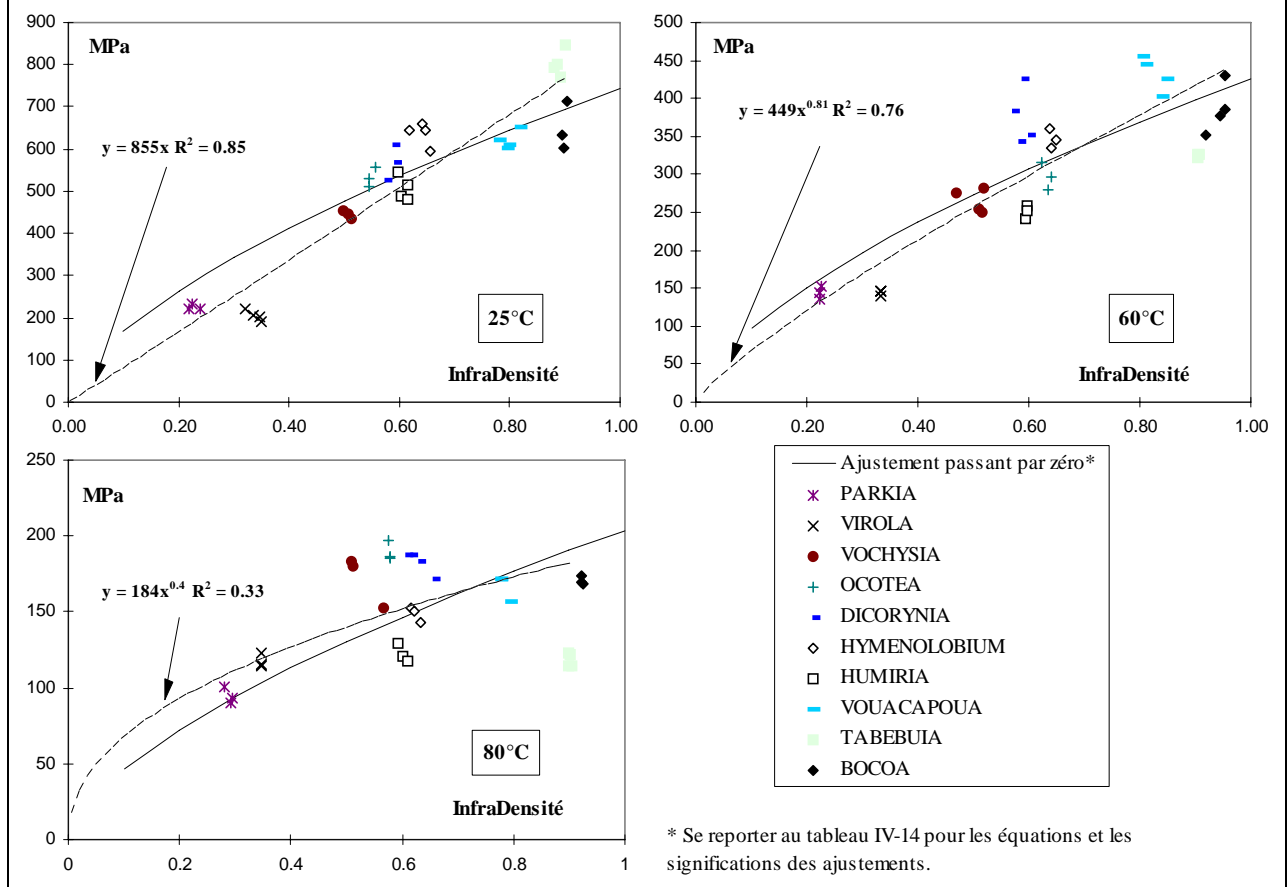


Figure IV - 43 Exemple d'ajustements de $P_{f,I}$ en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes



IV - 1.3.3. Contrainte à la rupture $\sigma_{r,I}$

Tableau IV - -3 Valeurs des variables des ajustements de $\sigma_{r,I}$ aux 12 températures

T°C	a _{cst}	b ₂₂	R ²	a ₃	b ₂₃	R ²
25	0.67	11.0	0.82	0.92	12.2	0.83
30	0.67	10.4	0.84	0.94	11.8	0.84
35	0.67	10.4	0.83	0.85	11.3	0.81
40	0.67	10.1	0.86	0.79	10.4	0.85
45	0.67	9.6	0.82	0.81	10.1	0.81
50	0.67	9.2	0.73	0.76	9.4	0.71
55	0.67	8.5	0.78	0.80	8.8	0.76
60	0.67	7.9	0.77	0.78	8.1	0.75
65	0.67	7.2	0.71	0.86	7.7	0.68
70	0.67	6.3	0.68	0.76	6.6	0.64
75	0.67	5.5	0.51	0.69	5.5	0.55
80	0.67	4.7	0.47	0.67	4.6	0.56

La liaison entre $\sigma_{r,I}$ et la densité ressemble à la précédente. Les mêmes types de familles de courbes sont proposés :

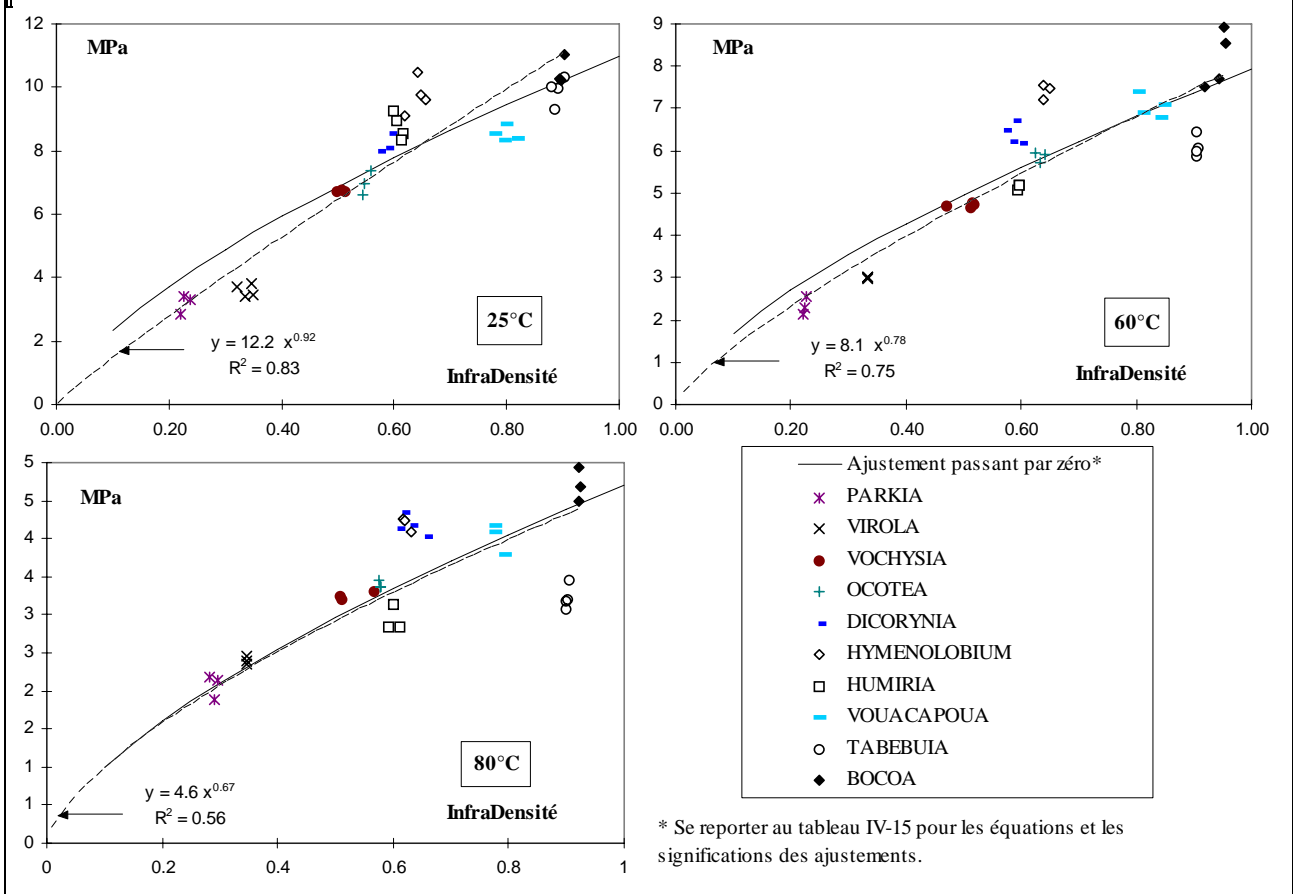
$$\sigma_{r,I} = b_{22} ID^{0.67}$$

ou $\sigma_{r,I} = b_{23} ID^{a_3}$

ID = infradensité

Les valeurs des variables b_i et a_i et la signification des ajustements aux différentes températures sont données dans le tableau IV - -44. Comme pour le module équivalent, la famille de courbes à puissance variable permet de visualiser l'influence couplée de la température et de la densité sur la ténacité des essences testées.

Figure IV - -45 Exemple d'ajustements de $\sigma_{r,I}$ en fonction de l'infradensité pour trois températures différentes



IV - 1.3.4. Flèche à la rupture $f_{r,I}$

Dans nos essais, la flèche à la rupture ne semble pas être liée à la densité (Annexe I-3). La flèche moyenne toutes densités et toutes températures confondues est de 1.2 mm. Nous verrons plus loin que cette flèche évolue quand la température augmente.

IV - 2. Influence de la température sur les différentes propriétés mécaniques

En règle générale, les propriétés mécaniques diminuent quand la température augmente et cette variation n'est pas linéaire avec la température. Compte tenu de l'allure générale des relations observées (annexe II), nous avons choisi un ajustement assez simple des descripteurs d'essai en fonction de la température. Cet ajustement est de type : tangente hyperbolique. Le modèle que nous appellerons (A) est défini par :

$$(A) \quad C = \frac{C_1 + C_0}{2} - \frac{C_1 - C_0}{2} \tanh \left[a \frac{T - T_P}{T_P} \right]$$

où C est le descripteur de l'essai,
T température de l'essai en (°C),
T_P température de transition du modèle,
a facteur d'étalement de la courbe,
C₀, C₁ : ordonnées des deux asymptotes

Ce modèle possède deux asymptotes C₁ et C₀ (pour des températures très élevées et très basses) et un point d'inflexion correspondant au maximum de la dérivée locale pour T = T_P. Il permet d'estimer simplement une température de transition éventuelle (T_P) dans le phénomène. Bien entendu un tel modèle ne peut décrire qu'une seule température de transition ce qui semble être plutôt le cas, en première estimation des résultats obtenus. Le facteur « a » est un paramètre d'étalement qui permet de rendre compte de la plus ou moins grande « brutalité » de la transition.

Pour optimiser les 4 paramètres C₀, C₁, T_P et a sur un jeu de données expérimentales C_i, T_i, il a été procédé par itérations en utilisant à nouveau le solveur de Microsoft Excel (version 5.0) avec la procédure et les constantes suivantes :

- création d'une nouvelle variable $C' = \text{Arctanh} \left[\frac{C_1 + C_0 - 2C}{C_1 - C_0} \right]$

une fois choisies 2 valeurs initiales C₀ et C₁,

- cette nouvelle variable est reliée par la relation, $C' = a \frac{T - T_P}{T_P} = \frac{a}{T_P} T - a$, une régression linéaire entre

C' et T permet d'obtenir une estimation de a et de T_P.

- Les contraintes suivantes sont mises sur les valeurs C₀ et C₁ :

$$0.5C_{\min} \leq C_1 \leq C_{\min}$$

$$C_{\max} \leq C_0 \leq 1.1C_{\max}$$

où C_{min} et C_{max} sont respectivement les valeurs « minima » et « maxima » des données expérimentales analysées. Le solveur propose une solution (a, T_P, C₀, C₁) qui maximise le coefficient de détermination R² entre les données expérimentales et les données calculées en effectuant au moins 100 itérations.

Dans les différents ajustements de cette partie, le nombre de degrés de liberté minimum par régression est de 35 (entre 36 et 41 observations par essence). Le seuil de signification à 1 % du coefficient de détermination R² est de 0,27 et le seuil de signification à 1 % est de 0,18.

IV - 2.1. Rôle de la température sur l'essai de compression radiale

Si nous excluons la déformation à la rupture qui a un comportement spécifique, les autres descripteurs ont été ajustés sur la base du modèle (A).

IV - 2.1.1. Energies de compression W_{ε%}

L'énergie de compression est très liée à la température d'essai et les ajustements de W_{ε%} sur la base du modèle (A) sont très « propres » quel que soit le taux de compression (figure IV - -1). Les valeurs des variables de (A) pour chaque essence sont données dans le tableau IV - -2.

$$(A) \Leftrightarrow W_{\varepsilon\%} = \frac{W_{\varepsilon\%1} + W_{\varepsilon\%0}}{2} - \frac{W_{\varepsilon\%1} - W_{\varepsilon\%0}}{2} \tanh \left[a \frac{T - T_P}{T_P} \right]$$

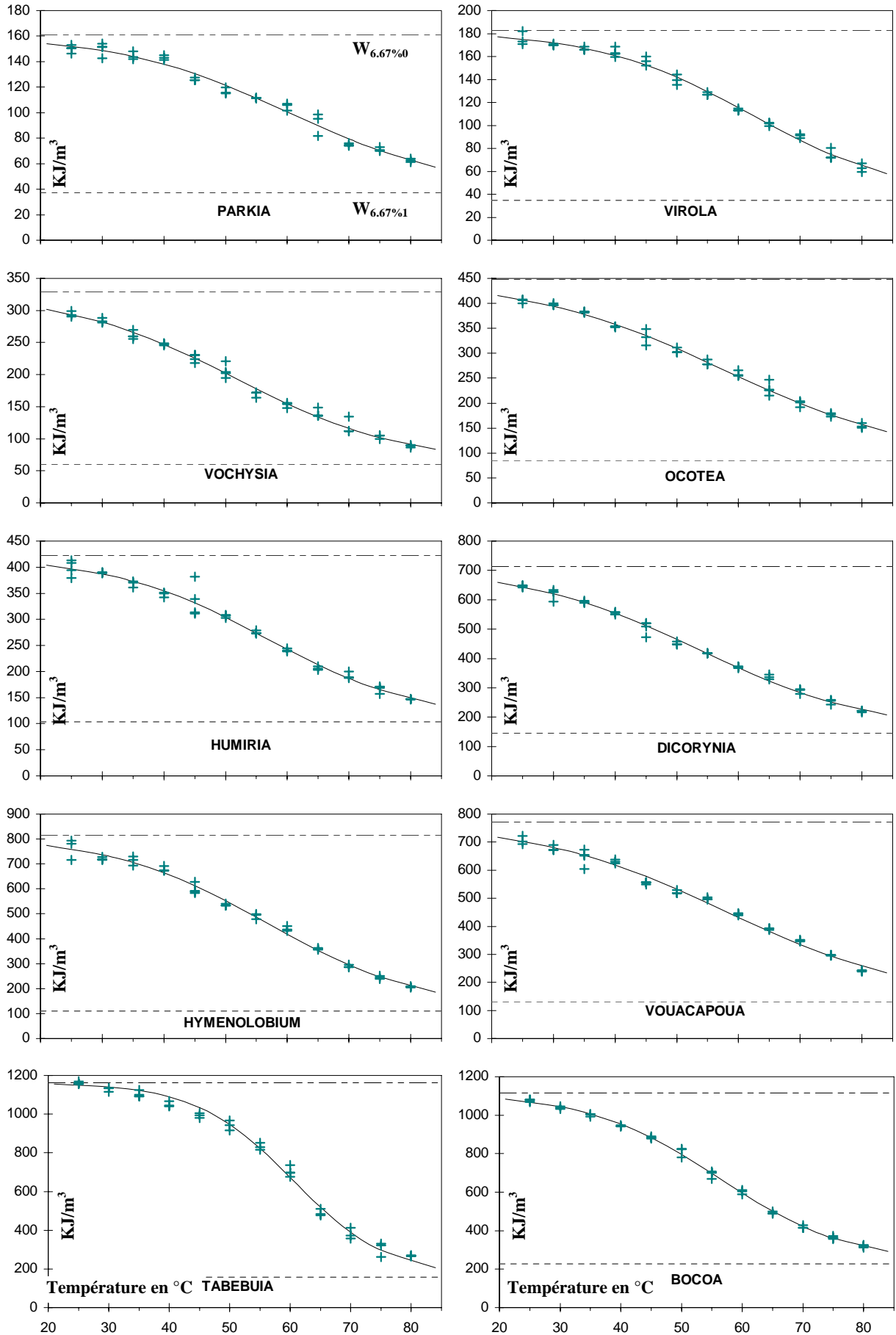
Tableau IV - -15 Valeurs des variables du modèle (A) en kJ/m³ et signification des ajustements pour les trois énergies de compression et les dix essences testées. (ID = infradensité moyenne par essence).

Essence	ID	W _{6.7%1}	W _{6.7%0}	a	T _P	R ²	W _{6.7%0} / W _{6.7%1}
<i>Parkia</i>	0.20	37	161	2.14	61	0.982	4.3
<i>Virola</i>	0.35	35	183	2.43	62	0.992	5.2
<i>Vochysia</i>	0.50	59	329	1.84	52	0.990	5.5
<i>Ocotea</i>	0.58	86	448	1.81	58	0.993	5.2
<i>Humiria</i>	0.60	104	422	2.23	57	0.983	4.1
<i>Dicorynia</i>	0.62	144	714	1.85	54	0.994	4.9
<i>Hymenolobium</i>	0.66	110	814	2.21	57	0.991	7.4
<i>Vouacapoua</i>	0.79	132	771	1.86	58	0.988	5.8
<i>Tabebuia</i>	0.90	157	1163	3.76	60	0.993	7.4
<i>Bocoa</i>	0.91	228	1116	2.60	56	0.998	4.9

Essence	ID	W _{13%1}	W _{13%0}	a	T _P	R ²	W _{13%0} / W _{13%1}
<i>Parkia</i>	0.20	68	371	1.84	60	0.983	5.4
<i>Virola</i>	0.35	80	388	2.32	62	0.993	4.9
<i>Vochysia</i>	0.50	140	716	1.80	51	0.988	5.1
<i>Ocotea</i>	0.58	213	920	1.86	56	0.994	4.3
<i>Humiria</i>	0.60	239	935	1.97	56	0.990	3.9
<i>Dicorynia</i>	0.62	382	1519	1.80	52	0.993	4.0
<i>Hymenolobium</i>	0.66	259	1806	2.02	56	0.993	7.0
<i>Vouacapoua</i>	0.79	283	1618	1.81	58	0.984	5.7
<i>Tabebuia</i>	0.90	368	2470	3.05	63	0.987	6.7
<i>Bocoa</i>	0.91	716	2669	2.53	58	0.998	3.7

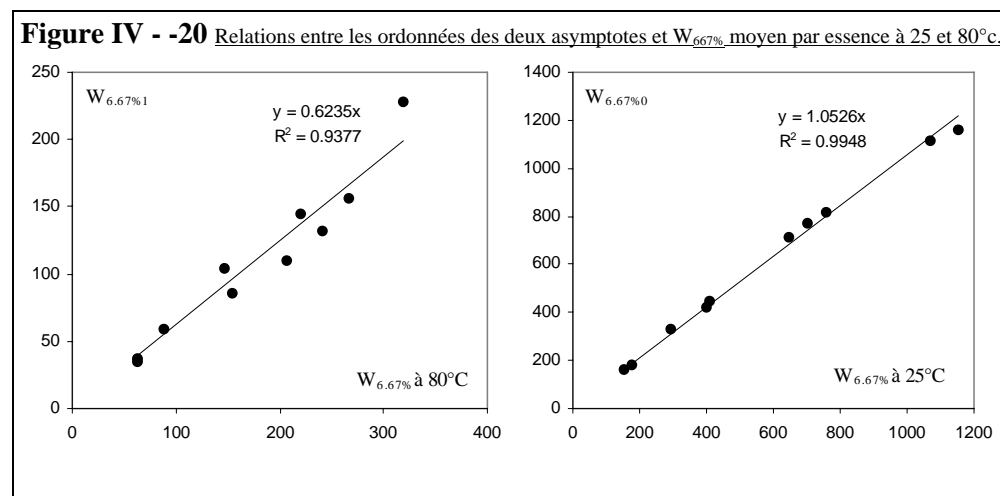
Essence	ID	W _{20%1}	W _{20%0}	a	T _P	R ²	W _{20%0} / W _{20%1}
<i>Parkia</i>	0.20	119	551	1.87	61	0.972	4.6
<i>Virola</i>	0.35	119	621	2.12	61	0.993	5.2
<i>Vochysia</i>	0.50	238	1153	1.80	51	0.983	4.8
<i>Ocotea</i>	0.58	337	1424	1.83	56	0.995	4.2
<i>Humiria</i>	0.60	384	1504	1.85	57	0.993	3.9
<i>Dicorynia</i>	0.62	604	2411	1.66	52	0.992	4.0
<i>Hymenolobium</i>	0.66	452	2925	1.89	55	0.994	6.5
<i>Vouacapoua</i>	0.79	460	2526	1.83	59	0.983	5.5
<i>Tabebuia</i>	0.90	657	3987	2.69	64	0.984	6.1
<i>Bocoa</i>	0.91	1003	4398	1.86	62	0.993	4.4

Figure IV - -19 Evolution de $W_{6.67\%}$ en fonction de la température pour les dix essences, les asymptotes en zéro et à l'infini sont représentées en pointillés.



Evolution des variables de (A) en fonction de la densité et de l'essence

Les deux asymptotes, $W_{\varepsilon\%0}$ et $W_{\varepsilon\%1}$ sont bien liées à l'infradensité et elles évoluent de la même manière que $W_{\varepsilon\%}$. Par contre, la température de transition « T_p », l'amplitude horizontale « a » et l'amplitude verticale « $W_{\varepsilon\%0} / W_{\varepsilon\%1}$ » ne sont pas corrélées à l'infradensité.



Certaines essences comme *Tabebuia* ou *Hymenolobium* ont de fortes amplitudes¹³ de variation quand la température varie ; d'autres comme *Dicorynia* sont relativement moins influencées par la variation de température. De même certaines essences semblent avoir une température de transition plus basse ou plus forte par rapport à la moyenne [$\bar{T}_p = 57.5$ °C (CV* = 6.6 %) toutes essences et tous taux de compression confondus].

Lorsque le taux de compression croit de 6.67 % à 20 %, la moyenne du coefficient de variation¹⁴ (CV*) toutes essences confondues décroît de 2.3 (25 %) à 1.9 (14 %) pour « a » et de 5.5 (20 %) à 4.9 (17 %) pour « $W_{\varepsilon\%0} / W_{\varepsilon\%1}$ ».

IV - 2.1.2. Module équivalent E_{re} (tableau IV - -1)

La variabilité de E_{re} est plus forte que celle de $W_{\varepsilon\%}$, et les étalements horizontaux et verticaux sont plus élevés. Le facteur d'étalement « a » moyen vaut 3.1 (15 %) et l'amplitude verticale « E_{re0} / E_{re1} » moyenne vaut 7.5 (30 %). La température de transition moyenne 58.3 °C (5.5%) est un peu plus élevée que celle déterminée par l'énergie de compression. Toutefois, la valeur de T_p de l'essence *Parkia* est à prendre avec précaution, étant donné l'amplitude du nuage de point (figure IV - -21).

Tableau IV - -2 Valeurs des variables du modèle (A) en MPa et signification des ajustements pour le module équivalent E_{re} , (ID = infradensité).

Essence	ID	$E_{re\infty}$	E_{re0}	a	T_p	R^2	$E_{re0} / E_{re\infty}$
<i>Parkia</i>	0.20	74	251	2.44	65	0.8479	3.4
<i>Viola</i>	0.35	62	313	3.32	62	0.9057	5.1
<i>Vochysia</i>	0.50	86	610	3.00	54	0.9106	7.0
<i>Ocotea</i>	0.58	99	1077	2.80	57	0.9666	10.8
<i>Humiria</i>	0.60	89	758	3.43	61	0.9339	8.6
<i>Dicorynia</i>	0.62	155	1202	2.18	55	0.9189	7.7
<i>Hymenolobium</i>	0.66	126	1209	3.50	60	0.9531	9.6
<i>Vouacapoua</i>	0.79	213	1372	3.17	56	0.9668	6.5
<i>Tabebuia</i>	0.90	163	1637	3.36	57	0.9781	10.0
<i>Bocoa</i>	0.91	209	1264	3.50	57	0.9914	6.0

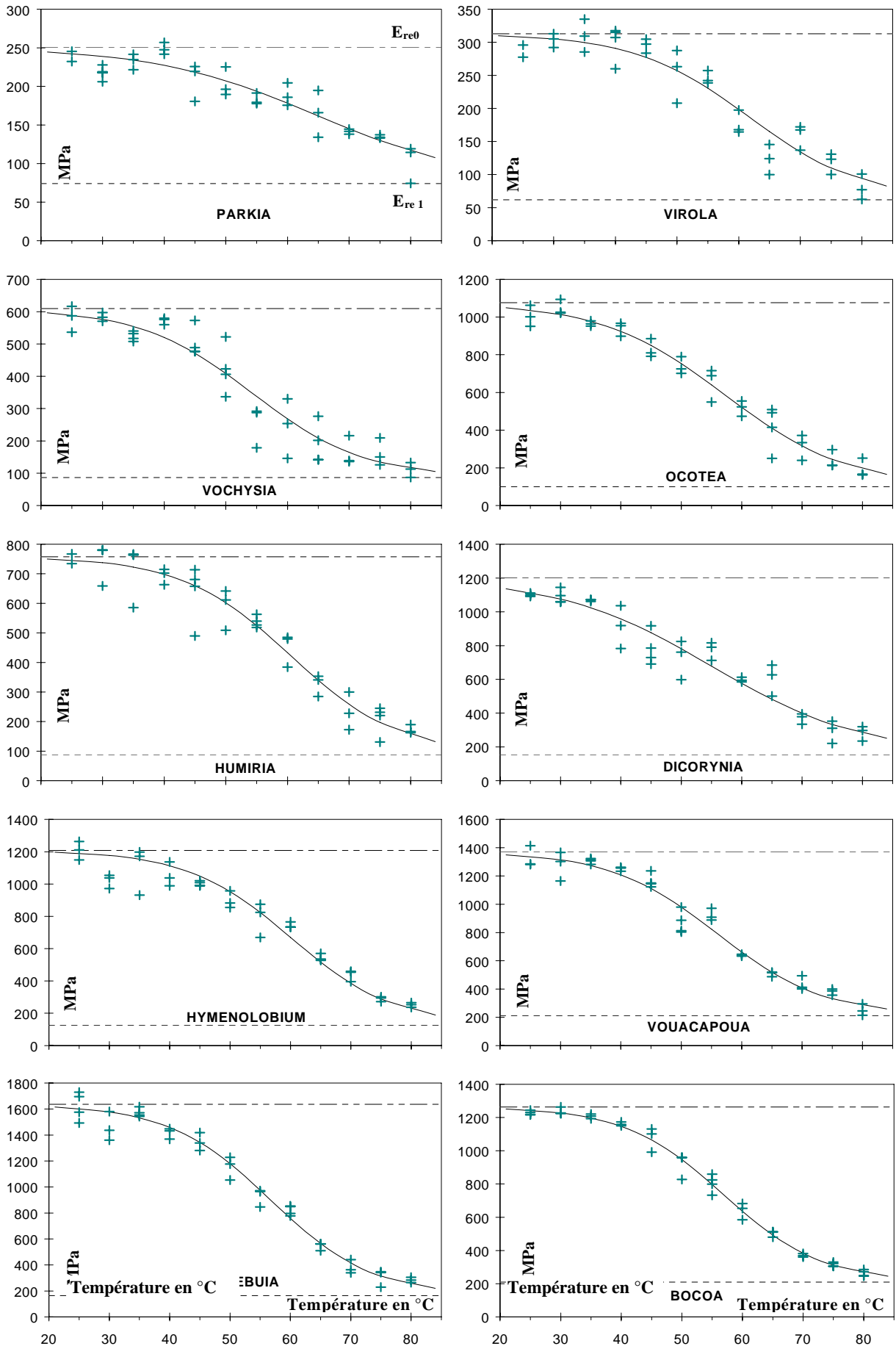
¹³ Plus « a » est grand et plus la transition de la courbe du modèle (A) est brutale et plus « a » est petit, plus la pente de la transition est faible. De même plus le rapport « $W_{\varepsilon\%0} / W_{\varepsilon\%1}$ » est grand, plus le descripteur de l'essence considérée est influencé par la variation de température.

¹⁴ Pour les petites populations, le coefficient de variation est calculé comme suit $C.V.* = (1 + \frac{1}{4n}) \frac{100s_x}{\bar{X}}$

où n est l'effectif de la population, \bar{X} la moyenne et s_x l'écart-type. Lorsque nous donnons une moyenne, le chiffre en pourcentage entre parenthèse qui suit cette moyenne est le coefficient de variation CV*.

Pour les populations dont l'effectif est grand, C.V.* est très proche de $\frac{100s_x}{\bar{X}}$, (d'après SCHENER, 1984).

Figure IV - -22 Evolution de E_{re} en fonction de la température pour les dix essences, les asymptotes en zéro et à l'infini sont représentées en pointillés.



IV - 2.1.3. Contrainte au premier coude σ_y (tableau (Figure IV - -23))

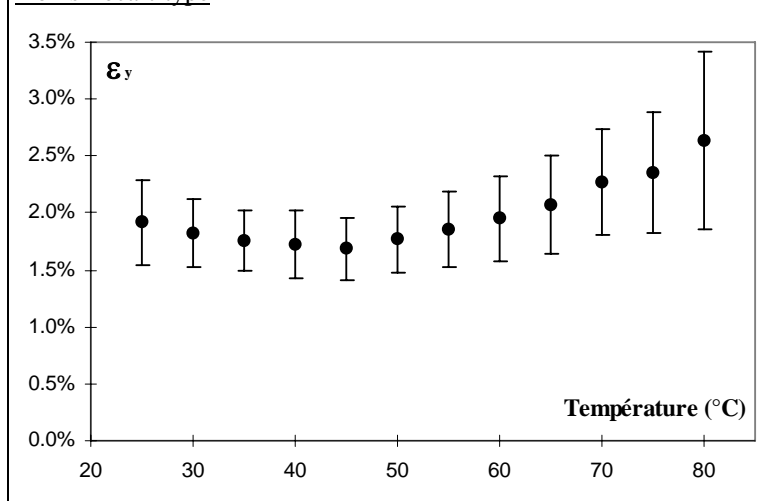
Le modèle s'ajuste très bien sur les points expérimentaux (figure IV - -24). La température de transition moyenne est de 57.4°C (5%), le coefficient d'étalement moyen « a » est de 2.3 (22%) et l'amplitude verticale moyenne est de 6.2 (33%). Ces valeurs sont assez proches de celles obtenues pour l'ajustement de $W_{6.67\%}$. Remarquons cependant la forte amplitude de variation de l'Ebène verte (*Tabebuia*) : $\sigma_{y0} / \sigma_{y\infty} = 11.2$.

Tableau IV - -3 Valeurs des variables du modèle (A) en MPa et signification des ajustements pour la contrainte au premier coude σ_y (ID = infradensité).

Essence	ID	σ_{y1}	σ_{y0}	a	T_P	R^2	$\sigma_{y0} / \sigma_{y1}$
<i>Parkia</i>	0.20	0.53	2.4	1.87	61	0.9743	4.6
<i>Virola</i>	0.35	0.54	3.1	2.36	62	0.9922	5.7
<i>Vochysia</i>	0.50	0.8	5.2	1.81	54	0.9905	6.5
<i>Ocotea</i>	0.58	1.9	7.8	2.19	57	0.9935	4.1
<i>Humiria</i>	0.60	1.6	6.7	2.49	57	0.9868	4.2
<i>Dicorynia</i>	0.62	2.1	12.4	1.80	53	0.9957	5.9
<i>Hymenolobium</i>	0.66	1.8	13.6	2.18	56	0.9863	7.4
<i>Vouacapoua</i>	0.79	2.6	15.1	1.85	58	0.9918	5.9
<i>Tabebuia</i>	0.90	1.6	17.5	3.38	60	0.9908	11.2
<i>Bocoa</i>	0.91	2.7	16.6	2.77	56	0.9961	6.2

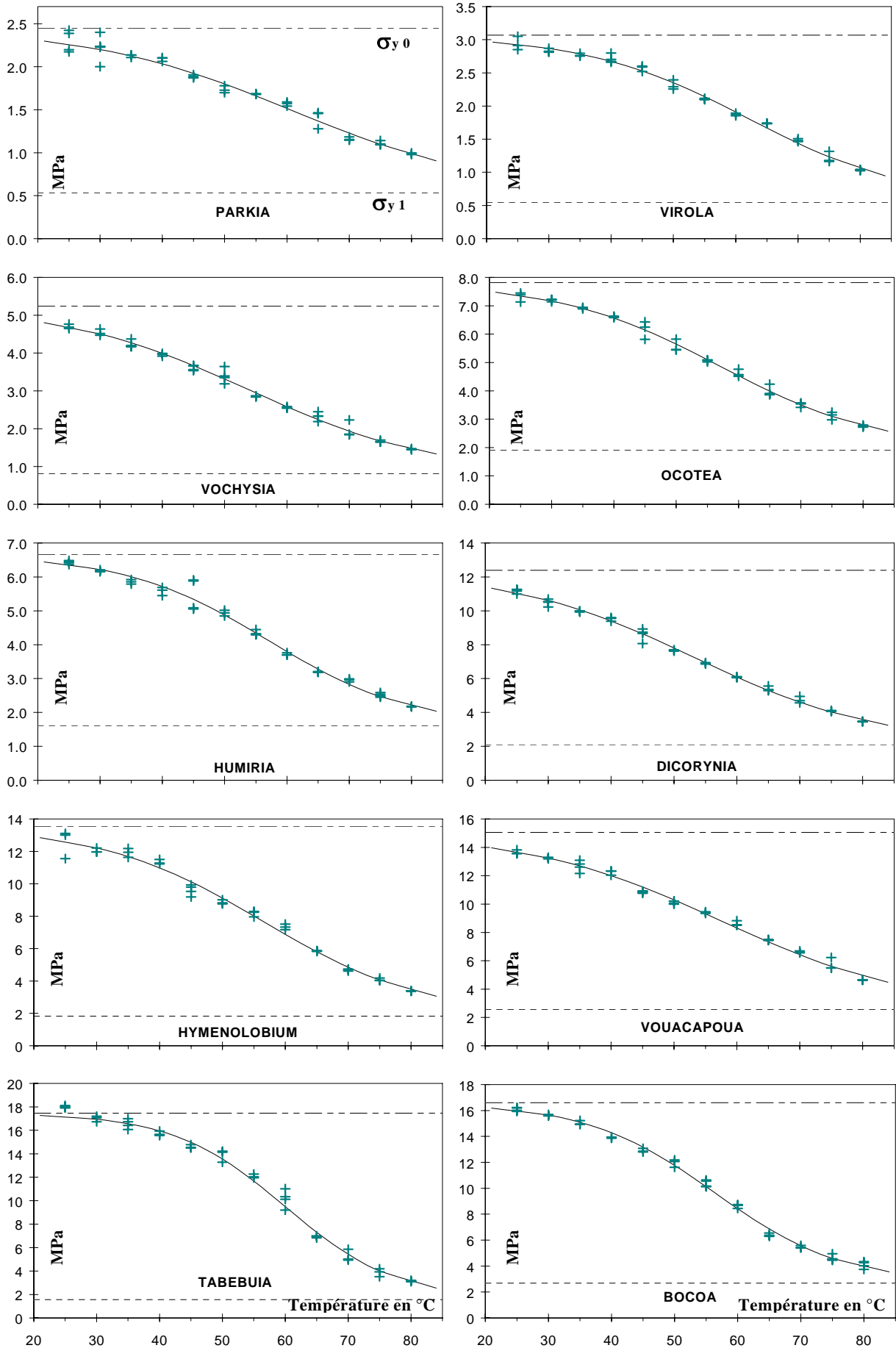
IV - 2.1.4. Déformation au premier coude ϵ_y

Figure IV - -25 Evolution moyenne (toutes essences confondues) d' ϵ_y en fonction de la température. Les barres d'erreurs représentent plus ou moins l'écart-type



L'évolution de ϵ_y en fonction de la température est assez hétérogène suivant les essences (annexe III-1). Pour certaines essences comme *Tabebuia* ou *Humiria*, la déformation ϵ_y est presque toujours la même quel que soit la température ; pour d'autres comme *Ocotea* ou *Vouacapoua*, elle augmente nettement à partir d'une certaine température. Toutefois, si l'on considère la valeur moyenne toutes essences confondues, ϵ_y décroît d'abord légèrement entre 25 et 45°C (de 1.9 à 1.7 %) puis croît avec la température jusqu'à 2.6 % à 80°C (figure IV - -4).

Figure IV - -26 Evolution de σ_y en fonction de la température pour les dix essences, les asymptotes en zéro et à l'infini sont représentées en pointillés



IV - 2.2. Rôle de la température sur l'essai de cisaillement RT

L'angle de cisaillement à la rupture mis à part, les autres descripteurs de l'essai de cisaillement ont été ajustés sur la base du modèle (A).

IV - 2.2.1. Energie de cisaillement W_{γ}

La variabilité de l'énergie de cisaillement est plus forte que celle de l'énergie de compression. Cependant, le modèle (A), paragraphe « IV-3 », décrit assez bien l'évolution de W_{γ} en fonction de la température (figure Figure IV - -27). Les valeurs des différentes variables de (A) et les significations des ajustements sont données dans le tableau

Les autres descripteurs de l'essai (Figure IV - -28) sont :

- 3 énergies par unité de volume cisailé W ° pour des déplacements lors de l'essai de 0.4, 0.8 et 1.6 mm, soit des angles de cisaillement de 2.3, 4.6, 9.1 degrés.

□ La température de transition moyenne pour les trois angles de cisaillement est de 59°C (5 %). Elle est un peu plus élevée pour l'essence *Bocoa* (63°C) où l'énergie de cisaillement n'évolue presque pas jusqu'à la température de 45°C. Par contre, l'espèce *Vochysia* a toujours une température de transition plus faible (53°C).

□ Le coefficient d'étalement « a » moyen est un peu plus élevé que pour l'essai de compression. Il vaut 2.8 (25 %).

□ Le rapport $W_{\gamma^0} / W_{\gamma^1}$ qui représente l'amplitude de variation verticale de la courbe est comparable par sa moyenne, 4.8 (22 %), à celui de l'énergie de compression.

Tableau IV - -5 Valeurs des variables du modèle (A) en kJ/m^3 et signification des ajustements pour les trois énergies de cisaillement et les dix essences testées, (ID = infradensité moyenne par essence).

Essence	ID	$W_{2.3^1}$	$W_{2.3^0}$	a	T_P	R^2	$W_{2.3^0} / W_{2.3^1}$
<i>Parkia</i>	0.25	3.4	13	3.12	65	0.900	3.8
<i>Virola</i>	0.34	4.0	14	3.66	60	0.974	3.6
<i>Vochysia</i>	0.51	4.9	33	2.02	55	0.978	6.8
<i>Ocotea</i>	0.58	5.3	37	1.82	56	0.894	7.0
<i>Humiria</i>	0.59	9.6	31	3.83	59	0.946	3.3
<i>Dicorynia</i>	0.60	11.3	41	3.12	61	0.929	3.6
<i>Hymenolobium</i>	0.67	8.7	44	2.90	60	0.932	5.1
<i>Vouacapoua</i>	0.78	10.5	48	2.26	58	0.967	4.6
<i>Tabebuia</i>	0.89	10.2	58	3.49	59	0.922	5.7
<i>Bocoa</i>	0.92	10.4	46	3.94	63	0.990	4.5

Essence	ID	$W_{4.6^1}$	$W_{4.6^0}$	a	T_P	R^2	$W_{4.6^0} / W_{4.6^1}$
<i>Parkia</i>	0.25	11	43	2.61	62	0.946	4.1
<i>Virola</i>	0.34	11	46	2.57	60	0.977	4.4
<i>Vochysia</i>	0.51	16	114	1.77	51	0.987	7.0
<i>Ocotea</i>	0.58	21	121	1.77	54	0.917	5.8
<i>Humiria</i>	0.59	24	107	2.85	60	0.950	4.5
<i>Dicorynia</i>	0.60	32	149	2.86	61	0.962	4.6
<i>Hymenolobium</i>	0.67	28	157	2.61	59	0.936	5.6
<i>Vouacapoua</i>	0.78	35	169	2.62	58	0.968	4.7
<i>Tabebuia</i>	0.89	39	217	3.35	58	0.948	5.6
<i>Bocoa</i>	0.92	37	162	4.19	64	0.988	4.4

Essence	ID	$W_{9.1^1}$	$W_{9.1^0}$	a	T_P	R^2	$W_{9.1^0} / W_{9.1^1}$
<i>Parkia</i>	0.25	34	131	2.18	59	0.953	3.9
<i>Virola</i>	0.34	33	114	3.08	62	0.986	3.5
<i>Vochysia</i>	0.51	71	288	2.32	52	0.989	4.1
<i>Ocotea</i>	0.58	65	345	1.95	56	0.967	5.3
<i>Humiria</i>	0.59	72	340	2.36	57	0.983	4.7
<i>Dicorynia</i>	0.60	112	445	2.95	59	0.989	4.0
<i>Hymenolobium</i>	0.67	94	483	2.86	59	0.981	5.1
<i>Vouacapoua</i>	0.78	112	491	3.17	60	0.991	4.4
<i>Tabebuia</i>	0.89	147	650	4.27	61	0.996	4.4
<i>Bocoa</i>	0.92	Pas assez de données					

Figure IV - -29 Evolution de $W_{2,3^\circ}$ en fonction de la température pour les dix essences, les asymptotes en zéro et à l'infini sont représentées en pointillés.

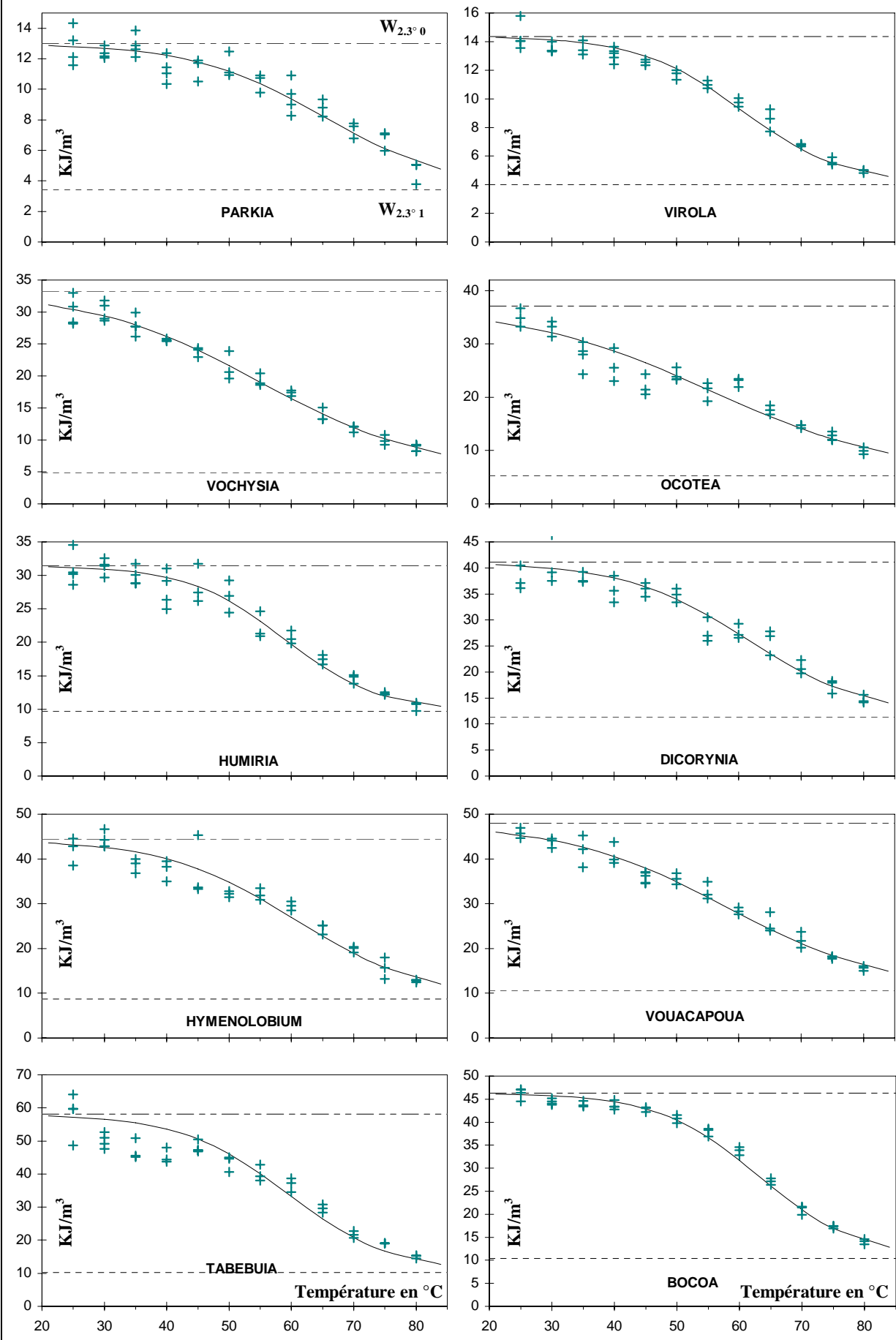
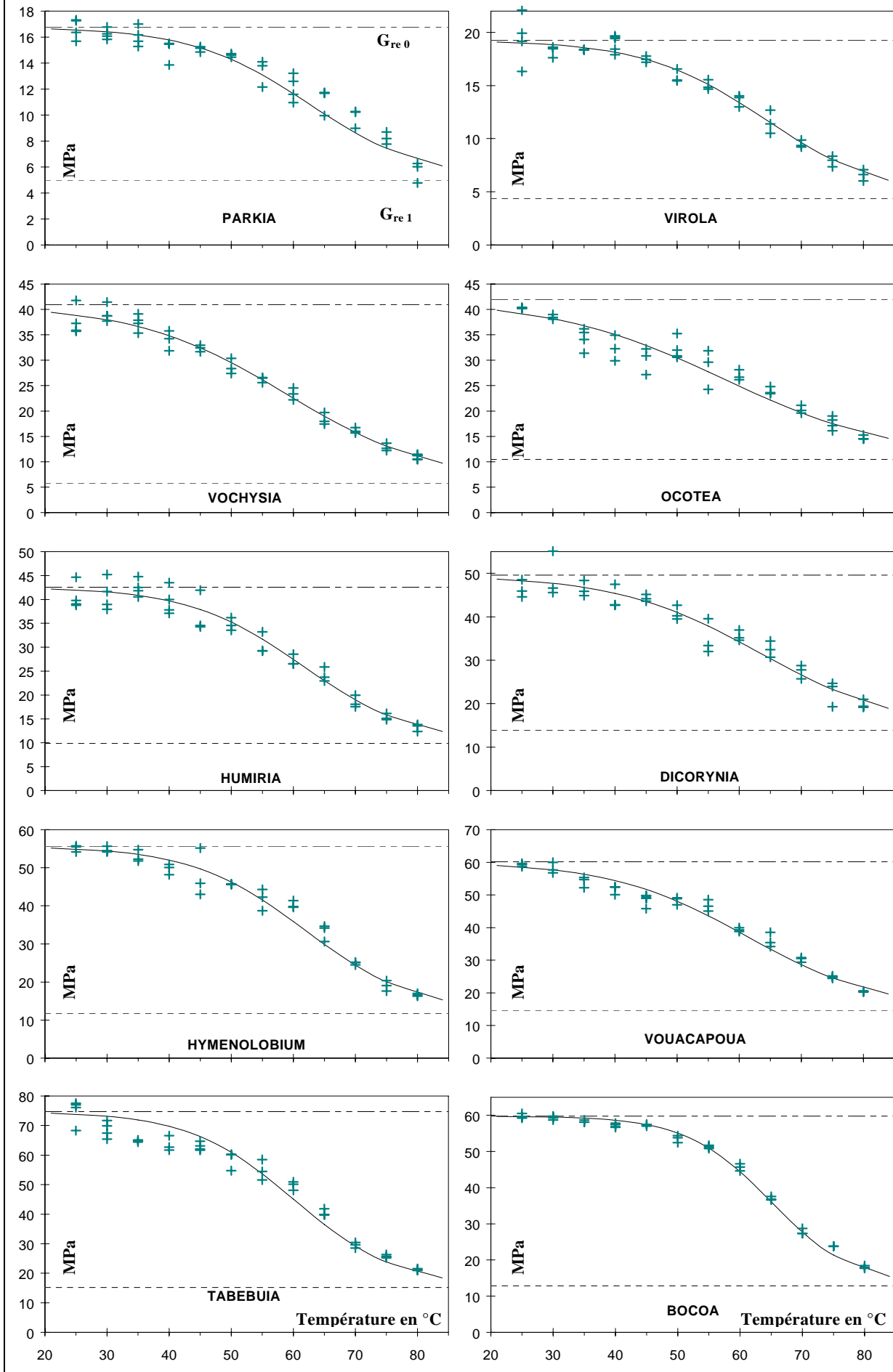


Figure IV - -30 Evolution de G_{re} en fonction de la température pour les dix essences, les asymptotes en zéro et à l'infini sont représentées en pointillés.



IV - 2.2.2. Module équivalent G_{re}

Une des différences avec l'énergie de cisaillement est une température de transition moyenne plus élevée : $\bar{T}_p = 61.6^\circ\text{C}$ (4 %). Parallèlement « a » moyen est un peu plus grand $\bar{a} = 3.2$ (23 %), alors que l'amplitude G_{re0} / G_{re1} est du même ordre.

Tableau IV - -6 Valeurs des variables du modèle (A) en MPa et signification des ajustements pour le module équivalent G_{re} , (ID = infradensité moyenne par essence).

Essence	ID	G_{re1}	G_{re0}	a	T_p	R^2	G_{re0} / G_{re1}
<i>Parkia</i>	0.25	5.0	17	3.31	62	0.938	3.4
<i>Virola</i>	0.34	4.4	19	3.31	64	0.958	4.4
<i>Vochysia</i>	0.51	5.8	41	2.44	59	0.981	7.1
<i>Ocotea</i>	0.58	10.5	42	2.07	58	0.915	4.0
<i>Humiria</i>	0.59	9.9	43	3.37	61	0.957	4.3
<i>Dicorynia</i>	0.60	13.9	50	2.75	63	0.932	3.6
<i>Hymenolobium</i>	0.67	11.8	56	3.39	62	0.964	4.7
<i>Vouacapoua</i>	0.78	14.6	60	2.80	61	0.969	4.1
<i>Tabebuia</i>	0.89	15.1	75	3.57	60	0.963	4.9
<i>Bocoa</i>	0.92	12.8	60	4.80	65	0.996	4.7

Remarquons la forte valeur du coefficient d'étalement de l'espèce *Bocoa* : $a = 4.8$, la courbe est très condensée (figure Figure IV - -31) et presque toute la variation de G_{re} se produit entre 50 et 75°C .

IV - 2.2.3. Contrainte à la rupture τ_r (tableau IV - -32, figure Figure IV - -33).

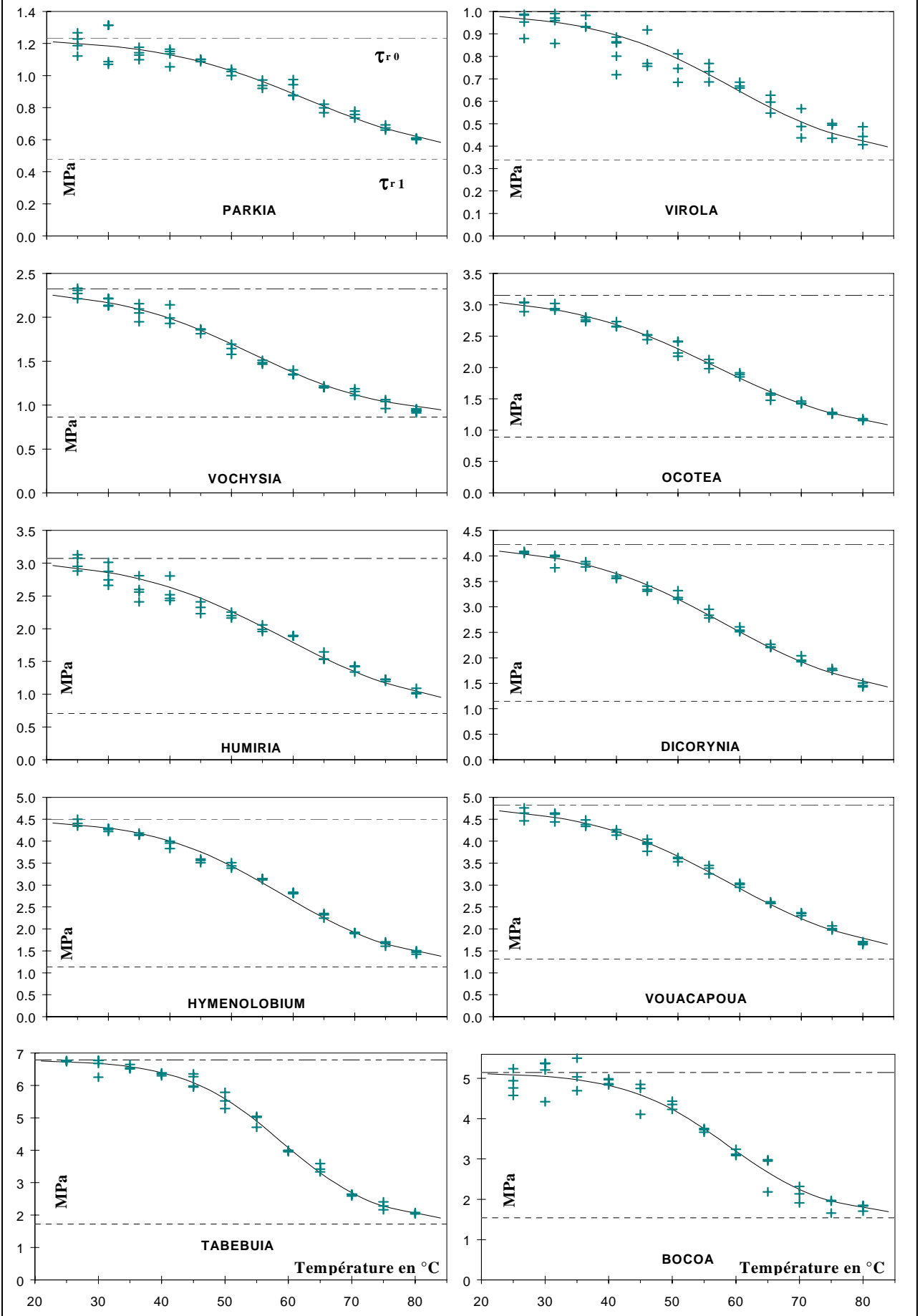
La température de transition moyenne $T_p = 57.8$ (3.8 %) ainsi que le coefficient d'étalement $a = 2.8$ (19 %) sont comparables à ceux de l'énergie de cisaillement.

La contrainte à la rupture est moins sensible à la température que les autres descripteurs de l'essai de cisaillement puisque l'amplitude de variation verticale moyenne est plus faible $\tau_{r0} / \tau_{r1} = 3.5$ (16 %).

Tableau IV - -7 Valeurs des variables du modèle (A) en MPa et signification des ajustements pour la contrainte à la rupture τ_r , (ID = infradensité moyenne par essence).

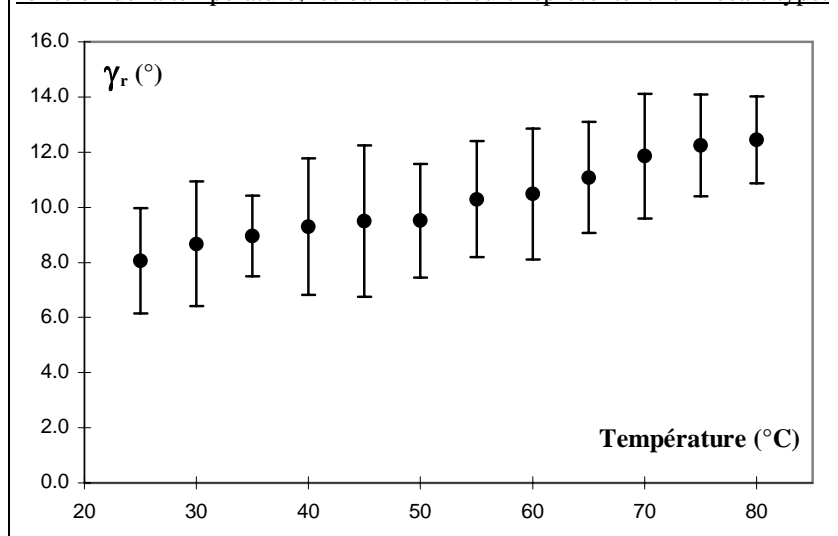
Essence	ID	τ_{r1}	τ_{r0}	a	TP	R^2	τ_{r0} / τ_{r1}
<i>Parkia</i>	0.25	0.5	1.2	2.58	62	0.940	2.6
<i>Virola</i>	0.34	0.3	1.0	2.66	58	0.919	2.9
<i>Vochysia</i>	0.51	0.9	2.3	2.44	53	0.985	2.7
<i>Ocotea</i>	0.58	0.9	3.2	2.35	56	0.991	3.5
<i>Humiria</i>	0.59	0.7	3.1	2.38	58	0.966	4.4
<i>Dicorynia</i>	0.60	1.1	4.2	2.44	57	0.993	3.7
<i>Hymenolobium</i>	0.67	1.1	4.5	2.84	58	0.992	4.0
<i>Vouacapoua</i>	0.78	1.3	4.8	2.51	58	0.992	3.7
<i>Tabebuia</i>	0.89	1.7	6.8	3.85	59	0.994	3.9
<i>Bocoa</i>	0.92	1.5	5.1	3.66	59	0.960	3.3

Figure IV - -34 Evolution de τ_r en fonction de la température pour les dix essences, les asymptotes en zéro et à l'infini sont représentées en pointillés.



IV - 2.2.4. Angle à la rupture γ_r

Figure IV - -35 Evolution de γ_r moyen (toutes essences confondues) en fonction de la température, les barres d'erreurs représentent +/- l'écart-type.



Lorsque l'on représente l'angle de rupture en cisaillement toutes essences confondues, en fonction de la température (figure Tableau IV - -8), bien que le nuage de point soit assez lâche, l'angle croît de façon significative quand la température augmente ($R^2 = 0.31^{***}$, pour 390 points de mesure). Lorsque la température croît de 25 à 80°C, cet angle augmente de 56 %, **le bois est plus ductile à température élevée.**

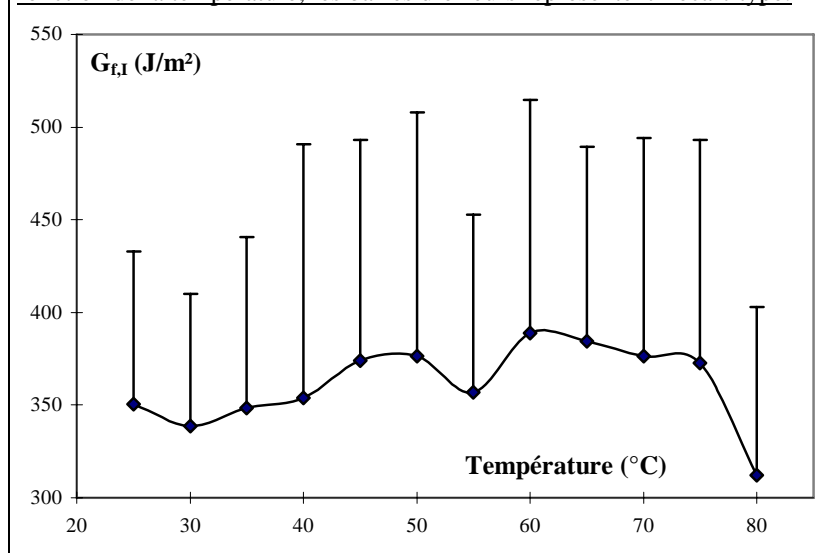
de la température sur l'essai de ténacité

Seul le module équivalent et la contrainte à la rupture ont été ajustés sur le modèle (A), pour chaque essence.

IV - 2.3. Rôle

IV - 2.3.1. Energie de rupture $G_{f,I}$

Figure IV - -36 Evolution de $G_{f,I}$ moyen (toutes essences confondues) en fonction de la température, les barres d'erreurs représentent l'écart-type.



Les 390 essais de ténacité que nous avons réalisés, montrent que **l'énergie de rupture n'est pas reliée simplement à la température d'essai.** En fait, quand la température d'essai augmente, la courbe force/déplacement s'étale sur l'axe des abscisses et la surface sous la courbe ne change presque pas. Si l'on considère l'évolution de $G_{f,I}$ toutes essences confondues en fonction de la température (figure Figure IV - -37), la courbe présenterait plutôt un maximum très étalé entre 40 et 75°C avec une forte variabilité de comportement entre essences. Pour certaines essences comme le Bois rouge, l'énergie de rupture diminue pratiquement d'un

facteur 2 quand la température passe de 20 à 80°C alors que d'autres présentent un maximum vers 60°C (*Virola*) ou deux maxima vers 35 et 65°C (*Vouacapoua*), (voir annexe II-3).

IV - 2.3.2. Module équivalent $P_{f,I}$

L'évolution du module équivalent $P_{f,I}$ en fonction de la température est ajustée sur la base du modèle (A). Les valeurs des différentes variables et les significations des ajustements sont résumées dans le tableau Figure IV - -38. Les nuages de points de $P_{f,I}$ en fonction de la température sont un peu plus lâches que les propriétés mécaniques précédentes surtout pour *Parkia* et *Virola* (figure Figure IV - -39).

- La température de transition principale est de 57°C (3 %) en moyenne et le coefficient d'étalement « a moyen » est de 2.4 (13 %), donc comparables à ceux obtenus sur les descripteurs de l'essai de compression.
- Par contre, l'amplitude de variation verticale $P_{f,I,0} / P_{f,I,1}$ est très hétérogène. Elle est près de cinq fois plus importante pour l'essence *Tabebuia* que pour l'essence *Virola*. La sensibilité de $P_{f,I}$ à l'élévation de la

température est très variable suivant les essences. De plus $P_{f,I 0} / P_{f,I 1}$ tend à augmenter en fonction de la densité.

- Le paramètre (A) $P_{f,I 0}$ est lié à l'infradensité par une droite passant par zéro. Par contre, $P_{f,I 1}$ n'est pas lié à l'infradensité. Ce qui corrobore bien la remarque du paragraphe « IV-1.3.2. » : Plus la température est élevée, moins $P_{f,I}$ est sensible aux variations de l'infradensité.

Tableau IV - -9 Valeurs des variables du modèle (A) en MPa et signification des ajustements pour le module équivalent $P_{f,I}$, (ID = infradensité moyenne par essence).

Essence	ID	$P_{f,I 1}$	$P_{f,I 0}$	a	T_p	R^2	$P_{f,I 0} / P_{f,I 1}$
<i>Parkia</i>	0.23	67	227	2.76	60	0.8419	3.4
<i>Viola</i>	0.34	94	214	1.88	58	0.7497	2.3
<i>Vochysia</i>	0.51	135	470	2.44	54	0.9636	3.5
<i>Ocotea</i>	0.60	168	550	2.71	54	0.9636	3.3
<i>Humiria</i>	0.60	106	532	2.86	54	0.9738	5.0
<i>Dicorynia</i>	0.60	96	597	2.14	62	0.9243	6.2
<i>Hymenolobium</i>	0.63	82	707	2.00	54	0.9715	8.6
<i>Vouacapoua</i>	0.80	88	660	2.55	61	0.9491	7.5
<i>Tabebuia</i>	0.90	77	825	2.44	56	0.9791	10.7
<i>Bocoa</i>	0.93	101	669	2.44	58	0.9254	6.6

IV - 2.3.3. *Contrainte à la rupture $\sigma_{r,I}$ (tableau Figure IV - -40 Schéma du dispositif de compression)*

IV - 2.3.4.)

- La température de transition principale moyenne est de 60.6°C (2 %).
- La valeur du paramètre d'étalement « a » est comparable à celle pour la contrainte à la rupture en cisaillement $\bar{a} = 2.7$ (13 %), alors que $\sigma_{f,I 0} / \sigma_{f,I 1}$ moyen est de 2.9 (29 %) ce qui est plutôt faible. La contrainte à la rupture dans l'essai de ténacité est en moyenne moins sensible à la température que tous les autres descripteurs mécaniques examinés. Remarquons que les amplitudes verticales de *Parkia* et de *Viola* sont particulièrement faibles (figure Figure IV - -41).

Tableau IV - -10 Valeurs des variables du modèle (A) en MPa et signification des ajustements pour la contrainte à la rupture $\sigma_{r,I}$, (ID = infradensité moyenne par essence).

Essence	ID	$\sigma_{f,I 1}$	$\sigma_{f,I 0}$	a	T_p	R^2	$\sigma_{f,I 0} / \sigma_{f,I 1}$
<i>Parkia</i>	0.23	1.5	3.5	3.05	60	0.7428	2.3
<i>Viola</i>	0.34	2.2	3.8	2.66	61	0.6781	1.7
<i>Vochysia</i>	0.51	2.4	7.0	2.44	59	0.9482	3.0
<i>Ocotea</i>	0.60	2.8	7.7	2.80	61	0.9482	2.8
<i>Humiria</i>	0.60	2.2	9.0	2.56	57	0.9811	4.0
<i>Dicorynia</i>	0.60	3.6	8.5	3.40	63	0.8990	2.3
<i>Hymenolobium</i>	0.63	3.3	9.9	2.47	63	0.9556	3.0
<i>Vouacapoua</i>	0.80	3.5	9.2	2.16	61	0.8890	2.6
<i>Tabebuia</i>	0.90	2.2	10.3	2.50	59	0.9797	4.8
<i>Bocoa</i>	0.93	3.9	10.8	3.09	60	0.9151	2.8

Figure IV - -42 Evolution de $P_{f,1}$ en fonction de la température pour les dix essences, les asymptotes en zéro et à l'infini sont représentées en pointillés.

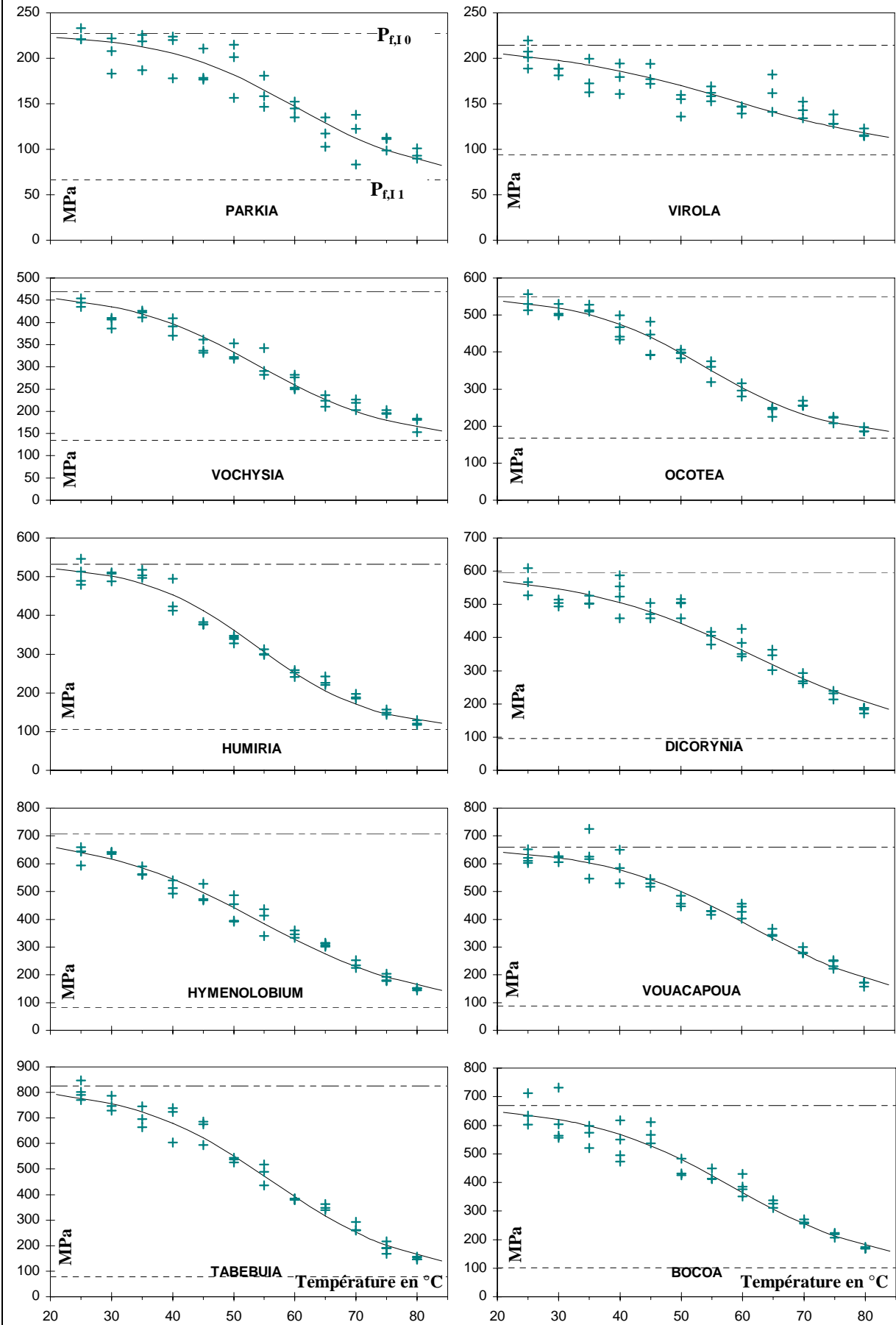
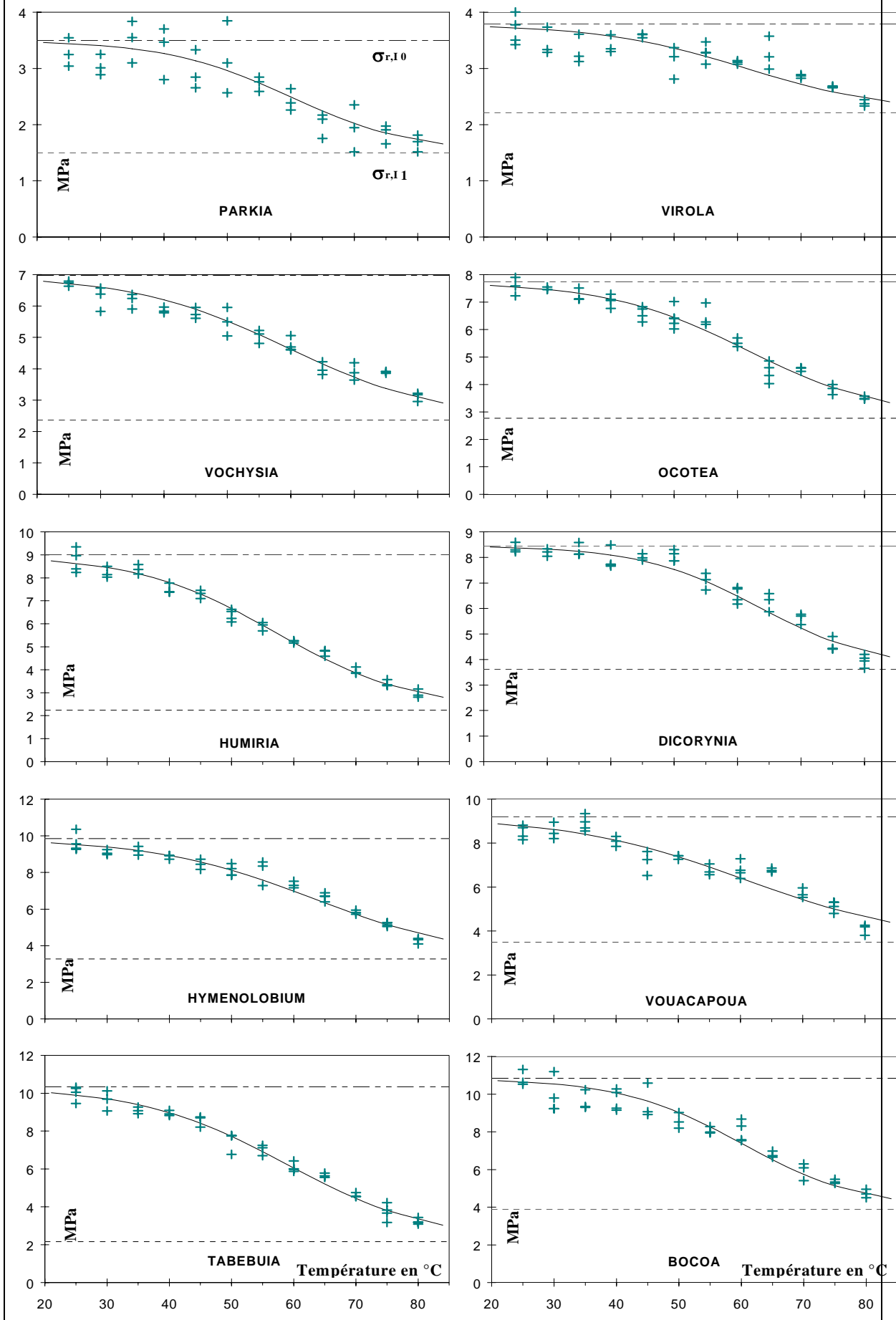
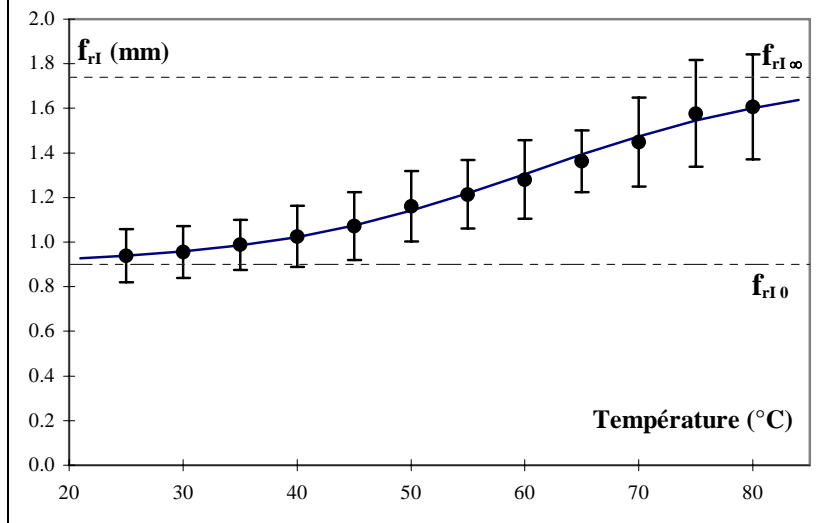


Figure IV - -43 Evolution de $\sigma_{r,i}$ en fonction de la température pour les dix essences, les asymptotes en zéro et à l'infini sont représentées en pointillés.



IV - 2.3.5. Flèche à la rupture $f_{r,I}$

Figure IV - -44 Evolution de moyen $f_{r,I}$ (toutes essences confondues) en fonction de la température, les barres d'erreurs représentent +/- l'écart-type



La flèche à la rupture croît régulièrement quand la température augmente.

Comme pour l'angle de cisaillement, la ductilité du bois augmente avec la température et la rupture se produit pour une déformation plus importante.

Il est possible d'ajuster l'ensemble des 390 points de données sur la base du modèle (A), (figure IV - -11). Le coefficient de détermination est alors $R^2 = 0.65^{***}$ (sur l'ensemble des 390 couples de données). Le modèle (A) s'écrit alors :

$$f_{r,I} = \frac{f_{r,I0} + f_{r,I\infty}}{2} - \frac{f_{r,I0} - f_{r,I\infty}}{2} \tanh \left[a \frac{T - T_p}{T_p} \right] = \frac{0.90 + 1.74}{2} - \frac{0.90 - 1.74}{2} \tanh \left[2.57 \frac{T - 60.8}{60.8} \right]$$

La température de transition (60.8°C) et le coefficient d'étalement « a » (2.57), sont comparables à ceux des autres descripteurs. Par contre, l'amplitude de variation verticale est relativement faible : $f_{r,I}/f_{r,I0} = 1.9$.

IV - 3. Synthèse et conclusions

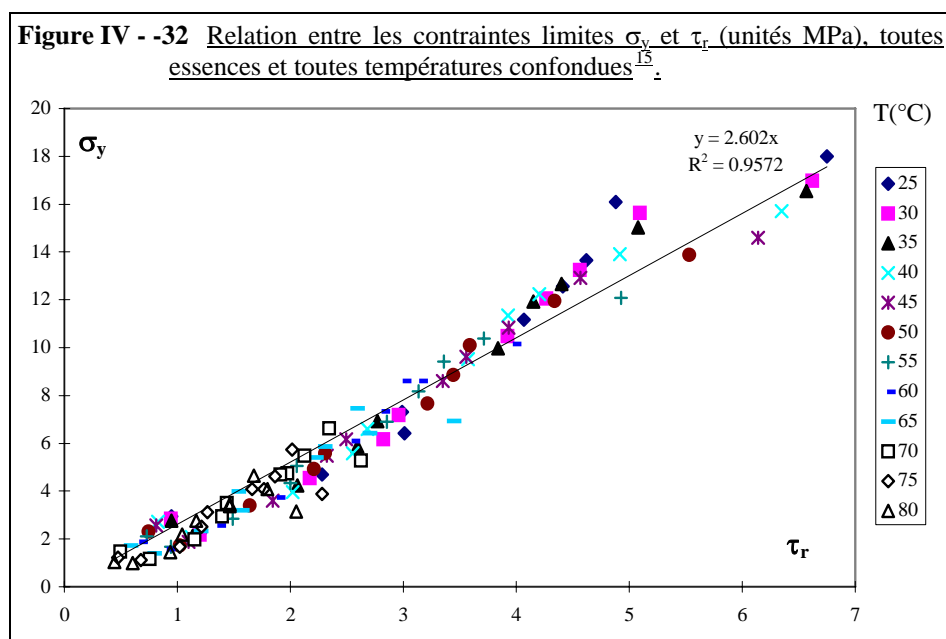
IV - 3.1. Relations entre les descripteurs mécaniques

Les trois modules équivalents sont fortement corrélés entre eux comme nous le montre la matrice de corrélation suivante (corrélations simples entre les données de même température et de même essence, 390 points par essai).

	$W_{13.3\%}$	E_{re}	σ_y	$W_{4.6^\circ}$	G_{re}	τ_r	$G_{f,I}$	$P_{f,I}$	$\sigma_{r,I}$
$W_{13.3\%}$	1.000								
E_{re}	0.859	1.000							
σ_y	0.954	0.951	1.000						
$W_{4.6^\circ}$	0.914	0.955	0.966	1.000					
G_{re}	0.914	0.948	0.960	0.988	1.000				
τ_r	0.945	0.945	0.980	0.972	0.965	1.000			
$G_{f,I}$	0.338	0.344	0.368	0.390	0.435	0.396	1.000		
$P_{f,I}$	0.823	0.955	0.914	0.948	0.945	0.922	0.325	1.000	
$\sigma_{r,I}$	0.842	0.908	0.894	0.923	0.936	0.885	0.472	0.939	1.000

Les modules équivalents en rupture et en cisaillement sont directement proportionnels puisqu'ils sont liés par une droite passant par zéro. Par contre, ces deux modules sont plutôt liés par une fonction puissance avec le module équivalent en compression (figure Figure IV - -45).

Les corrélations entre les contraintes limites sont également très bonnes entre le cisaillement et la



compression (figure IV - -33) ou bonne entre la ténacité et les autres essais (figure IV - -34). Dans ce dernier cas, il apparaît nettement un effet essence qui est représenté dans la figure IV - -35. Pour chaque arbre la relation entre les contraintes limites de l'essai de ténacité et de cisaillement est très bonne mais il existe des différences de comportement très notable entre *Virola* et *Parkia* par exemple ou entre *Dicorynia* et *Humiria*.

¹⁵ Chaque point est la représentation graphique des valeurs moyennes par température des descripteurs pour une essence donnée (120 points par graphique = 10 essences x 12 températures)

Figure IV - -36 Relation entre les différents modules équivalents de compression E_{re} , de cisaillement G_{re} et de rupture $P_{f,I}$ (unités MPa)¹.

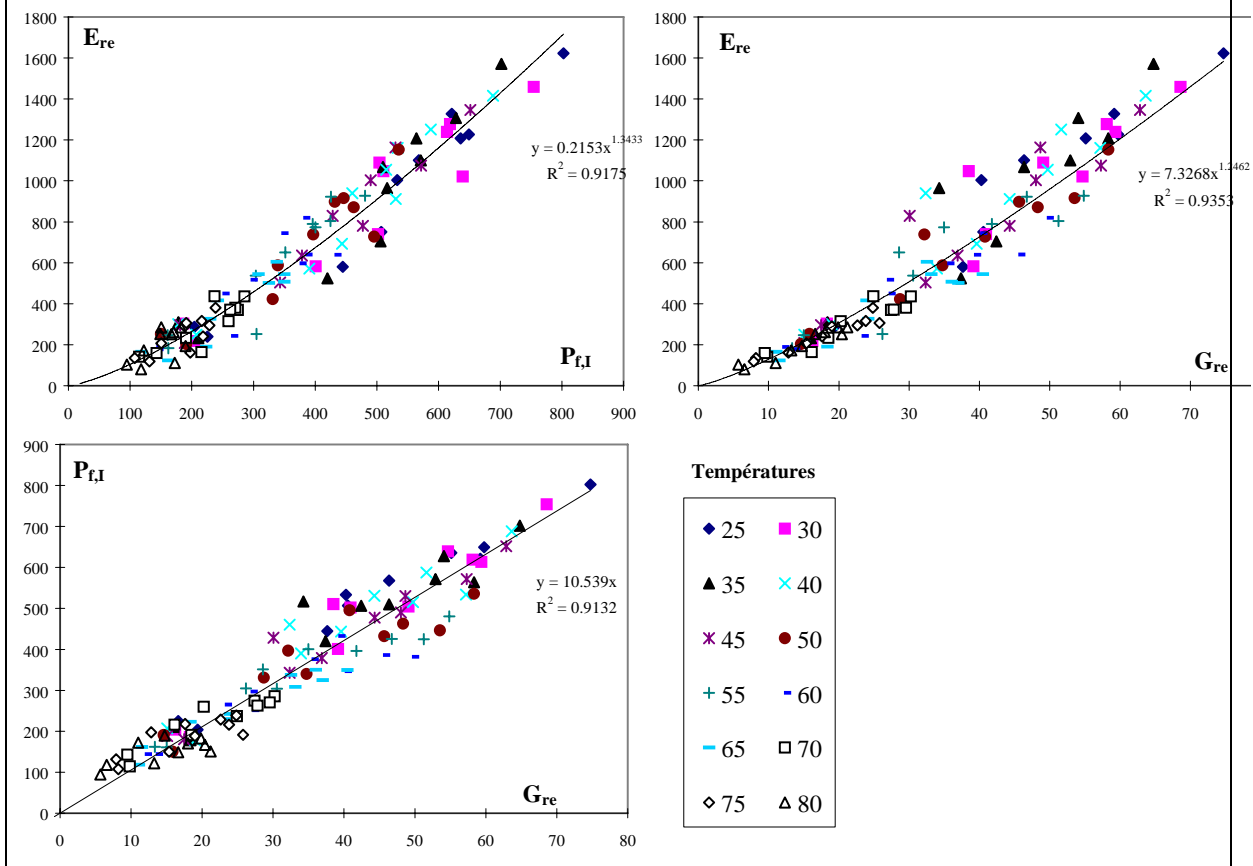


Figure IV - -37 Relation entre les contraintes limites $\sigma_{r,I}$ et τ_r (unités MPa), toutes essences et toutes températures confondues.

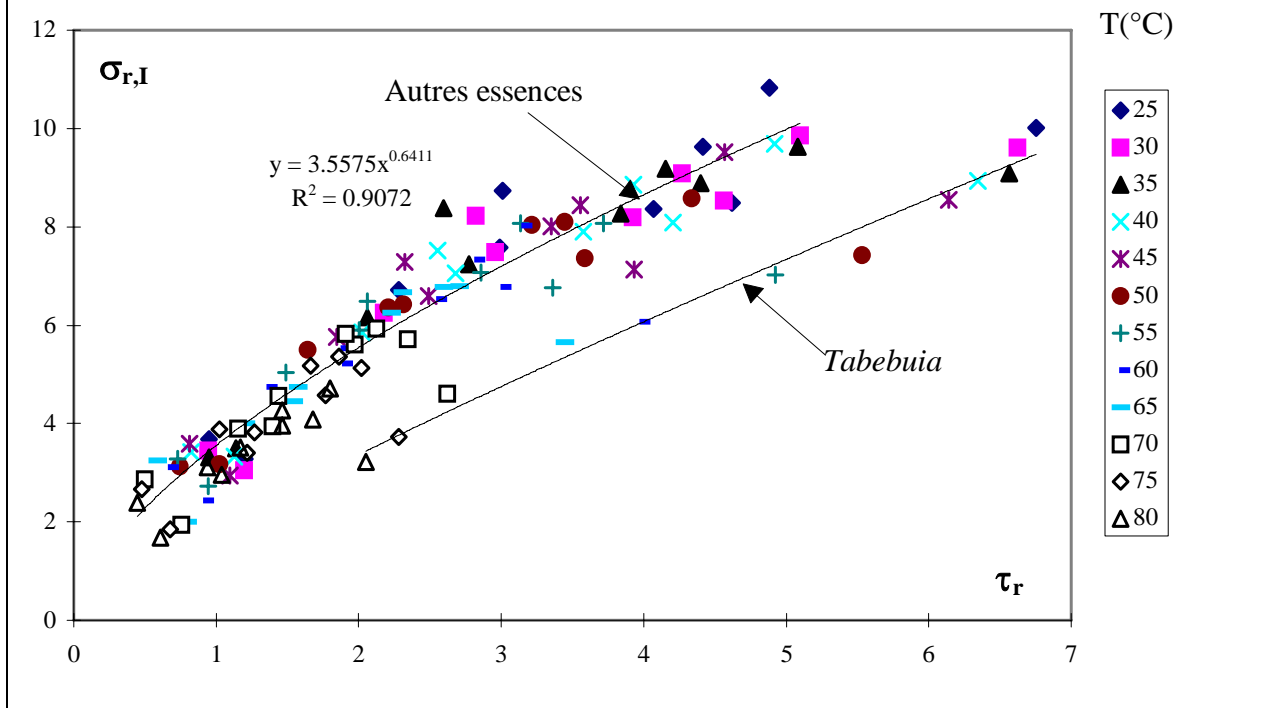
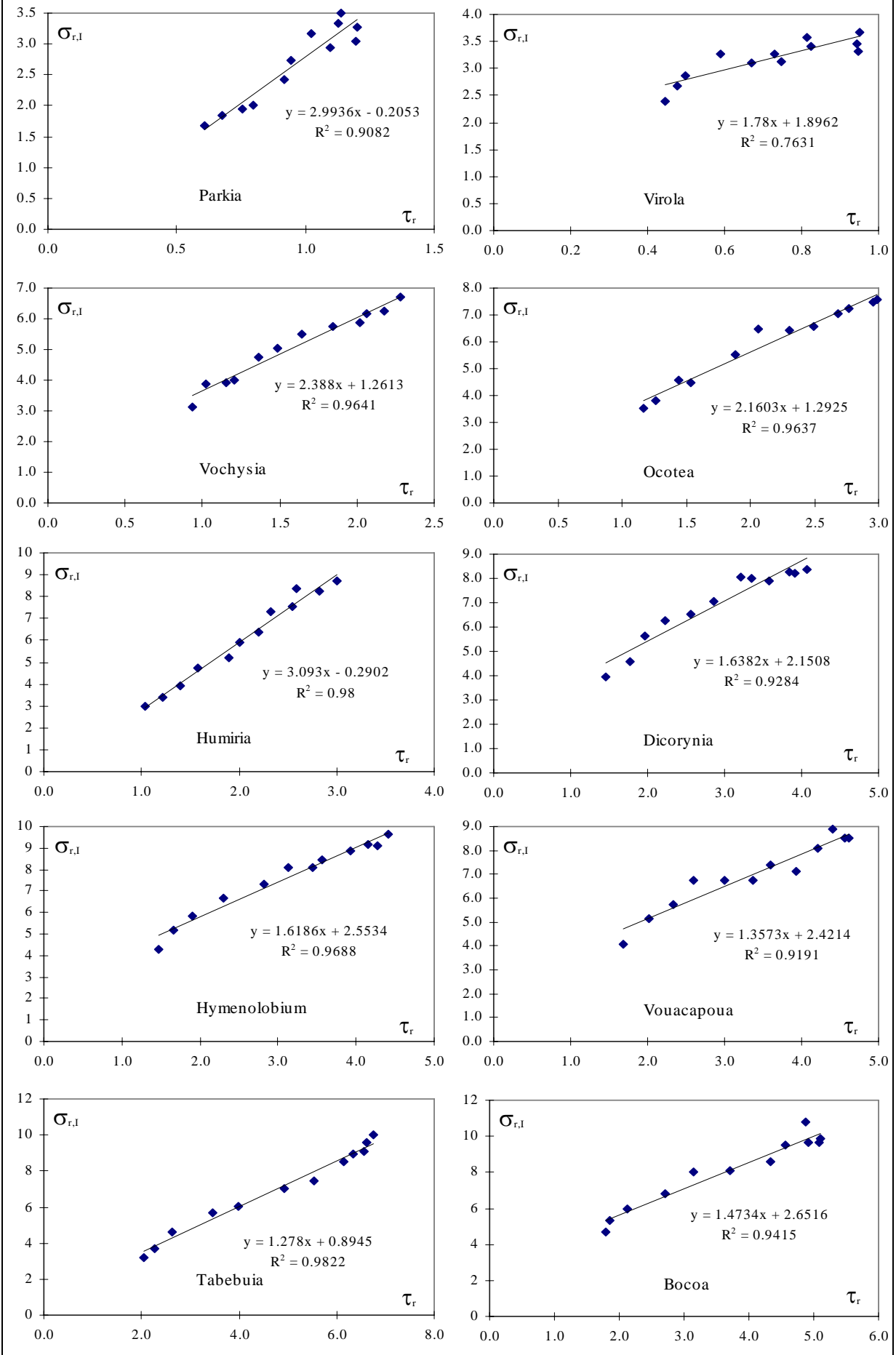


Figure IV - 38 Relation entre les contraintes limites $\sigma_{r,l}$ et τ_r (unités MPa), pour chaque essence.



Afin de comparer l'évolution avec la température des descripteurs, il est intéressant de calculer certains ratios et d'examiner leurs évolutions. Les figures IV - -39 à Tableau IV - -12 représentent les ratios des contraintes limites $(\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r}, \frac{\sigma_y}{\sigma_{r,I}}, \frac{\sigma_y}{\tau_r})$ et les ratios entre l'énergie totale dépensée dans l'essai de ténacité et l'énergie dépensée dans l'essai de cisaillement, jusqu'à la déformation angulaire de 4.6° pour toutes les essences.

Il faut d'abord noter une grande différence de sensibilité à la température de ces ratios :

⇒ $\frac{\sigma_y}{\tau_r}$ et $\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r}$ peuvent être quasiment invariables (*Humiria*, *Ocotea*) ou varier au maximum dans un rapport de 1.5 (*Virola*, *Tabebuia*, *Bocoa*).

⇒ $\frac{\sigma_y}{\sigma_{r,I}}$ diminue presque toujours quand la température augmente. Cette variation est à nouveau quasiment nulle pour *Humiria* qui se révèle très stable avec la température pour ces critères, mais elle peut atteindre un facteur 2 pour *Virola*, *Tabebuia* ou *Bocoa*.

⇒ $\frac{G_{f,I}}{W_{4.3^\circ}}$ augmente toujours fortement avec la température, ce qui était prévisible compte tenu des faibles variations de l'énergie dépensée dans l'essai de ténacité. Les amplitudes de variations sont comparables à celles du descripteur de l'essai de cisaillement lui même (elles varient d'un facteur 2 à un facteur 4). Il faut noter dans la plupart des cas que cette augmentation n'est sensible qu'à partir de 50-60°C, ce qui n'est pas sans rappeler le phénomène de recouvrance hygrothermique (GRIL & al, 1993a). L'effet essence est aussi très sensible à la fois sur l'allure des courbes et sur le niveau moyen du ratio.

A densité équivalente, *Virola* et *Parkia* ont des comportements contrastés : le premier résiste nettement mieux en compression et en résistance à la rupture qu'en cisaillement. Ce sont à priori des atouts pour le déroulage. De la même façon pour *Humiria* et *Dicorynia*, le premier a un bien meilleur comportement à la rupture qu'en cisaillement mais le second compense par une meilleure sensibilité à la température.

Figure IV - 40 Evolution des ratios des contraintes limites (moyenne par température) de ténacité $\sigma_{r,l}$ et de cisaillement τ_r en fonction de la température d'essai en °C.

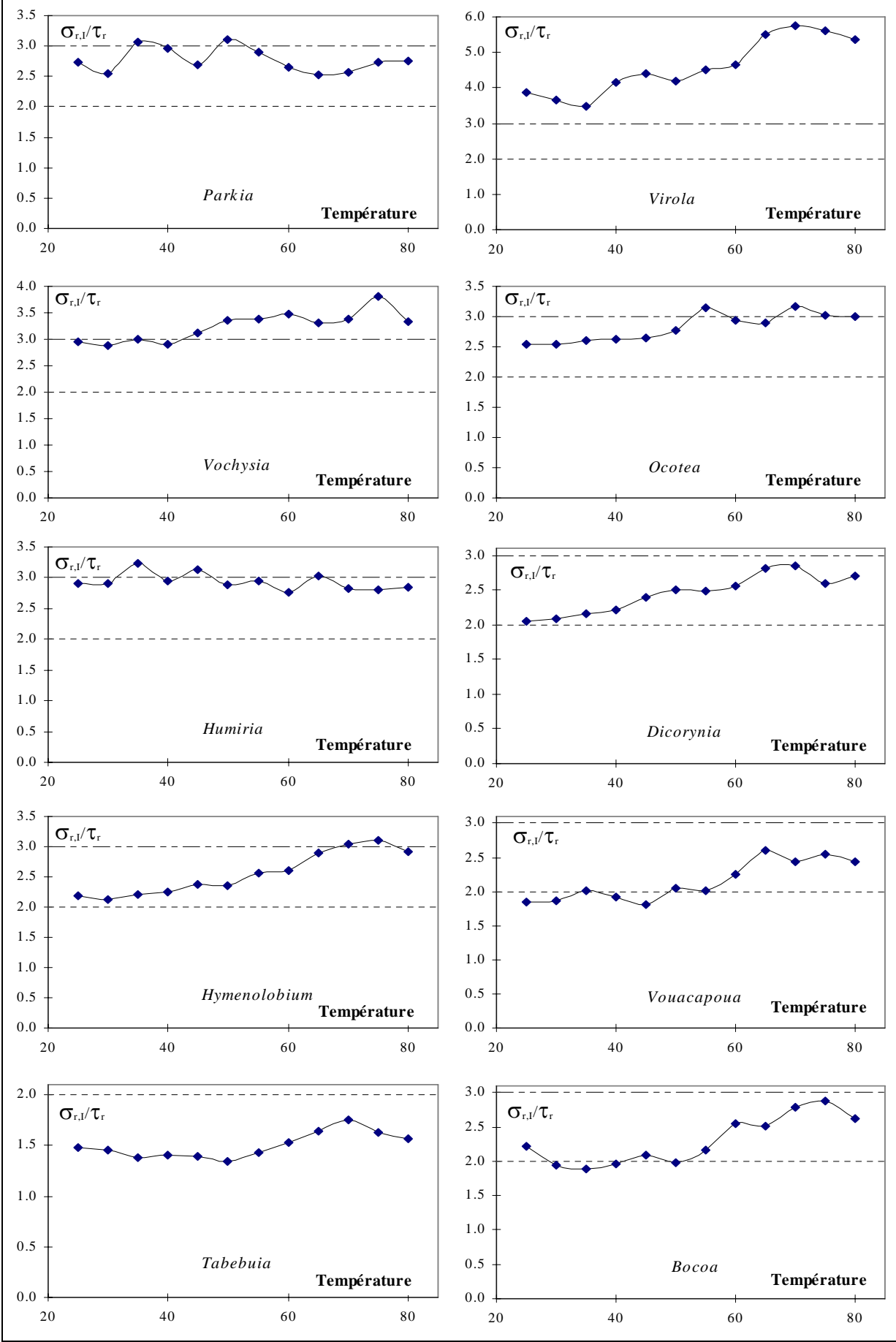


Figure IV - -41 Evolution des ratios des contraintes limites (moyennes par température) au premier coude de la courbe de compression σ_y et de cisaillement τ_r en fonction de la température.

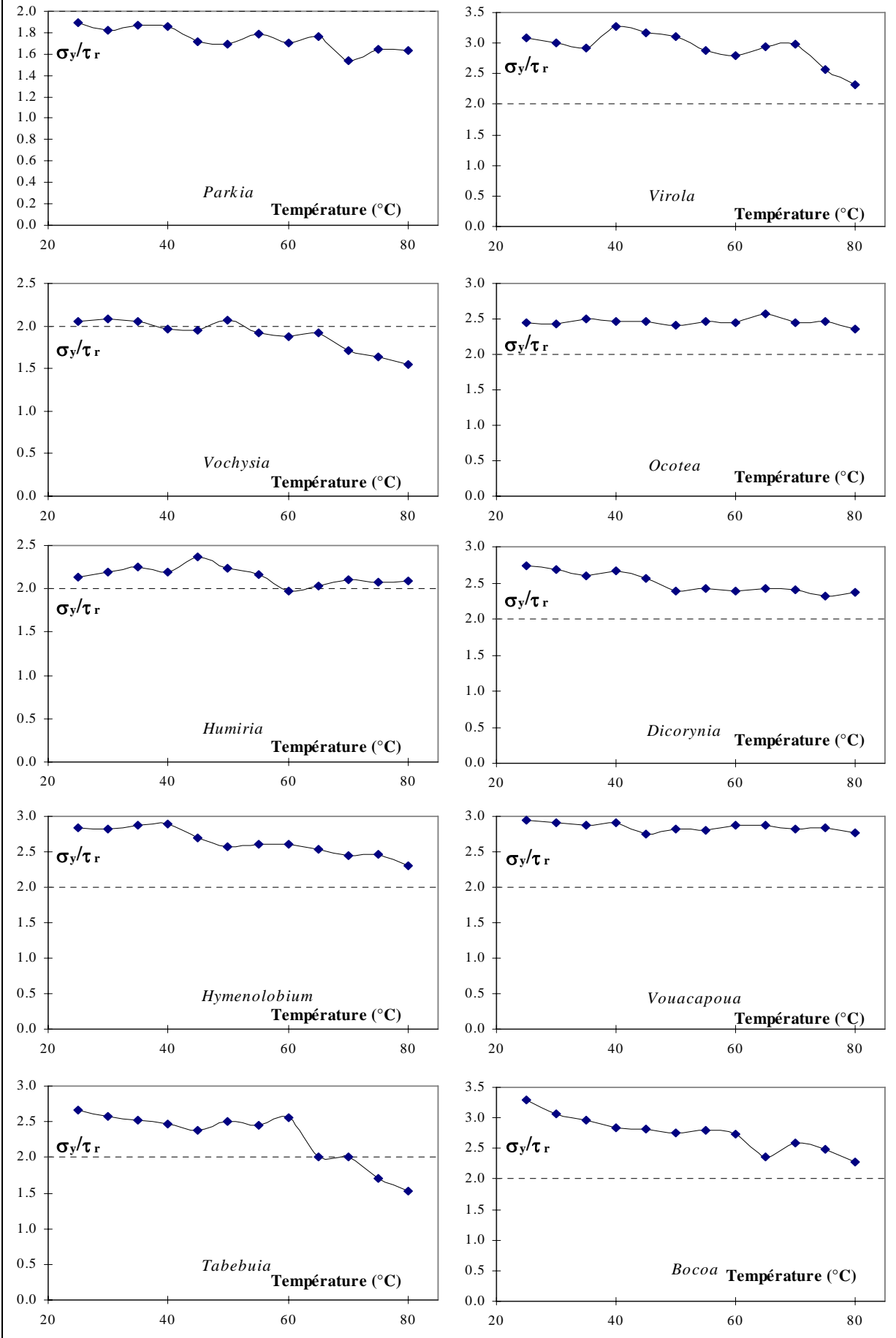


Figure IV - -42 Evolution des ratios des contraintes limites (moyenne par température) au premier coude de la courbe de compression σ_y et de ténacité $\sigma_{r,I}$ en fonction de la température.

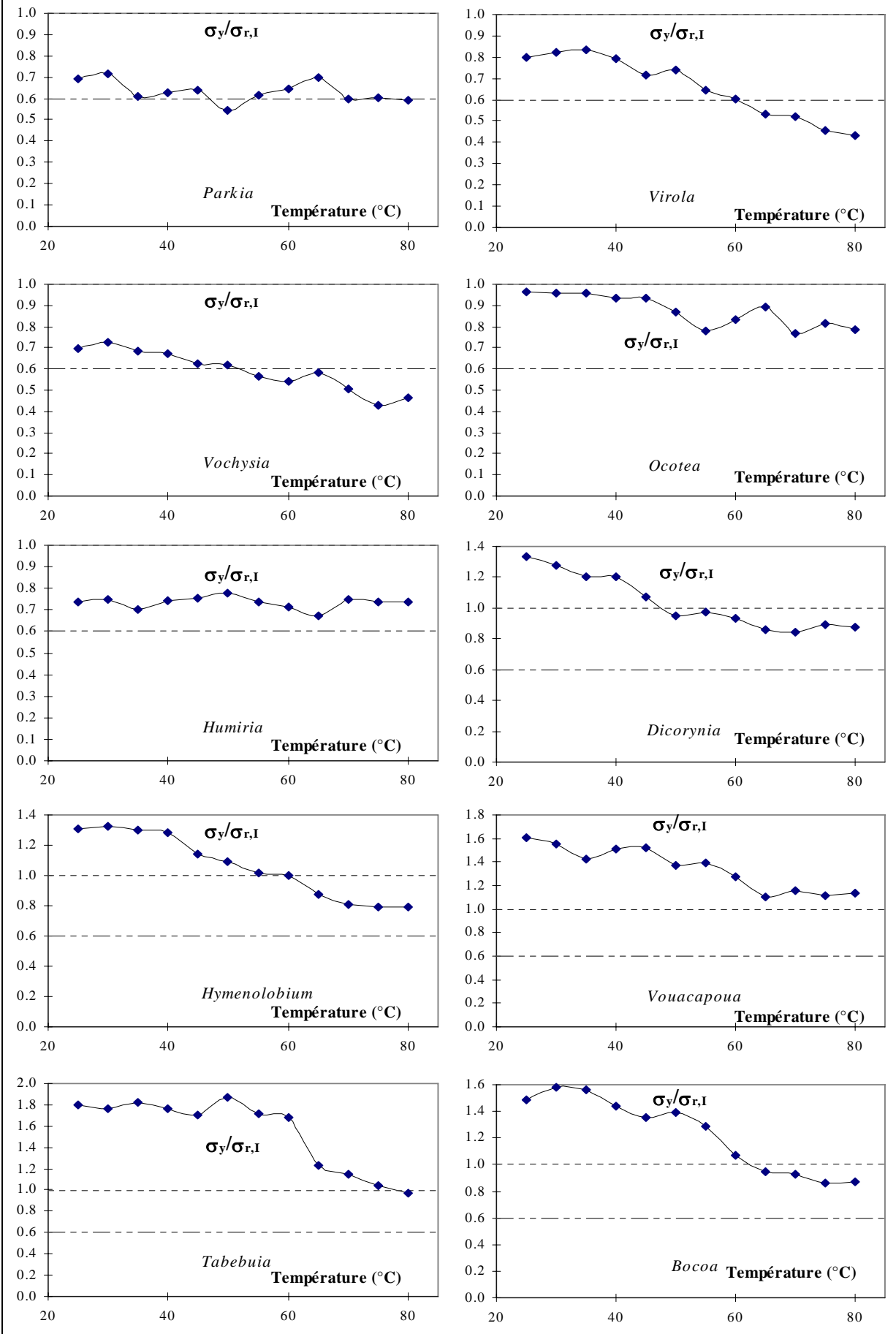
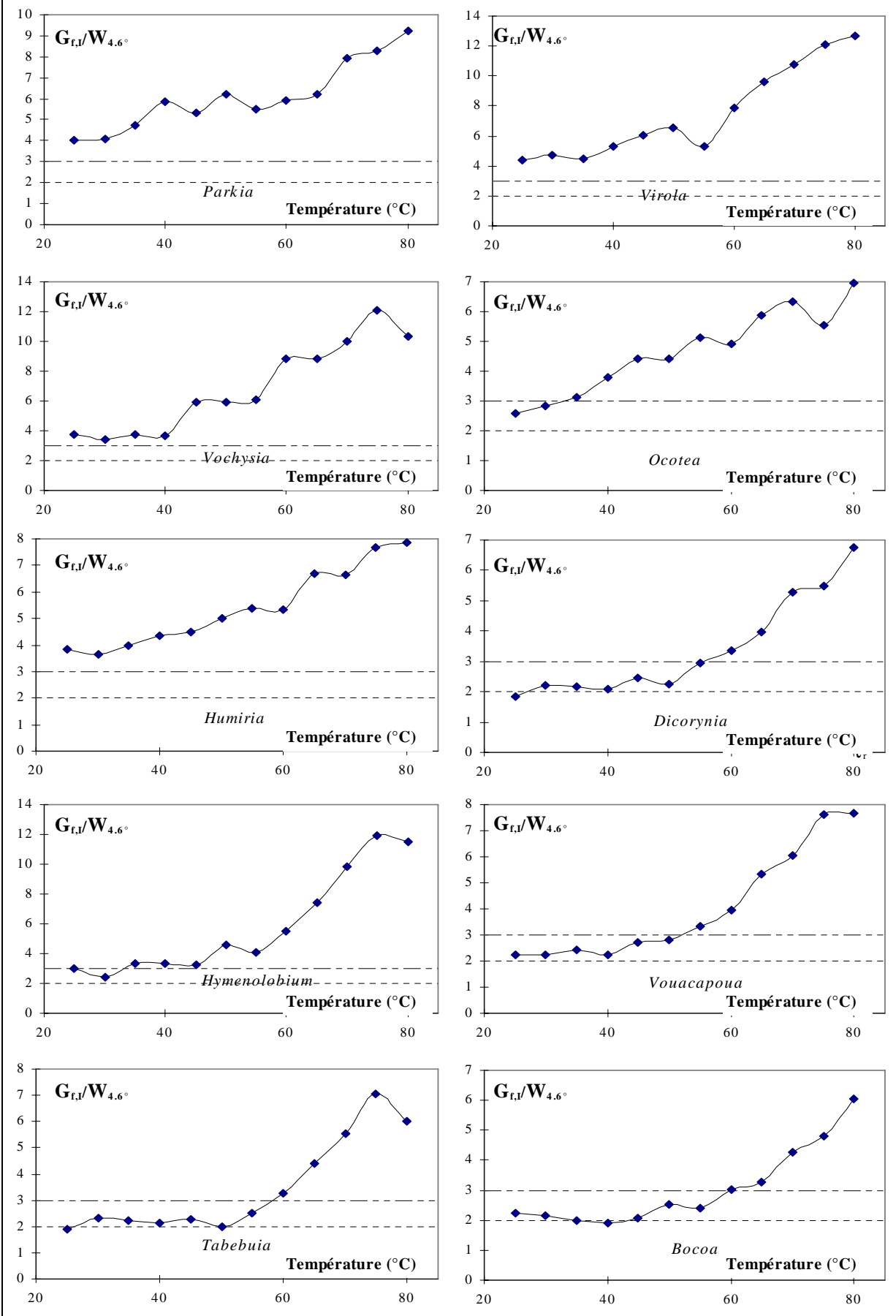


Figure IV - -43 Evolution des ratios des énergies (moyenne par température) dépensées dans l'essai de ténacité $G_{r,l}$ et des énergies dépensées dans l'essai de cisaillement $W_{4,6^\circ}$ jusqu'à une déformation angulaire de 4.6° en fonction de la température.



IV - 3.2. Influence du facteur essence

L'effet essence n'est pas facile à estimer car c'est un effet faible par rapport aux deux variables principales que sont la température et la densité. Toutefois, nous avons essayé de classer chaque essence en fonction de deux critères :

- Ses propriétés mécaniques par rapport à sa densité ;
- Sa sensibilité à la température.

Pour montrer l'influence de l'essence sur les valeurs des propriétés mécaniques mesurées, il faut donc annuler l'influence de la température et de la densité sur les valeurs mesurées.

IV - 3.2.1. Classement des essences en fonction de leurs propriétés mécaniques par rapport à leur densité

a - Méthode de calcul

Pour classer les essences entre elles, nous avons calculé pour chaque essence, la distance qui sépare la valeur du descripteur à sa valeur calculée (à partir de l'ajustement du descripteur en fonction de l'infradensité). Cette distance est pondérée par la moyenne du descripteur considéré. On obtient ainsi le pourcentage de variation, appelons-le Z (%) par rapport à l'ajustement pour chaque essence :

$$Z(\text{sp}) = \frac{C(\text{sp}) - C_{\text{calculé}}}{C_{\text{moyen}}} * 100 \text{ en (\%)}$$

$C(\text{sp})$ est la valeur du descripteur de l'essai, pour une essence considérée à 25°C,

$C_{\text{calculé}} = f(\text{ID})$ est la valeur de C calculé à partir de l'équation de la courbe d'ajustement de C en fonction de l'infradensité.

C_{moyen} est la moyenne du descripteur, toutes essences confondues.

Afin de prendre en compte les données mesurées à toutes les températures, l'influence de la température est annulée en divisant le descripteur par sa valeur calculée à partir du modèle (A) décrit précédemment.

$$C(\text{sp})_{(25)} = \frac{C(T)}{A(T)} * A(25)$$

$C(\text{sp})_{(25)}$ est la valeur du descripteur de l'essai corrigé pour une température de 25°C,

$C(T)$ est la valeur du descripteur à une température donnée,

$A(T)$ est la valeur à cette température du modèle (A) de l'essence considérée,

$A(25)$ est la valeur du modèle (A) pour cette essence et à 25°C.

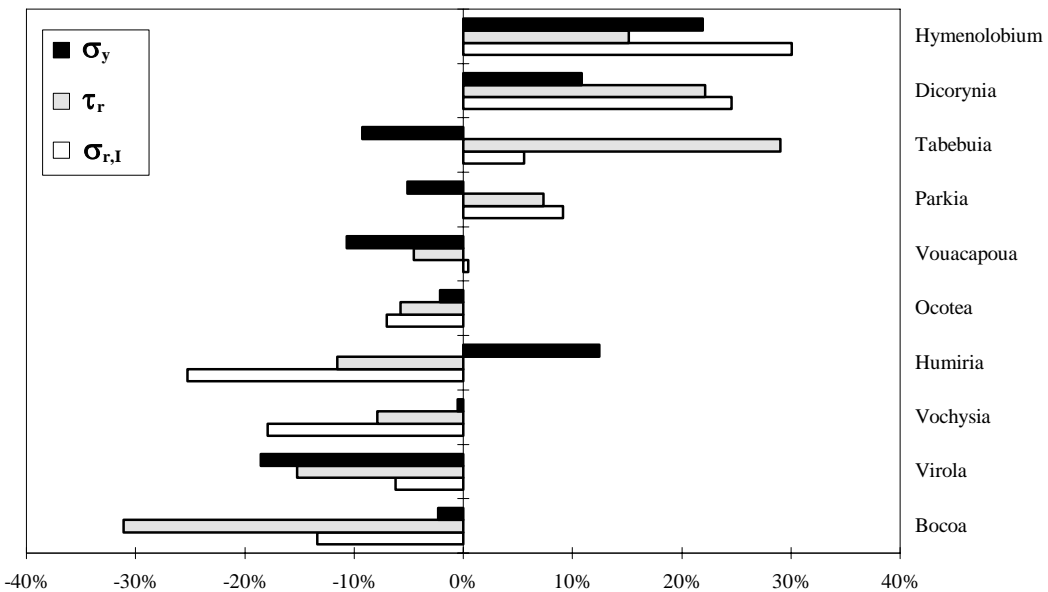
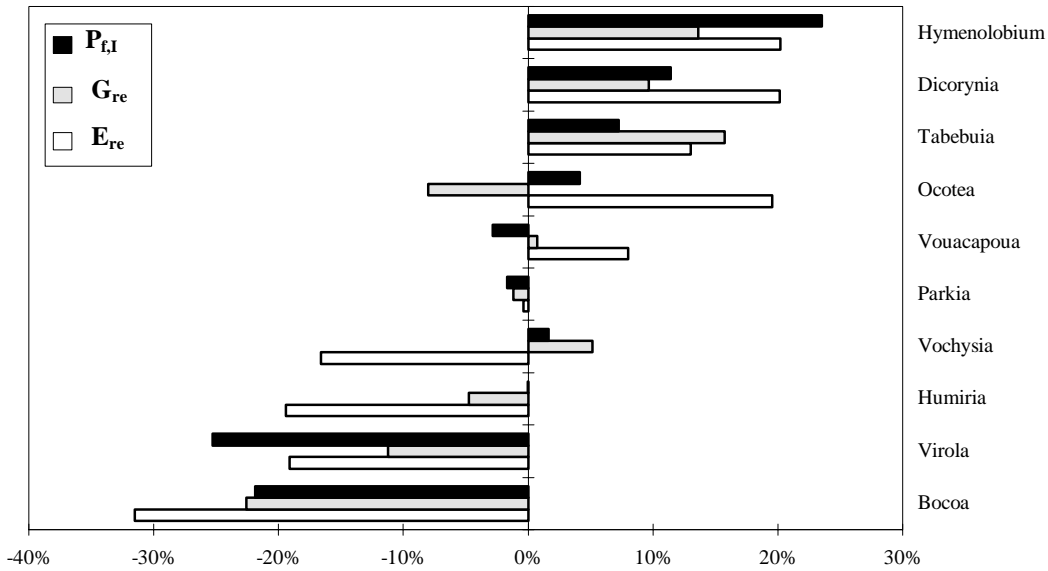
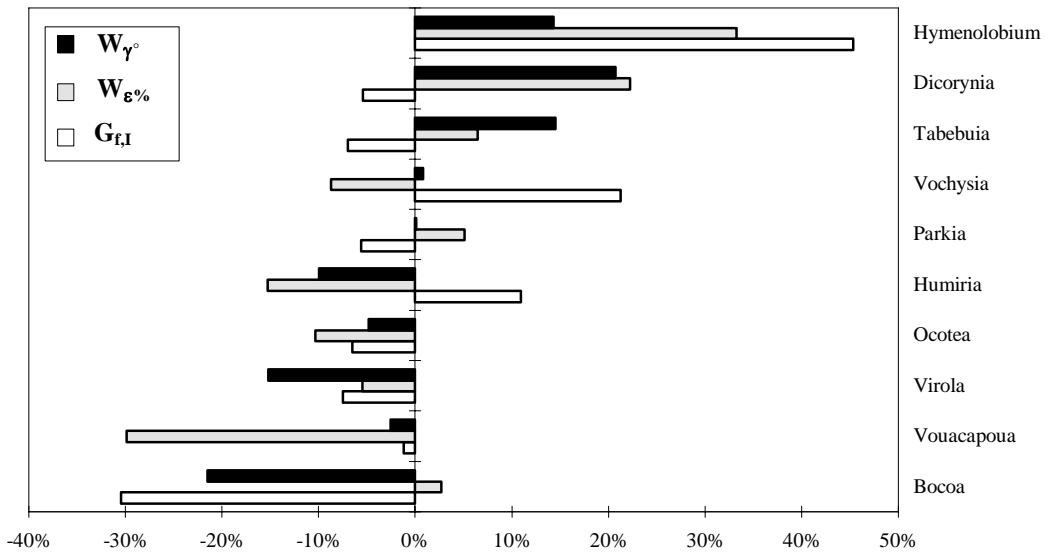
Pour l'énergie de rupture $G_{f,I}$, qui ne varie pas en fonction de la température, nous avons pris pour chaque essence sa valeur moyenne, toutes températures confondues :

$$G_{f,I}(\text{sp})_{(25)} = G_{f,I \text{ moyen}}$$

b - Résultats

Le classement que nous proposons ne concerne que les arbres que nous avons testés. L'introduction d'autres individus pour les mêmes essences, puis d'autres essences dans les ajustements sont indispensables pour valider cette approche qui peut être considérée comme préliminaire.

Figure IV - -44 Valeurs de Z pour les différentes essences et les différents descripteurs, en haut les énergies (cisaillement, compression, rupture) au centre les équivalents modules, en bas les contraintes à la rupture.



Quoi qu'il en soit, le classement est assez cohérent pour l'ensemble des essais et des descripteurs (figure IV - -1). Il en ressort que :

- Certaines essences comme *Hymenolobium*, *Dicorynia* et *Tabebuia* ont un comportement « fort » par rapport à leurs densités respectives. Par contre, les essences comme *Bocoa* et *Virola* ont un comportement plutôt « faible » par rapport à leurs densités. Les autres essences ont un comportement moyen, plus hétérogène, qui dépend du critère considéré.
- Certains critères comme l'énergie de rupture $G_{r,I}$ (essai de ténacité) ou la contrainte limite σ_y (essai de compression), ont un comportement un peu particulier.

L'énergie de rupture est la seule à intégrer à la fois le comportement avant rupture et le comportement après rupture. Elle combine d'abord le ramollissement mécanique et l'augmentation de la ductilité quand la température augmente. Le comportement après la rupture est plus complexe, il fait intervenir d'autres facteurs comme la cohésion entre les fibres, la résistance à la traction de fibres isolées ou en amas. Il est donc assez logique que le comportement après la rupture soit différent du comportement avant la rupture. D'ailleurs, en ce qui concerne le comportement avant la rupture de l'essai de ténacité (décrit par le module équivalent $P_{r,I}$ et la contrainte à la rupture $\sigma_{r,I}$), le classement des essences est cohérent avec les autres essais mécaniques.

La contrainte limite σ_y est, elle aussi, un peu ambiguë quant à sa détermination et sa signification. Si, pour certaines essences comme *Bocoa* ou *Parkia*, cette contrainte au premier coude que nous avons mesuré sur la courbe, correspond effectivement au début du plateau de flambement (document annexe) ; il n'en est pas de même pour les essences comme *Ocotea* ou *Vouacapoua* où σ_y correspond plutôt à une contrainte de rupture liée à l'apparition de bandes de cisaillement décrites figure III-8. Même pour une déformation homogène avec l'apparition nette d'un plateau de flambement, il n'est pas sûr que le comportement du matériau soit le même. Le début du plateau de flambement peut être dû à l'effondrement successif de petites bandes tangentielles ou encore à l'apparition de micro-bandes de cisaillement orientées à 45° par rapport au plan RT. Il est donc assez difficile de comparer σ_y et les contraintes à la rupture de l'essai de cisaillement et de ténacité qui, par ailleurs, sont très cohérentes quant au classement des essences par rapport à leur densité.

Pourquoi certaines essences ont-elles à densité équivalente, un comportement (mécanique transversal du bois humide) plus ou moins fort que d'autres ?

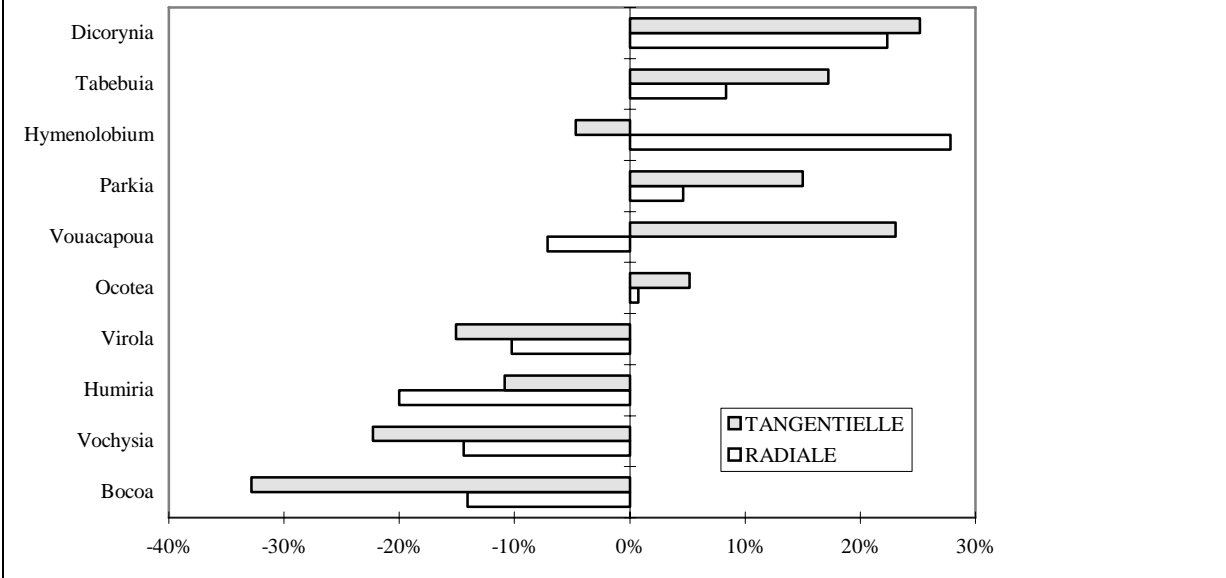
Sans doute faut-il chercher une explication dans l'organisation du plan ligneux :

- la morphologie des fibres (diamètre, épaisseur des parois, diamètre du lumen) dans les amas de fibre (= porosité),
- l'organisation de ces amas de fibres,
- la densité et la dimension des vaisseaux,
- l'organisation des vaisseaux et des amas de parenchyme...

Autant de possibilités qui relèvent de l'anatomie quantitative et qui sont difficilement estimables à la loupe binoculaire.

Toutefois, si l'on compare le classement des essences (toujours en fonction du critère Z) en compression tangentielle et en compression radiale (figure IV - -2), il en ressort que dans l'ensemble, les essences ont le même comportement en compression radiale et tangentielle, sauf deux essences *Hymenolobium* et *Vouacapoua*. Le Saint-Martin jaune a un comportement très fort en compression radiale et plutôt faible en compression tangentielle et inversement pour le Wouacapou. Ces deux essences ont par ailleurs en commun, un parenchyme en bandes anastomosées entre pores voisins, souvent de façon oblique. Les bandes de parenchymes et de fibres sont organisées de telle sorte qu'ils définissent assez fréquemment un arrangement en « w » dans le sens tangentiel. Pour le Wouacapou ces « w » sont plutôt formés par des bandes de parenchymes, tandis que pour le Saint-Martin jaune ces « w » se composent surtout de fibres. Cette remarque permet seulement d'envisager une des nombreuses possibilités d'explication anatomique du comportement mécanique des essences par rapport à leur densité.

Figure IV - -3 Comparaison du classement des essences (Z moyen, tous descripteurs confondus) en compression radiale et tangentielle



IV - 3.2.2. Classement des essences en fonction de leur sensibilité à la température

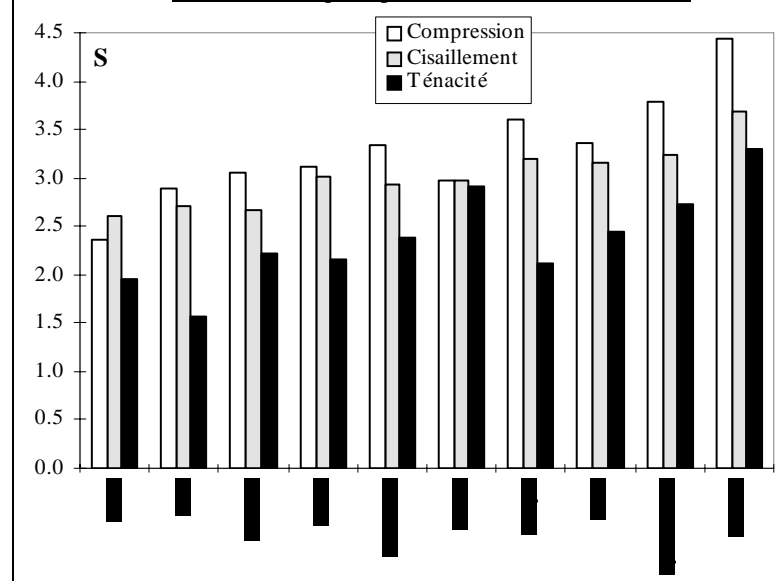
La méthode utilisée pour comparer la sensibilité des essences à la température est assez simple. Elle consiste à calculer le rapport S entre la valeur (moyenne par température) maximum et minimum : $S = \frac{\bar{C}_{\text{maximum}}}{\bar{C}_{\text{minimum}}}$, S correspond à l'amplitude de variation du descripteur sur la plage de température que nous

avons testée. Dans la quasi totalité des cas, ce rapport est égale au rapport $\frac{\bar{C}_{25}}{\bar{C}_{80}}$ entre les valeurs du descripteur pour des températures de 25 et 80°C.

La figure IV - -5 présente les variations de l'amplitude S en fonction des différentes essences pour les trois types d'essai. Suivant les essais, l'amplitude moyenne (tous descripteurs confondus) varie de 1.56 pour l'essence *Virola* en rupture à 4.43 pour l'essence *Tabebuia* en compression.

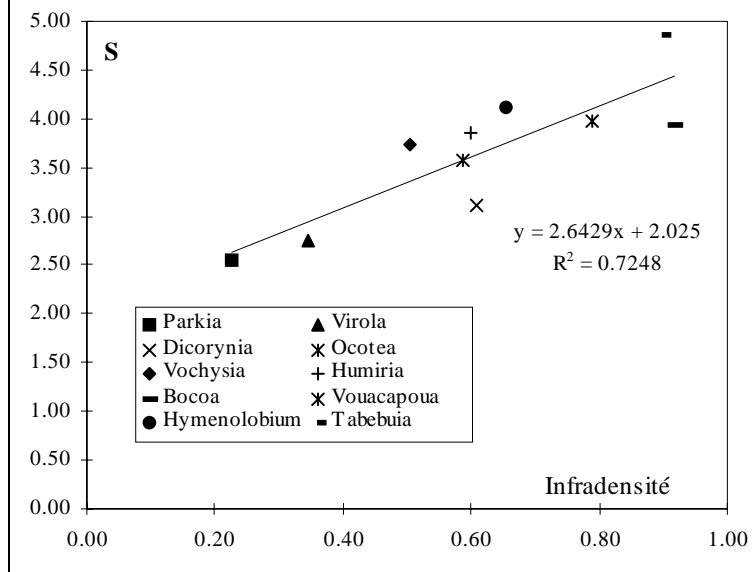
L'amplitude de variation S est plus grande pour les trois modules équivalents E_{re} , $P_{f,l}$ et G_{re} . Ils sont donc plus sensibles à la variation de température (figure IV - -13).

Figure IV - -4 Variation de l'amplitude de variation S moyenne par essais mécaniques, pour les dix essences testées.



L'amplitude de variation S est significativement liée à l'infradensité, le coefficient de corrélation entre S pondéré par S_{maximum} et l'infradensité moyenne par essence est de 0.50 pour l'ensemble des descripteurs (110 observations). **Plus la densité est forte, plus les descripteurs mécaniques sont sensibles à la température.**

Figure IV - -6 Evolution de S moyen pour les 3 modules équivalents : E_{re} , G_{re} , $P_{f,1}$ en fonction de l'infradensité.



l'infradensité est significative au seuil de 1 pour mille : $r = 0.93^{***}$. De plus, la corrélation entre l'amplitude de variation S moyenne pour les trois modules équivalents et le taux de lignine est significative au seuil de 5 %. C'est pourquoi, le pourcentage de lignine peut-être un des facteurs expliquant la corrélation entre S et l'infradensité.

Quoi qu'il en soit, l'infradensité n'explique que 50 % de la variabilité, et la compréhension du

Tableau IV - -23 Composition moyenne des essences (d'après les données du CIRAD) et corrélation avec l'amplitude de variation S moyen (des trois modules équivalents).

Essences	S_{moyen}	ID	Lignine	Cellulose	Hémicelluloses
<i>Parkia</i>	2.55	0.23	22%	52%	20%
<i>Virola</i>	2.75	0.34	26%	46%	-
<i>Dicorynia</i>	3.10	0.61	32%	44%	14%
<i>Ocotea</i>	3.58	0.59	31%	44%	12%
<i>Vochysia</i>	3.74	0.50	-	-	-
<i>Humiria</i>	3.85	0.60	-	-	-
<i>Bocoa</i>	3.93	0.92	35%	42%	15%
<i>Vouacapoua</i>	3.97	0.79	36%	36%	15%
<i>Hymenolobium</i>	4.12	0.65	30%	45%	16%
<i>Tabebuia</i>	4.85	0.90	33%	44%	14%
Coef. cor.		0.85***	0.73*	0.30 NS	0.27 NS

comportement thermo-mécanique spécifique de chaque essence est sûrement plus complexe. Dans l'explication de ce comportement, interviennent sans doute : les compositions spécifiques, les proportions relatives des lignines et des hémicelluloses ainsi que l'organisation de ces macromolécules dans la paroi cellulaire.

La température et l'humidité agissent différemment sur la matrice (lignine, hémicelluloses) et sur les microfibrilles (cellulose). A cause de leur nature cristalline, l'eau ne pénètre pas dans les microfibrilles. Les molécules d'eau agissent à l'interface entre les microfibrilles et la matrice, elles agissent à la fois comme agent

¹⁶Le pourcentage d'hémicelluloses que nous indiquons correspond au pourcentage des pentosanes (dosage du furfural après dégradation à l'acide chlorhydrique) ramené au poids anhydre d'un volume de sciure de bois.

Le pourcentage de lignine correspond au pourcentage de lignine de Klason (dosage du résidu insoluble minimum après attaque du bois par un acide minéral concentré) ramené au poids anhydre de la quantité de sciure testée.

La cellulose est extraite à partir des sciures de bois attaquées par de l'acide nitrique, de l'éthanol et de l'éther. A partir du résidu obtenu, on dose les pentosanes non attaqués par le traitement nitro-alcoolique, en retranchant les pentosanes au dosage de cellulose précédant, on obtient alors la cellulose corrigée. Les pourcentages de cellulose que nous indiquons correspondent au poids de cellulose corrigée par le poids anhydre du volume de sciure initiale. Les différentes méthodes d'extraction sont décrites par SAVARD et al, 1954.

- D'après les données du CIRAD¹⁶ quant à la composition chimique des bois, le pourcentage des trois polymères principaux varie en fonction des essences que nous avons testées (tableau IV - -24). La tendance générale est que le pourcentage de cellulose diminue quand la densité augmente (de 50-60 % il passe à 35-40 %) et inversement le taux de lignine augmente (de 20-25 % pour les faibles densités il monte à 35-40 % pour les essences les plus denses). Cette tendance est toutefois fréquemment perturbée par des pourcentages importants d'extractibles aux solvants. Bien que les données recueillies au CIRAD, soient incomplètes et assez variables pour une même essence, la corrélation entre la lignine et

de gonflement et comme plastifiant (NORIMOTO et GRIL, 1989). Chaque polymère du bois a un état vitreux et un état de transition (secondaire ou vitreuse) en relation avec la composition chimique. L'état vitreux pur, insensible à la température correspond au comportement élastique. Tandis que l'état de transition correspond au comportement viscoélastique sensible à la température. Le comportement du bois correspond à la superposition des comportements individuels de ses constituants (LE GOVIC & al, 1989). A une humidité donnée et pour un intervalle de temps donnés (SALMEN, 1984), il existe donc pour chacun des composants du bois, une **température de transition vitreuse notée T_g** . La cellulose se dégrade au-dessous de sa température de transition. Par contre, la température de transition vitreuse dans des conditions humides, de la lignine est comprise entre 77 et 128°C et celle des hémicelluloses est comprise entre 54 et 142°C, valeurs mesurées par GORING, 1963, à partir de poudre de lignine ou d'hémicellulose isolées du bois d'Épicéa et de Bouleau essentiellement (la température de transition est atteinte lorsque la poudre collapse en un bouchon solide). Le chauffage du bois humide provoque donc un ramollissement de la matrice lignine, hémicelluloses.

L'analyse des procédés de relaxation du bois, en utilisant deux méthodes différentes : la DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis) et la DSC (Differential Scanning Calorimetry) a permis KELLEY & al 1987, de démontrer l'existence de deux températures de transition vitreuse correspondant à deux polymères amorphes distinctes. Leurs expériences ont été réalisées à partir de petits échantillons (DMTA) ou de sciures (DSC) de bois de *Picea sitchensis* Bong. Carr. et d'*Acer saccharum* Marsh. D'après les auteurs et pour une humidité du bois de 30 %, la température de transition de la lignine est de 60°C et celle des hémicelluloses est de -10°C.

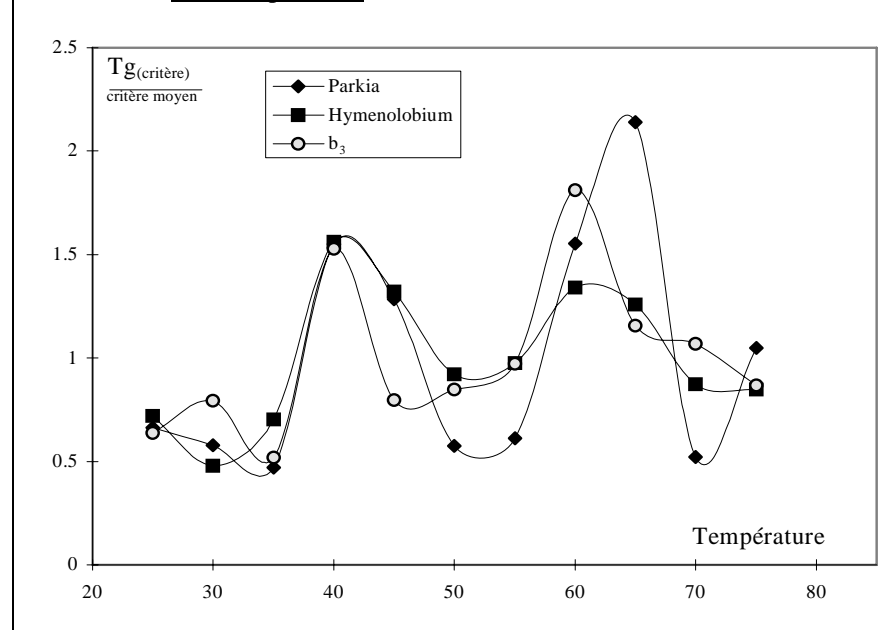
IIDA 1986, a étudié l'évolution du module longitudinal, déterminé par un essai de flexion 3 points, en fonction de la température (16 températures d'essai, de 10 à 95°C), sur le bois humide de 23 essences tempérées. En traçant la tangente de E_l en fonction de la température, il met en évidence, pour 19 essences, deux pics de ramollissement du bois. L'un dans la plage de 39 à 54°C, l'autre couvrant la plage de 63 à 80°C.

Les températures de transition que nous avons obtenues à partir des ajustements du modèle A (paragraphe IV-3) sur nos données, couvrent une plage de température de 51 à 65°C. Si l'on donne le même poids à chaque essai mécanique, la moyenne générale est de **58.6°C**.

Afin de mettre en évidence les températures de « ramollissement préférentiel » du bois, nous pouvons comme l'ont fait IIDA ou KELLEY (op. cit.) calculer la tangente ou la pente instantanée des courbes : descripteurs en fonction de la température (pour plus de lisibilité, la tangente calculée est alors pondérée par la tangente moyenne toutes températures confondues). Les températures pour lesquelles la tangente est la plus élevée correspondent en théorie, à une température ou, au moins un des polymères du bois est proche d'un état de transition.

En utilisant ce mode de calcul, nous obtenons des températures de transition un peu plus variables que celles obtenues à partir du modèle (A). La tangente pondérée maximale se situe dans une plage de 50 à 70°C. Toutefois, essentiellement pour l'essai de compression, nous obtenons pour certaines essences, un deuxième

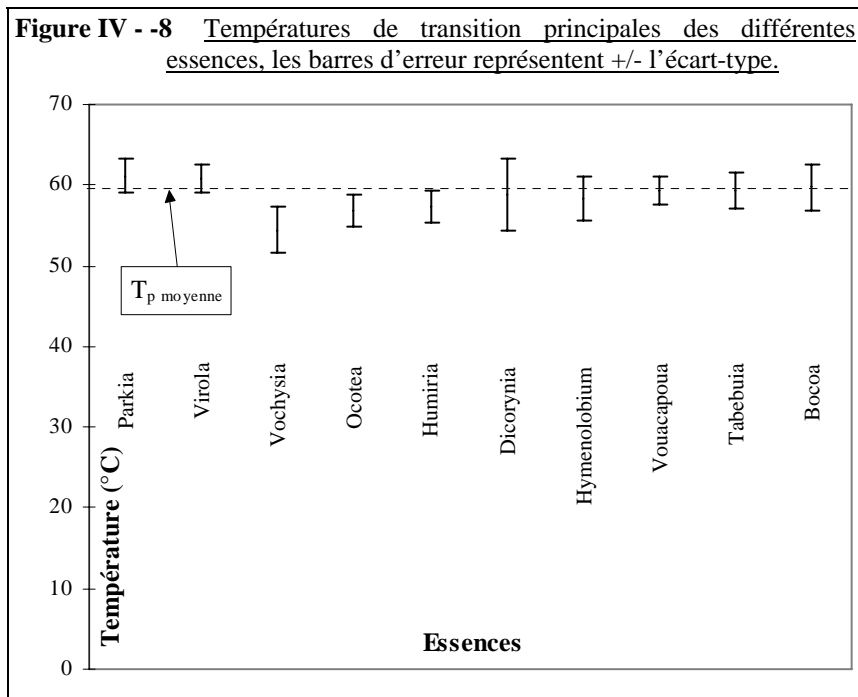
Figure IV - -7 Evolution de la tangente pondérée de $W_{13\%}$ et de b_3 en fonction de la température.



maximum (pic) qui se situe dans une plage de 40 à 45°C (figure IV - -1). On retrouve d'ailleurs ce pic, si l'on trace, en fonction de la température, les variables d'ajustement b_0 , b_3 , b_5 ou b_{10} des descripteurs de l'essai de compression en fonction de l'infradensité (définis en IV-1).

En comparant nos résultats à ceux de KELLEY (op. cit.), nous admettons assez facilement que les températures de transition situées dans la plage 51-65°C, correspondent aux températures de transition vitreuse de la lignine de chaque essence ; Le premier

pic de transition situé dans la plage 40-45°C, également observé par IIDA (op. cit.), pourrait correspondre à une transition secondaire des lignines ou à une transition des hémicelluloses.



De même, si l'on compare la température de transition principale des dix essences entre-elles (figure IV - -9), on remarque que certaines essences comme *Vochysia* ou *Ocotea* ont une température de transition plus faible que les autres essences. Chaque essence a sans doute des lignines ayant un arrangement tridimensionnel et une composition spécifique. Il est possible d'envisager que les lignines de *Vochysia* ou d'*Ocotea* contiennent plus de groupes d'hydroxyle insaturés, ce qui leur confère une plus grande affinité avec les molécules d'eau, et abaisse de par ce fait leur température de transition vitreuse. Ceci n'est bien sûr qu'une hypothèse.

Importance de la fréquence d'observation :

Un paramètre important dans l'étude d'un matériau viscoélastique tel que le bois, est la fréquence d'observation. Suivant la vitesse de sollicitation du matériau ou la fréquence d'observation, la réponse mécanique de celui-ci sera différente.

SAMUEL (1984), constate une évolution de la température de transition vitreuse de la lignine du bois humide de *Picea abies* Karst. en fonction de la fréquence. A partir de mesures des modules longitudinaux et transversaux sur des essais de vibrations sinusoïdales forcées de petites amplitudes (déformation inférieure ou égale à 0.1 %). Pour des vitesses de déformation allant de 50 à 20000 microdéformations par seconde, il obtient respectivement des températures de transition allant de 82 à 100°C. Par le calcul, il extrapole pour de très petite fréquence environ 10^{-4} Hz (soit pour 0.1 % de déformation une vitesse de déformation de 0.1 microdéformations par seconde) et obtient une température de transition de 72°C. De plus il compare, le ramollissement du bois dans la direction longitudinale et transversale et obtient sensiblement les mêmes valeurs de température de transition.

Dans nos essais, la vitesse de déformation était de 500 microdéformations par seconde pour l'essai de cisaillement et de 278 microdéformations par seconde pour l'essai de compression. Nous étions donc bien dans la plage de vitesse de déformation étudiée par SAMUEL. Par contre, nous avons travaillé à des taux de compression jusqu'à 100 fois plus élevés.

La vitesse de déformation joue un rôle important dans des essais mécaniques, comme la température elle peut modifier le comportement du matériau. Pour de nombreux polymères, il a d'ailleurs été mise en évidence une équivalence entre l'écoulement du temps (ou la fréquence d'observation) et la valeur de la température (LE GOVIC op. cit.). **C'est donc un facteur important dans la comparaison entre des essais mécaniques quasi statiques, et des essais de déroulage très dynamiques.**

IV - 3.3. Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous disposons d'un modèle de variation des principaux descripteurs mécaniques avec la température pour chaque essence testée (sur un seul arbre pour l'instant).

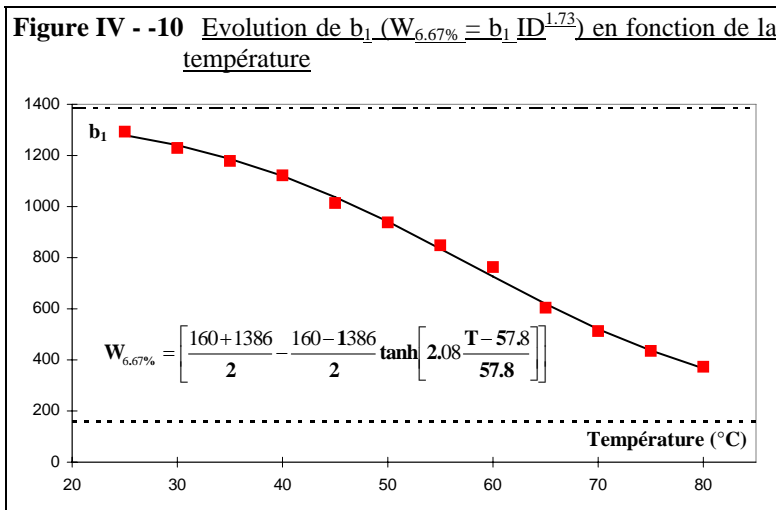
Par ailleurs, il apparaît tout à fait possible de limiter le nombre de descripteurs mesurés compte tenu des corrélations très fortes entre certains d'entre eux. A la limite, sous réserve de vérification complémentaire, il paraît possible de n'effectuer que l'un ou l'autre des essais de compression et de cisaillement tout en obtenant finalement une bonne estimation des descripteurs des deux essais à partir des formules de régression. Il paraît aussi possible de se contenter dans ces essais de la première partie de la courbe sans aller jusqu'aux contraintes limites, ce qui permettrait peut être d'éviter l'endommagement et d'utiliser plusieurs fois la même éprouvette. Cela devrait être testé.

Par contre, il reste indispensable d'effectuer l'essai de ténacité qui donne des résultats tout à fait reproductibles et apporte une information moins bien ou mal corrélée avec les résultats des deux autres essais.

L'analyse de l'influence de l'infradensité permet d'envisager un modèle moyen standard, fonction de cette infradensité, pour calculer les différents descripteurs à une température donnée. Il est possible de partir soit de l'analyse de l'infradensité, soit de l'analyse de la sensibilité à la température pour construire de tels modèles.

A titre d'exemple nous donnons le résultat pour le descripteur $W_{6.67\%}$:

Analyse à partir de l'infradensité



Nous avons vu dans la partie IV-1, que l'évolution des descripteurs mécaniques avec l'infradensité pouvait le plus souvent être résumé par des familles de courbe du type : $C = b_i ID^\beta$, ou β est une constante. Si l'on représente l'évolution de b_i en fonction de la température d'essai, on peut assez facilement simuler cette évolution par le modèle (A). Un exemple est donné par la figure Figure IV - -11. La modélisation du descripteur en fonction de la température et de l'infradensité peut être résumée par l'équation suivante :

$$B) \quad C = \left[\frac{C_1 + C_0}{2} - \frac{C_1 - C_0}{2} \tanh \left[a \frac{T - T_p}{T_p} \right] \right] \times ID^\beta$$

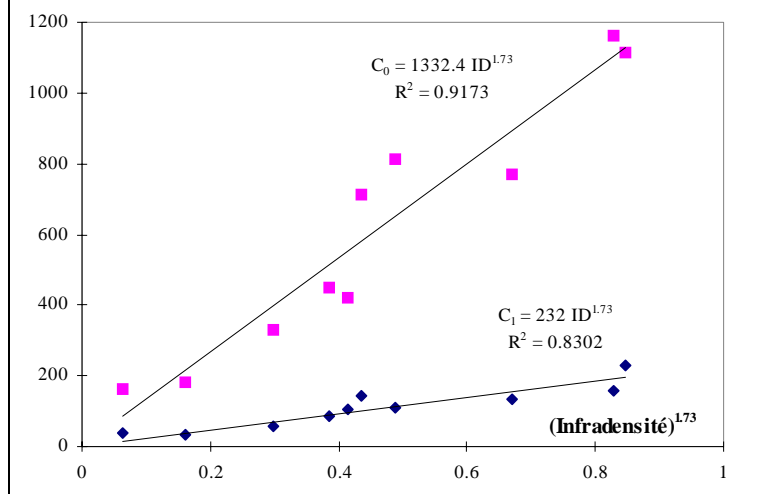
Valeurs des variables de (B) déterminées à partir de l'analyse de la densité pour l'énergie de compression à 6.67 % de déformation

C	C ₀	C ₁	T _p	a	β
W _{6.67%}	1386	160	57.8	2.08	1.73

La figure Figure IV - -12 compare les données calculées par le modèle (B) ci-dessus et les données expérimentales.

Analyse à partir de la sensibilité à la température

Figure IV - -13 Evolution des variables C_1 et C_0 des ajustements de (A) sur chaque essence en fonction de l'infradensité pour $W_{6.67\%}$.



T_p moyenne pour l'ensemble des essences, on retrouve la même équation que le modèle (B). Les valeurs des différentes variables sont toutefois légèrement différentes, comme nous le montre le tableau suivant :

Valeurs des variables de (B) déterminées à partir de l'analyse de la sensibilité à la température pour l'énergie de compression à 6.67 % de déformation

C	C_0	C_1	T_p	a	β
$W_{6.67\%}$	1332	232	57.4	2.27	1.73

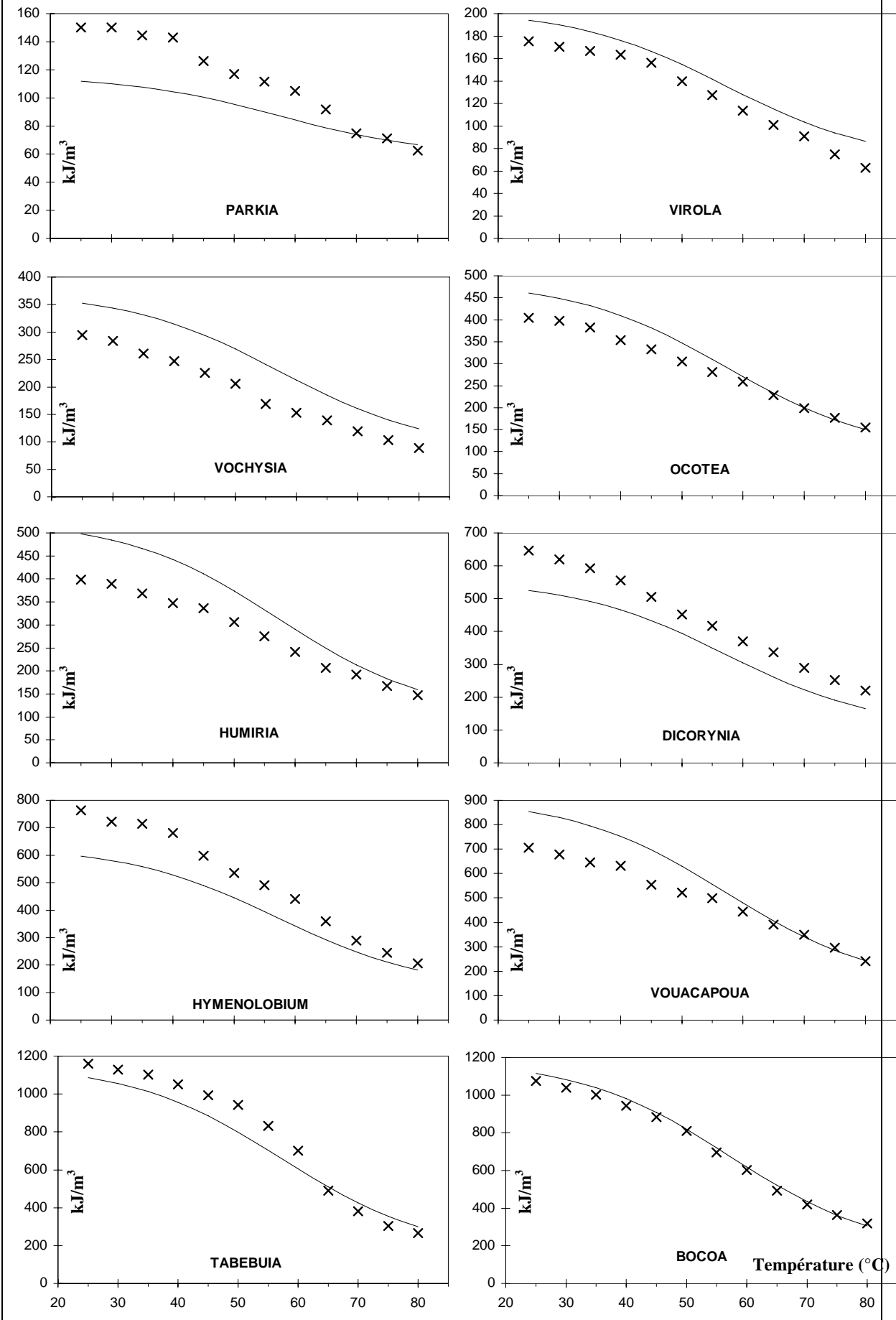
En conclusion, la température et la densité expliquent une bonne partie de la variabilité expérimentale, mais elles n'expliquent pas toute cette variabilité. La composition chimique, micro et macro-structurale du matériau, interviennent certainement dans l'interprétation de celle-ci.

Nous pouvons de la même façon, à partir de l'évolution des descripteurs en fonction de la température, ajuster sur les données une équation du type (A), défini en IV-2. Les variables « a » et « T_p » de ce modèle ne varient pas en fonction de l'infradensité des essences étudiées. Par contre, les variables C_1 et C_0 varient en fonction de l'infradensité. On peut assez facilement ajuster une fonction puissance sur les données (ID, C_1) et prendre sans trop diminuer le coefficient de détermination, la même puissance pour C_1 et C_0 (figure Figure IV - -14 **Schéma du dispositif de compression**

). En prenant un coefficient « a »

moyen et une température de transition

Figure IV - -15 Comparaison entre les valeurs calculées par le modèle (B) (en trait plein) et les données expérimentales moyennes par température pour $W_{6.67\%}$



DEROULAGE

V - Essais de déroulage

V - 1. Description des expérimentations

V - 1.1. Description de la microdérouleuse

La microdérouleuse que nous avons utilisée a été conçue par BUTAUD (1994) en reprenant et en modifiant profondément le premier prototype mis au point par THIBAUT (1988).

Cette microdérouleuse permet de mesurer en continu les efforts tangentiels et normaux exercés par une rondelle de bois déroulée, sur le couteau (X_c, Y_c) et la barre de pression (X_b, Y_b). L'acquisition des efforts, les réglages des paramètres de coupe (angle de dépouille, cote verticale cote horizontale, angle d'entrée de la barre) sont gérés par un micro-ordinateur. De la même manière que de nombreuses dérouleuses industrielles, c'est l'ensemble de coupe (comportant deux couronnes dynamométriques, une pour l'outil, l'autre pour la barre) qui se déplace. Les moteurs d'entraînement du billon et d'avance du chariot d'usinage sont des moteurs de type BRUSHLESS asservis numériquement.

Les efforts de coupe sont mesurés par quatre capteurs piézo-électriques à quartz, contrairement à la microdérouleuse de THIBAUT (1988) où les efforts étaient mesurés à partir de la déformation de huit barrettes dynamométriques équipées chacune d'une paire de jauges. Les capteurs piézo-électriques sont très fiables et très sensibles. Le principal défaut de ces capteurs est leur sensibilité aux bruits mécaniques (moteurs) et à la température.

Les paramètres de coupe sont gérés par quatre moteurs pas à pas pilotés par ordinateur (deux moteurs génèrent des rotations et deux moteurs génèrent des translations, par l'intermédiaire de cales biaises). Chacune des deux couronnes dynamométriques (figure V - -1) est fixée à un socle métallique rigide indépendant, par l'intermédiaire de roulements (roulement à rouleaux croisés pour la couronne intérieure porte outil, et roulement à billes pour la couronne extérieure porte barre). La rotation des couronnes par rapport aux socles permet le réglage de l'angle de dépouille et de l'angle d'entrée de la barre. Les deux socles sont fixés au bâti du chariot par une série de butées à billes permettant les deux translations (dont l'amplitude est limitée) nécessaires aux réglages des cotes verticales et horizontales.

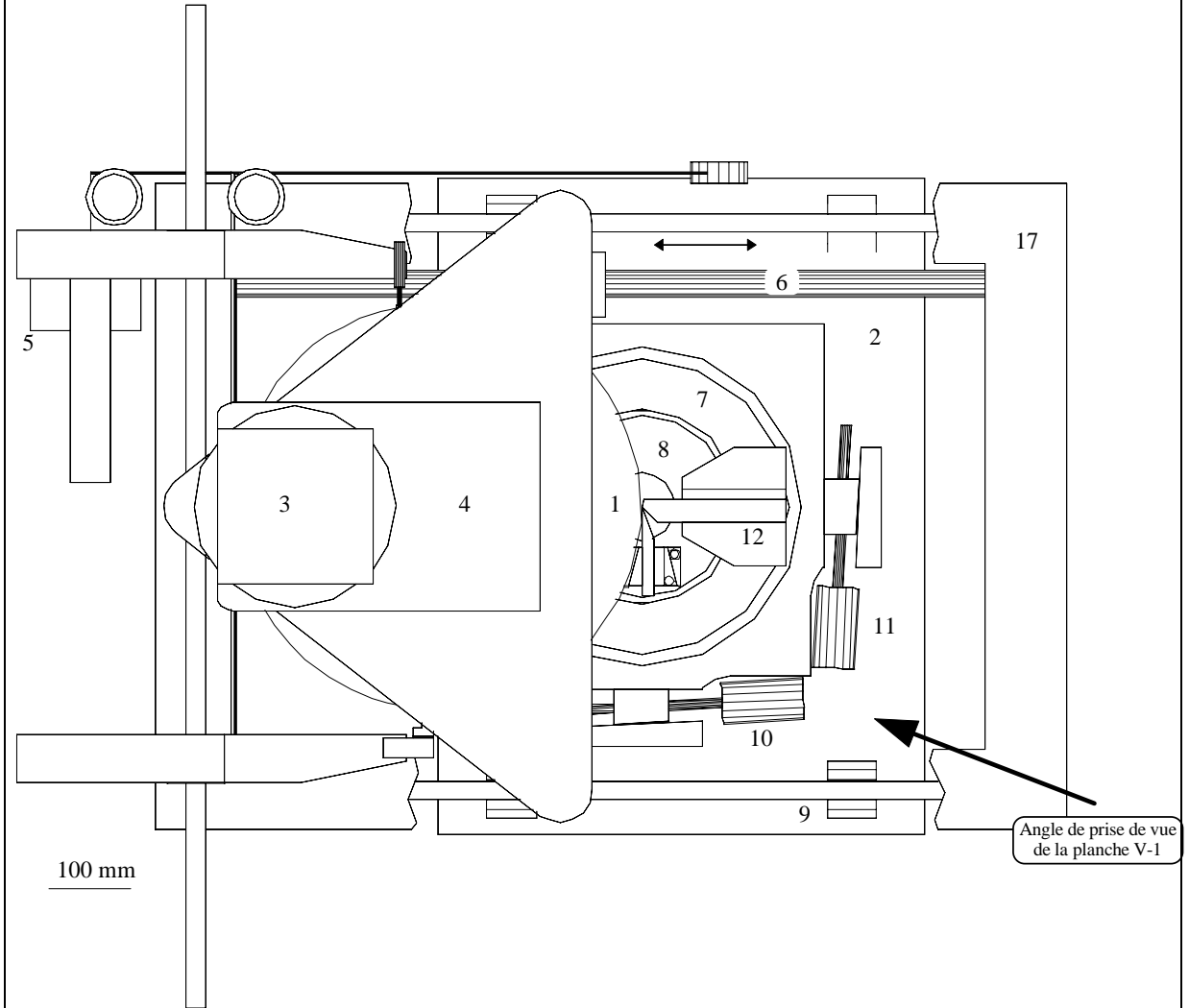
La vitesse linéaire de coupe est constante quel que soit le rayon (la vitesse de rotation du moteur d'entraînement est asservie par le rayon de déroulage et elle impose une vitesse de rotation au moteur d'avance du chariot), elle peut varier expérimentalement de 3 m/s à 0.001 m/s. Pour l'ensemble de nos essais, nous avons utilisé une vitesse de 0.07 m/s (en déroulage industriel la vitesse d'usinage et de l'ordre du m/s).

L'ensemble des commandes de la microdérouleuse et l'acquisition des données sont entièrement pilotés par un P.C. (figure V - -2), sur la base d'un programme élaboré à partir du logiciel LABVIEW par DECES-PETIT (BUTAUD & al, 1995).

La microdérouleuse peut dérouler des rondelles de 30 mm de large, celles que nous avons utilisées avaient une largeur de 20 mm, ce qui est suffisamment grand par rapport à la longueur des fibres pour que les effets de bord puissent être négligés (THIBAUT, 1988).

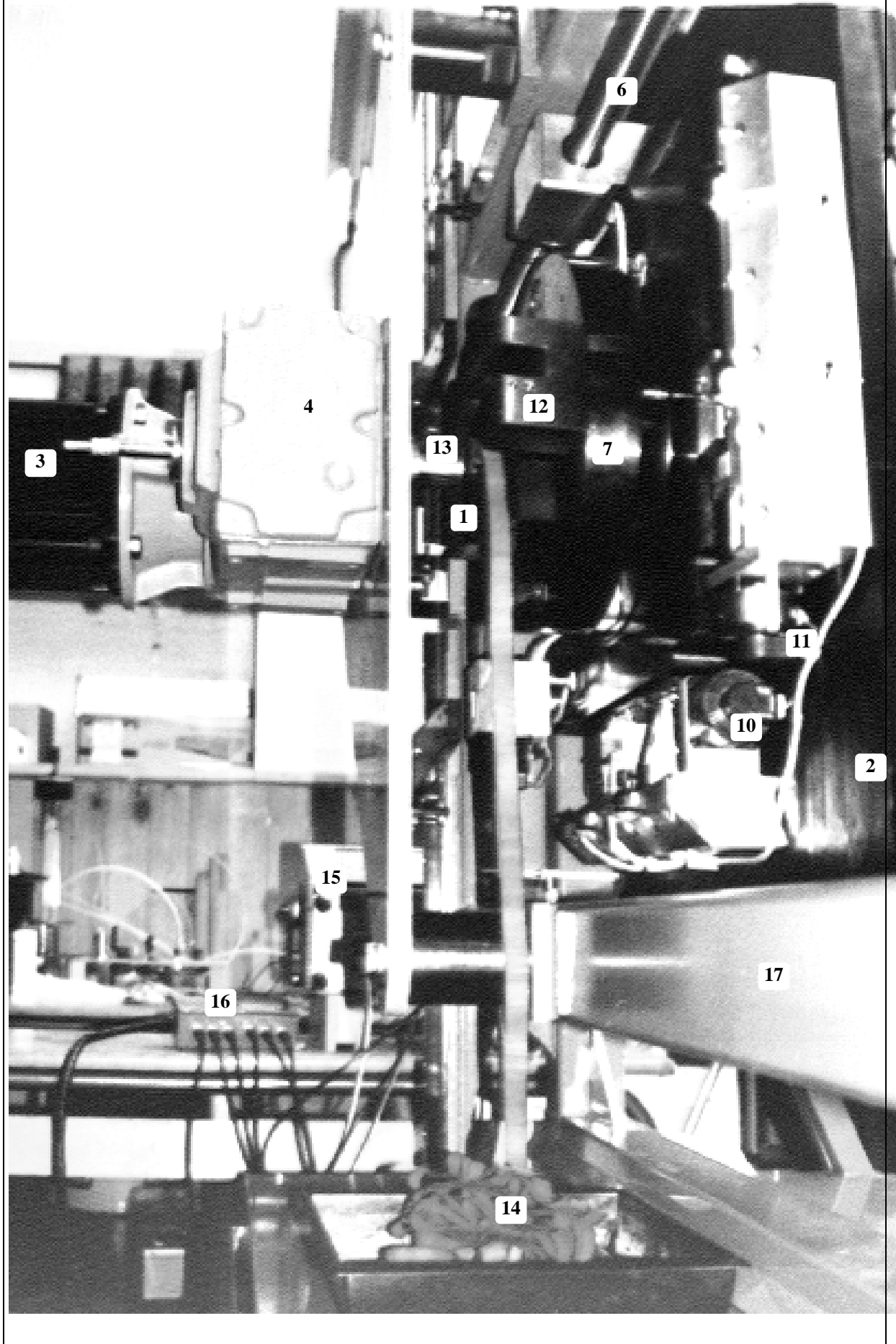
L'ensemble de microdéroulage tel que nous l'avons utilisé était un outil fiable et convivial, bien qu'il ne soit pas totalement terminé (il manquait alors, la caméra, la mesure du rayon de déroulage et la mesure de la sur-épaisseur).

Figure V - -1 Schéma du dispositif de microdéroulage (d'après BUTAUD, 1994)



- | | |
|----|--|
| 1 | : Eprouvette |
| 2 | : Chariot d'usinage |
| 3 | : Moteur d'entraînement du billon |
| 4 | : Motoréducteur |
| 5 | : Moteur d'entraînement du chariot |
| 6 | : Vis sans fin (entraînant le chariot) |
| 7 | : Couronne porte barre de pression |
| 8 | : Couronne porte couteau |
| 9 | : Rail de guidage du chariot |
| 10 | : Moteur pas-à-pas permettant le réglage de la cote horizontale |
| 11 | : Moteur pas-à-pas permettant le réglage de l'angle d'entrée de la barre |
| 12 | : Porte barre |
| 13 | : Cône d'entraînement de l'éprouvette |
| 14 | : Copeau continu de Grignon |
| 15 | : Amplificateur Kistler |
| 16 | : Bornier |
| 17 | : Bâti |

Planche V - -1 Vue du dispositif (même légende que la figure V-1).



V - 1.2. Résultats acquis lors d'un essai

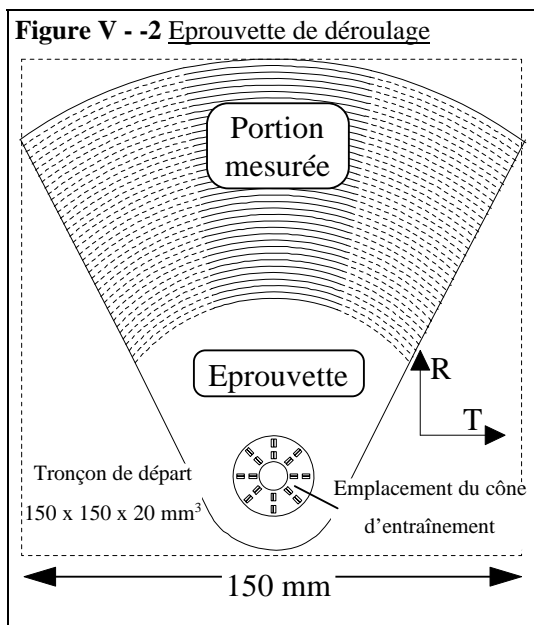
Chaque capteur piézo-électrique, lorsqu'il est contraint, fournit trois signaux sous forme d'un courant de faible intensité sur chacun des axes d'un repère orthonormé X,Y,Z (figure V - -1). L'information donnée par l'axe Z n'est pas utilisée (l'axe Z correspond à la direction des fibres lors du déroulage), le capteur a été précontraint dans cette direction à une charge de 50 kN.

Les informations analogiques X,Y provenant de chacun des capteurs sont amplifiées pour chaque couronne dynamométrique, elles sont ensuite transformées en données numériques par une carte d'acquisition. La fréquence d'acquisition peut varier de 1 à 5000 Hz. Dans nos essais, pour diminuer la taille des fichiers nous l'avons limitée à 100 Hz (ce qui pour une vitesse de 70 mm/s correspond une donnée acquise toutes les 700 μm , pour chacune des composantes des efforts F_c et F_b). Pour chaque essence, l'amplification est maximisée de manière à ce que le bruit parasite soit le plus petit possible, par rapport à la valeur des efforts.

L'étalonnage a été fait à l'aide d'une série de poids (la masse du poids le plus lourd était de 40 kg). Une barre d'acier munie d'une poulie en son extrémité, mise à la place de la barre de pression ou de l'outil, a permis d'étalonner (par l'intermédiaire de poulies) la sensibilité des axes X_c, Y_c et X_b, Y_b .

Préparation des éprouvettes :

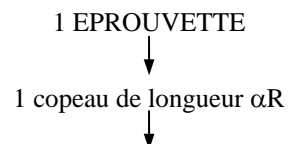
Les deux faces transversales des tronçons de 20L x 150R x 150T mm³, débités dans les dix poutres initiales (cf. figure II-1) sont surfacés à l'aide d'une fraise à métaux ($\varnothing = 150$ mm). Les tronçons sont ensuite



percés et débités en triangle (figure V - -3). Les éprouvettes ainsi préparées sont déroulées de façon discontinue. La portion utilisée pour les mesures (aussi bien pour les mesures d'efforts que pour les mesures physiques sur le copeau usiné) correspond à la partie centrale de l'éprouvette, sa longueur varie de 3 à 7 cm, le rayon minimum de déroulage est toujours supérieur à 6 cm.

Le programme de déroulage, élaboré par DECES-PETIT, permet une acquisition en continue des efforts X_c, Y_c, X_b, Y_b lors d'un essai. Il permet de plus, de calculer la moyenne et l'écart-type des données expérimentales sur des portions de courbes de variations d'efforts en fonction du temps (ou du déplacement linéaire).

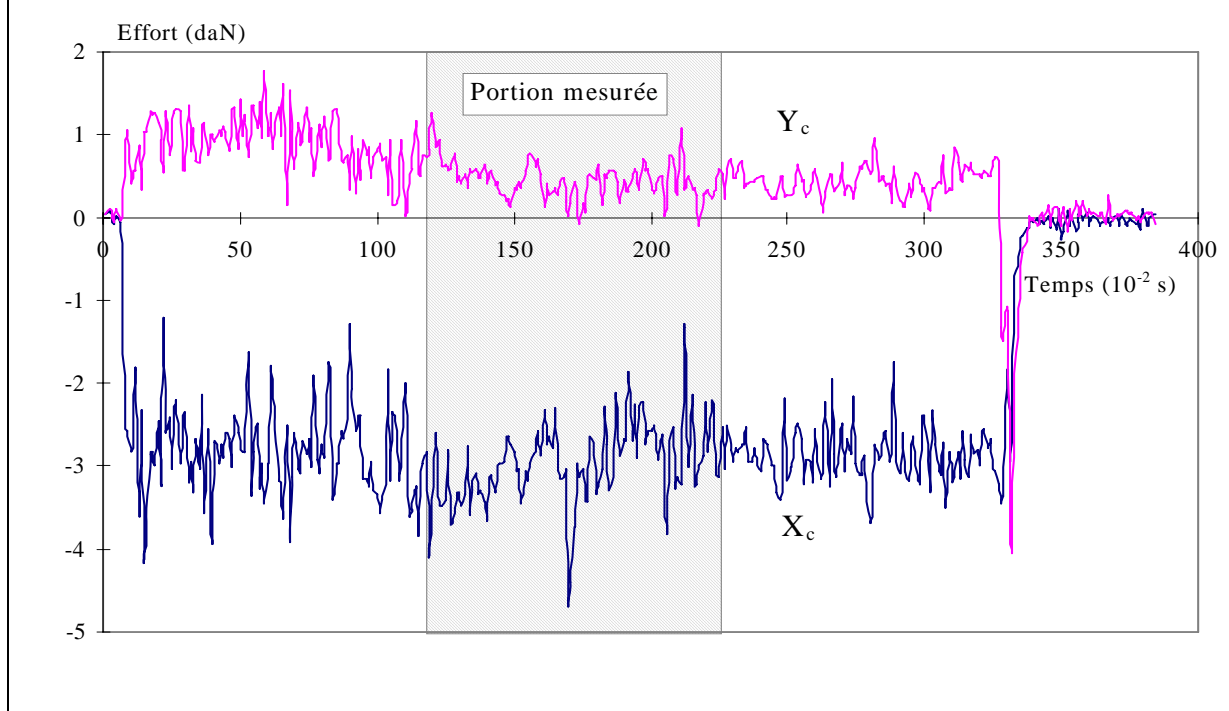
Données recueillies lors d'un essai



← portion centrale longueur appro
Moyenne & Ecart-type des efforts X_i, Y_i

Où R est le rayon de déroulage, et α l'angle entre les deux rayons, de début et de fin de coupe, X_i, Y_i sont les composantes normales et tangentielles des efforts F_c ou F_b .

La figure V - -1 nous donne un exemple des profils d'efforts X_c et Y_c mesurés sur le copeau. Les efforts que nous mesurons, sont ceux exercés par le bois sur l'outil, ce sont les opposés des efforts exercés par l'outil sur le bois.

Figure V - -4 Profils d'efforts exercés par le bois sur le couteau (essence Yayamadou, épaisseur 0.4 mm, vitesse 70 m/s).

V - 1.3. Etuvage des rondelles

L'étuvage des éprouvettes se fait dans un bain marie chauffant thermostaté de 15 litres.

L'organisation des manipulations se décompose de la manière suivante :

- Fixation de l'éprouvette (elle est vissée au cône morse d'entraînement)
 - A partir du programme de commande fait par DECES-PETIT,
 - ↳ Mise en place automatique du chariot (les moteurs ayant déjà été initialisé),
 - ↳ Réglage des paramètres de coupe et de l'amplification,
- (A) {
- ↳ Essai de déroulage,
 - ↳ La phase (A) peut se répéter une ou deux fois.

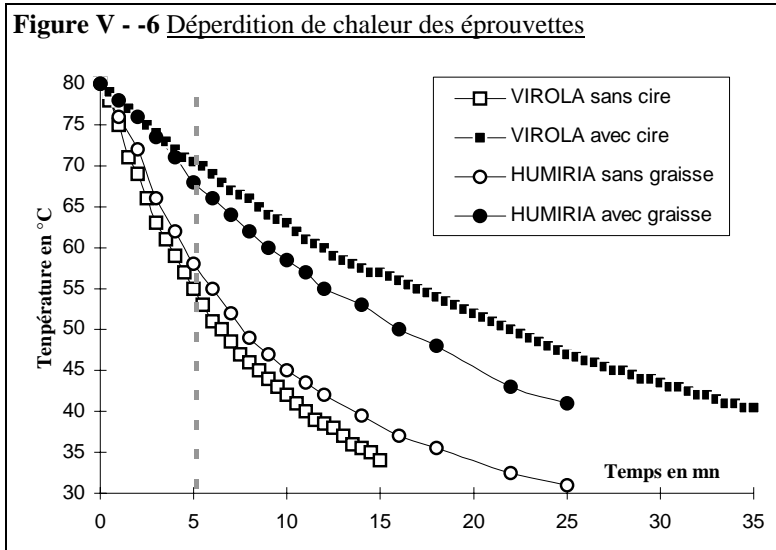
L'ensemble des manipulations n'excède pas 4 à 5 minutes.

Le principal problème rencontré lors de l'essai est le refroidissement des rondelles. L'éprouvette de déroulage est de faible épaisseur longitudinale et possède deux grandes surfaces transversales favorisant la diffusion thermique. De part sa nature orthotrope et la présence des vaisseaux, la conduction thermique du bois humide est de 2.25 à 2.75 fois plus élevée dans la direction longitudinale que dans les directions transversales (d'après McLEAN, 1946 in MARCHAL, 1989).

Il est donc nécessaire de ralentir le plus possible cette déperdition thermique. Pour les deux premières essences que nous avons expérimentées, la procédure retenue est celle utilisée par MARCHAL (1989). Elle consiste à recouvrir les éprouvettes de cire ou paraffine. Pour que ces protections adhèrent suffisamment au bois, qu'elles ne se détachent pas en plaque lors du déroulage et ne perturbent pas les efforts de coupe, elles doivent être utilisées à des températures proches de leur point de fusion. Marchal utilise selon la température d'essai, deux cires et une paraffine dont les points de fusion sont différents : paraffine (54-56°C), cire minérale (65-67°C), cire de Carnauba (83-84°C). Cette méthode nécessite de longues manipulations, par exemple, lorsque l'on passe d'un essai à 50 à un essai à 60°C, il faut enlever la paraffine de l'éprouvette en la chauffant au bain marie puis la plonger dans un bain de cire minérale, en espérant qu'il n'y ait plus de paraffine auquel cas la cire ne tiendrait pas au-dessus de 60°C. De plus, les deux surfaces transversales (fraisées) de nos éprouvettes étaient très lisses, les cires adhéraient difficilement sur ces faces et se décrochaient en plaque.

Partant de la constatation, que l'action principale de la cire était de limiter la déperdition de chaleur par évaporation superficielle (son pouvoir isolant étant relativement limité sur les faibles épaisseurs appliquées), nous avons préféré, pour les autres essences, utiliser comme protection une graisse silicone (la consistance de cette graisse, de marque GEB, est presque invariable entre -40 et +260°C). La protection contre la déperdition de chaleur était à peu de chose près, la même que celle apportée par la cire, au moins pendant le temps de manipulation (figure V - -5).

Que ce soient les cires ou la graisse, la protection n'était pas suffisante pour éviter la déperdition de chaleur par radiation, la température d'essai était de 10 à 12°C plus faible en fin d'essai. De plus, la surface

Figure V - -6 Déperdition de chaleur des éprouvettes

nouvellement créé à chaque tour favorise, par évaporation, une déperdition rapide de la chaleur. Il existe donc contrairement à nos essais mécaniques (où la température était bien mieux régulée), une incertitude, d'au moins $\pm 5^\circ\text{C}$, sur la température exacte de l'essai. C'est pourquoi nous avons chauffé nos éprouvettes cinq degrés au-dessus de la température théorique de l'essai.

Un filet d'eau chauffée (circulant en circuit fermé) arrosant la surface usinée, donnerait de meilleurs résultats, à condition que le dispositif et les capteurs soient suffisamment bien protégés.

V - 1.4. Mesure

du coefficient de frottement

Nous l'avons vu dans le premier chapitre, la valeur de l'angle de frottement bois-métal « ϕ » est nécessaire aux calculs des différents efforts de coupe.

THIBAUT (1988), MOTHE (1988), MARCHAL (1989) ont mesuré le coefficient de frottement à l'aide d'un patin « flottant » situé en amont de l'arête du couteau (exerçant une pression constante sur le bois de 40 N). Le couteau situé bien en aval de la barre, déroulait un copeau de faible épaisseur qui permettait de rafraîchir la surface à chaque tour.

Nous avons opté pour une méthode similaire, mais en guise de patin, nous avons utilisé le dos de la barre de pression poncé sur un polissoir avec un papier abrasif à l'eau de grain 1200 (c'est avec ce grain de 1200 que nous avons affûté le couteau). La barre et le couteau ont été faits dans le même acier de dureté 51 HRC. Le dos de la barre ainsi préparé était positionné tangentiellement à la surface usinée et centré sur le rayon de déroulage pendant toute la durée du déroulage. (figure V - -2).

$$\phi = \arctan\left(\frac{\bar{X}_b}{\bar{Y}_b}\right) = \arctan\left(\frac{2.3}{8.7}\right) = 15^\circ$$

L'effort résultant F_b exercé par le bois sur le dos de la barre de pression variait de 30 à 70 N, sur cette plage la valeur de ϕ varie peu. Pour de faibles valeurs de F_b , le bruit expérimental perturbait fortement la mesure. Au-dessus de 80 N, ϕ semblait diminuer légèrement, du moins sur les quelques essais préliminaires. Les mesures de ϕ ont été effectuées à la même vitesse linéaire que les essais de déroulage (70 mm/s). Nous avons fait dix ou vingt répétitions par essence, en prenant pour le calcul, les efforts (X_b , Y_b) moyens d'une portion peu tourmentée du copeau (figure V - -8).

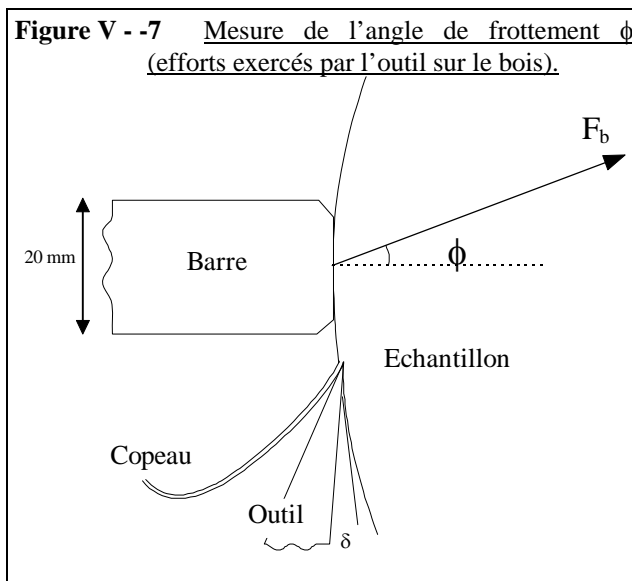
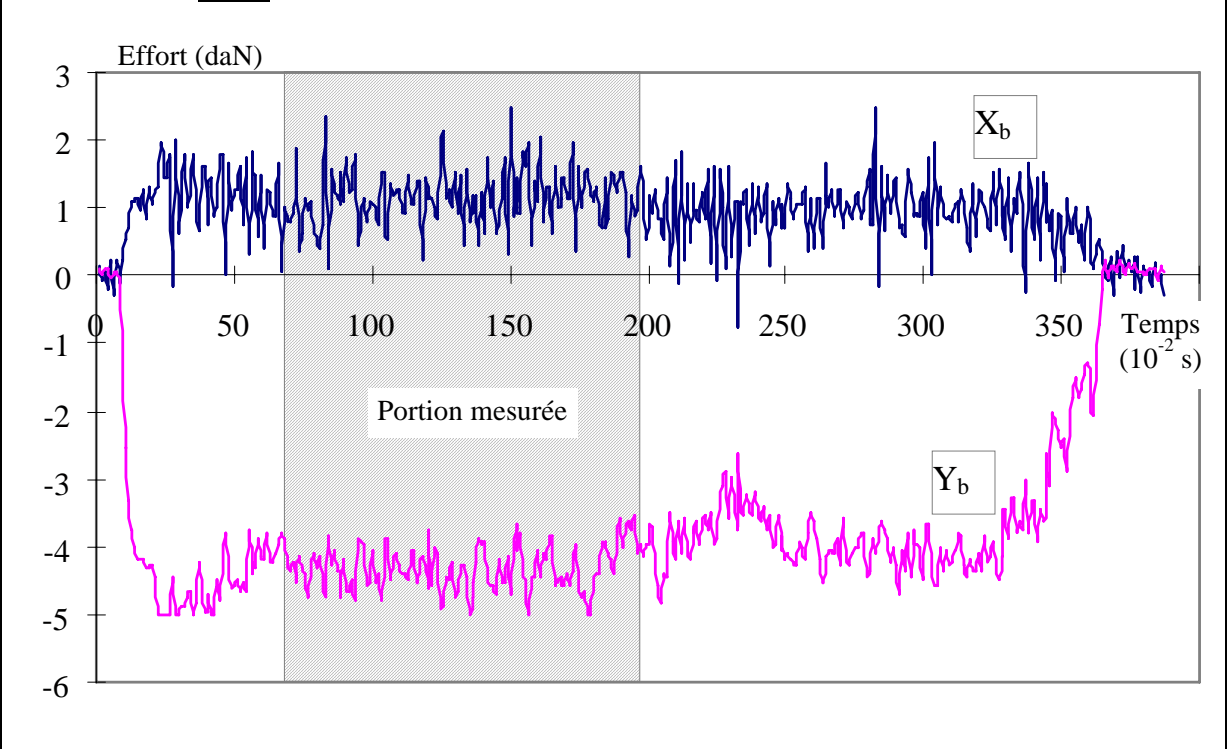
Figure V - -7 Mesure de l'angle de frottement ϕ (efforts exercés par l'outil sur le bois).

Figure V - -9 Exemple de profils d'efforts exercés par le bois sur le patin de frottement (Grignon, T = 27°C).
V-136

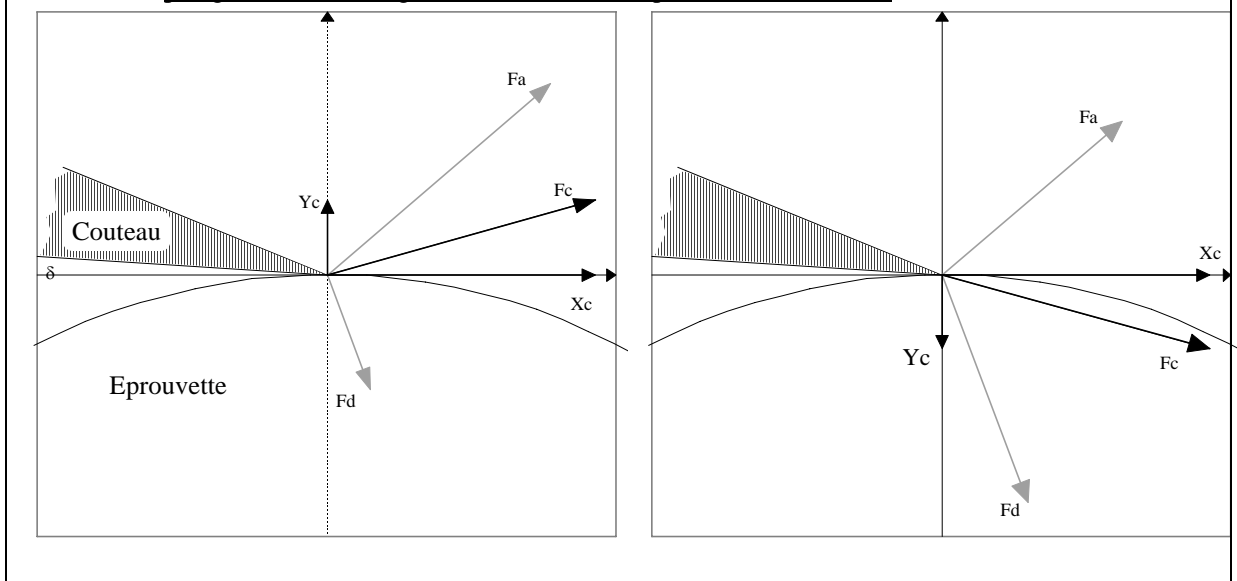


V - 1.5. Essais de coupe sans barre de pression

Sur les dix essences étudiées, nous avons réalisé une série d'essais de déroulage sans barre de pression, à différentes températures et pour différentes passes d'usinage.

La condition de départ que nous nous étions fixée, était que le couteau fût toujours en légère « plongée » dans le bois. Dans cet état, la valeur de F_d est toujours plus faible que celle de F_a élevée et la coupe est plus stable (THIBAUT, comm. pers.). Dans le repère orthonormé outil-bois (effort appliqués par l'outil sur le bois), cette condition de plongée de l'outil est vérifiée lorsque Y_c est positif (figure V - -3). Afin de maintenir Y_c légèrement positif, nous devons modifier l'angle de dépouille en permanence, il fallait le diminuer, à la fois lorsque la passe augmentait, mais aussi lorsque le rayon de déroulage diminuait.

Figure V - -10 Comparaison des efforts de coupe en situation de léger refus de coupe à droite et de légère plongée du couteau à gauche (efforts exercés par l'outil sur le bois).



Suivant les essences, nous avons testé 4 ou 6 températures d'essai différentes. Pour chaque passe d'usinage et pour chaque température, nous avons fait systématiquement trois répétitions. Sur chacune de ces

répétitions, nous avons prélevé la partie centrale du copeau, afin d'en déterminer l'épaisseur (mesurée au palmer en trois points du copeau) et l'infradensité (calculé à partir du poids anhydre et du volume saturé mesuré par les méthodes « a » ou « c » décrites au § II-4.1.1.). Avant chaque série de trois essais, nous procédions à une ou deux passes de calibrage, ce qui permettait de déterminer l'angle de dépouille et l'amplification adéquate.

Pour une essence donnée, nous avons limité la plage d'épaisseur étudiée à l'aide de critères visuels qualitatifs (placage très fissuré, placage pelucheux), mais aussi par des critères quantitatifs : lorsqu'il y a une fissuration importante ou un flambement du copeau, les variations des efforts de coupe aussi bien, F_a que F_d augmentent fortement et le coefficient de variation (écart-type de F_i / moyenne de F_i) croît de façon significative (THIBAUT, 1988).

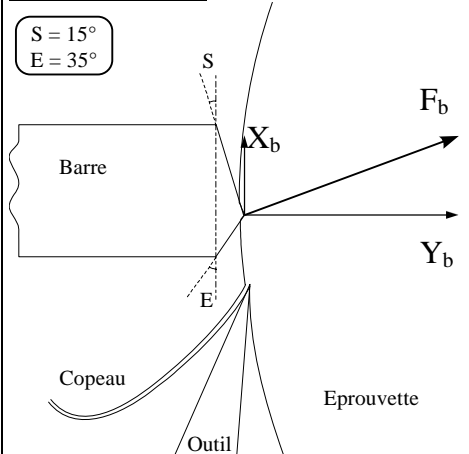
Tableau V - -1 Valeurs des passes (Pa. en mm) et des angles de dépouille (δ en $^{\circ}$) aux différentes températures.

Parkia	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ				
27°C	0.30	3.0	0.40	1.0	0.50	0.5	0.60	0.5	0.80	0.0	1.00	-0.2	1.50	-0.5				
50°C	0.30	3.0	0.40	1.0	0.50	0.5	0.60	0.5	0.80	0.0	1.00	-0.2	1.50	-0.5				
70°C	0.30	3.0	0.40	1.0	0.50	0.5	0.60	0.5	0.80	0.0	1.00	-0.2	1.50	-0.5	2.00	-0.8		
90°C			0.40	3.0	0.50	1.0	0.60	1.0	0.80	0.5	1.00	0.0	1.50	-0.3	2.00	-0.5		
Virola	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ				
27°C	0.30	3.0	0.40	1.0	0.50	0.5	0.60	0.5	0.80	0.0	1.00	-0.2	1.50	-0.5				
53°C	0.30	3.0	0.40	1.0	0.50	0.5	0.60	0.5	0.80	0.0	1.00	-0.2	1.50	-0.5	2.00	-1.0		
75°C	0.30	3.0	0.40	1.0	0.50	1.0	0.60	0.5	0.80	0.0	1.00	-0.2	1.50	-0.5	2.00	-1.0		
90°C			0.40	1.0	0.50	1.0	0.60	0.5	0.80	0.0	1.00	-0.2	1.50	-0.3	2.00	-0.8		
Vochysia	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ				
27°C	0.30	1.0	0.40	0.8	0.50	0.6	0.60	0.4	0.70	0.3	0.80	0.1	1.00	0.0				
50°C	0.30	1.0	0.40	0.8	0.50	0.6	0.60	0.4	0.80	-0.2	1.00	-0.4	1.30	-0.6				
55°C	0.30	1.0	0.40	0.8	0.50	0.6	0.60	0.2	0.80	-0.5	1.00	-0.8	1.00	-1.0				
70°C	0.30	1.0	0.40	0.5	0.50	0.0	0.60	-0.3	0.80	-0.5	1.00	-0.7	1.30	-0.8				
75°C	0.30	1.0	0.40	0.5	0.50	0.0	0.60	-0.3	0.80	-0.5	1.00	-0.7	1.30	-0.8				
90°C	0.30	0.5	0.40	-0.5	0.50	-0.8	0.60	-1.0	0.80	-1.2	1.00	-1.5	1.30	-1.6	2.00	-1.8		
Ocotea	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ		
27°C	0.2	5.0	0.30	4.5	0.40	3.5	0.50	3.0	0.60	2.5	0.80	2.0	1.00	1.5	1.20	1.5	1.50	1.5
50°C	0.2	4.5	0.30	4.0	0.40	3.0	0.50	2.5	0.60	2.0	0.80	1.5	1.00	1.5	1.50	1.0		
55°C	0.2	4.0	0.30	3.0	0.40	1.5	0.50	1.5	0.60	1.0	0.80	1.0	1.00	0.8	1.50	0.6		
70°C	0.2	4.5	0.30	3.0	0.40	1.5	0.50	1.0	0.60	1.0	0.80	1.0	1.00	0.6	1.50	0.3		
75°C	0.2	4.5	0.30	3.0	0.40	1.8	0.50	1.8	0.60	1.3	0.80	1.0	1.00	0.6	1.50	0.3	2.00	0.0
90°C	0.2	4.5	0.30	3.0	0.40	1.8	0.50	1.8	0.60	1.0	0.80	0.6	1.00	0.0	1.50	-0.3	2.00	-1.0
Humiria	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ		
27°C	0.2	3.0	0.30	1.8	0.40	1.5	0.50	1.0	0.60	1.0	0.80	1.0	1.00	1.0				
50°C	0.2	3.0	0.30	1.8	0.40	1.5	0.50	0.0	0.60	-0.3	0.80	-0.6	1.00	-0.9				
55°C	0.2	3.0	0.30	1.5	0.40	-0.3	0.50	-0.6	0.60	-0.8	0.80	-1.0	1.00	-1.3	1.30	-1.5		
70°C	0.2	1.0	0.30	0.0	0.40	-0.3	0.50	-0.5	0.60	-0.6	0.80	-0.8	1.00	-1.0	1.30	-1.1		
75°C	0.2	0.8	0.30	-0.3	0.40	-0.4	0.50	-0.6	0.60	-0.9	0.80	-1.1	1.00	-1.3	1.30	-1.4		
90°C	0.2	0.8	0.30	-0.3	0.40	-0.5	0.50	-0.8	0.60	-1.3	0.80	-1.5	1.00	-1.2	1.30	-1.4	1.60	-1.8
Dicorynia	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ				
27°C	0.25	6.0	0.30	4.0	0.35	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	2.0						
50°C	0.25	6.0	0.30	4.0	0.35	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5						
72°C	0.25	6.0	0.30	4.0	0.35	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5	0.80	1.5				
90°C	0.25	6.0	0.30	4.0	0.35	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.0	0.80	1.0				
Hymenolobium	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ				
35°C	0.25	6.0	0.30	4.0	0.35	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5						
60°C	0.25	6.0	0.30	4.0	0.35	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5	0.80	1.0				
72°C	0.25	6.0	0.30	4.0	0.35	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5	0.80	1.0				
85°C	0.25	6.0	0.30	4.0	0.35	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.0	0.80	1.0	1.00	0.6		
Vouacapoua	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ				
27°C	0.15	5.0	0.20	4.5	0.25	4.0	0.30	3.5	0.40	2.5	0.50	2.5						
55°C	0.15	5.0	0.20	4.5	0.25	3.5	0.30	3.0	0.40	2.0	0.50	1.8	0.60	1.5				
60°C	0.15	5.0	0.20	4.0	0.25	3.0	0.30	2.5	0.40	1.5	0.50	1.4	0.60	1.3	0.80	1.2		
70°C	0.15	4.5	0.20	3.5	0.30	2.0	0.40	1.5	0.50	1.4	0.60	1.3	0.80	1.2				
75°C	0.15	5.0	0.20	4.5	0.30	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5	0.80	1.0				
90°C	0.15	4.5	0.20	4.5	0.30	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5	0.80	1.0	1.00	0.6		
Tabebuia	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ				
27°C	0.15	9.0	0.20	8.0	0.30	6.0	0.40	4.0	0.50	3.0	0.60	2.0						
50°C	0.15	9.0	0.20	8.0	0.25	7.0	0.30	5.0	0.40	3.0	0.50	2.5	0.60	2.0				
75°C	0.15	8.0	0.20	7.0	0.25	6.0	0.30	4.0	0.40	3.0	0.50	2.5	0.60	2.0				
90°C	0.15	8.0	0.20	6.0	0.25	4.0	0.30	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5				
Bocoa	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ	Pa.	δ				
27°C	0.10	9.0	0.15	8.0	0.20	6.0	0.25	4.5	0.30	4.0	0.40	3.0	0.50	3.0	0.60	3.0		
55°C	0.10	9.0	0.15	7.0	0.20	5.0	0.25	4.0	0.30	3.0	0.40	3.0	0.60	2.5				
75°C	0.10	8.0	0.15	7.0	0.20	5.0	0.25	3.0	0.30	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5		
90°C	0.10	7.0	0.15	5.0	0.20	4.0	0.25	3.5	0.30	3.0	0.40	2.5	0.50	2.0	0.60	1.5		

Le tableau V - -11 récapitule les plages d'épaisseur testées aux différentes températures, ainsi que les réglages des angles de dépouille correspondants. L'ensemble des résultats incluant les efforts de coupe X_c , Y_c , F_a , F_d et F_T , les coefficients de variation de F_a , l'épaisseur et l'infradensité des placages, sont présentés dans le document annexe.

V - 1.6. Essai d'enfoncement de la barre de pression

Figure V - -12 Essai d'enfoncement de la barre de pression (efforts exercés par l'outil sur le bois).



L'enfoncement de la barre de pression a été testé sur trois essences choisies en fonction de leur différence d'infradensité. Les essais consistent à mesurer les efforts exercés par la barre sur le bois pour différentes pénétrations Δe de celle-ci. De la même manière que sur la mesure de ϕ , afin de renouveler la surface à chaque tour sans perturber les mesures, le couteau est placé bien en amont de la barre (figure V - -13).

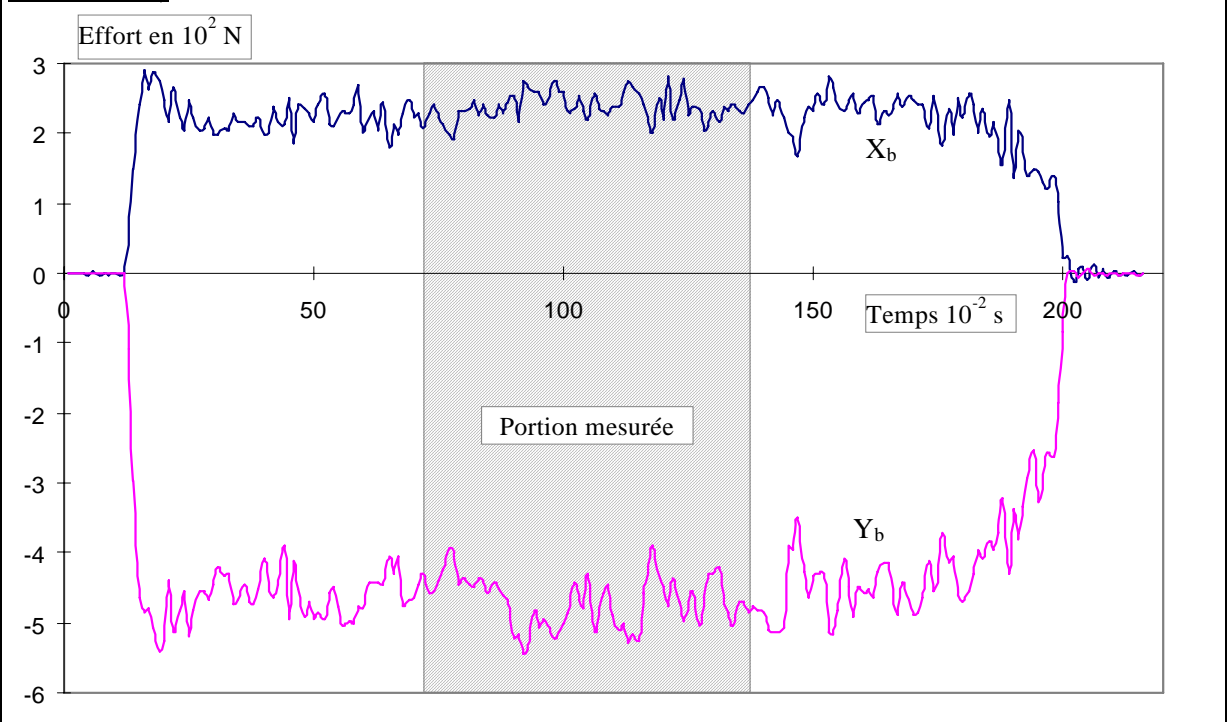
Les paramètres de coupe sont choisis de manière à ce que le déroulage se fasse dans les meilleures conditions (pas de fissuration et pas de sur ou de sous-épaisseur, qui perturberait la mesure sur la barre). Pour les trois essences, nous avons pris une passe de 0.3 mm et un angle de dépouille de 2°.

Là encore, nous avons fait systématiquement trois répétitions, par température et par pénétration de barre. Les résultats expérimentaux bruts sont résumés dans le document annexe.

Tableau V - -2 Pénétration de la barre (Δe en mm) pour les trois essences, aux différentes températures.

	Infradensité	Δe	Δe	Δe	Δe	Δe	Δe
<i>Virola</i> à 27, 53, 75 et 90°C	0.33	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40
<i>Ocotea</i> à 27, 50, 72 et 90°C	0.59	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
<i>Tabebuia</i> à 27, 50, 75 et 90°C	0.89	0.05	0.10	0.15	0.20		

Figure V - -14 Profils d'efforts exercés par le bois sur la barre (essence Ebène verte, $\Delta e = 0.2$ mm, vitesse 70 m/s, T = 75°C)



V - 2. Résultats des essais de déroulage sans barre de pression

V - 2.1. Mesure de l'angle de frottement

Tableau V - -3 Valeurs de ϕ pour les dix essences.

Essences	ϕ moyen (°)	Ecart-type
<i>Parkia</i>	23.3	1.4
<i>Virola</i>	23.3	1.4
<i>Vochysia</i>	21.3	1.9
<i>Ocotea</i>	14.4	2.0
<i>Humiria</i>	21.5	1.5
<i>Dicorynia</i>	21.8	1.5
<i>Hymenolobium</i>	23.4	1.0
<i>Vouacapoua</i>	20.5	2.0
<i>Tabebuia</i>	19.6	1.7
<i>Bocoa</i>	16.6	1.0

Les valeurs de ϕ mesurées varient dans une plage de 14.4° à 23.4° selon les essences, ce qui représente une variation assez forte (tableau V - -1). La moyenne de l'angle de frottement, toutes essences confondues, est de 20.6°. Elle est un peu plus élevée que la valeur trouvée par MOVASSAGHI & al (1986) sur le Châtaignier, puisque, pour une vitesse de déroulage équivalente de 70 mm/s, ils trouvaient un angle de 19.6°. Par ailleurs, les mêmes auteurs n'avaient pas trouvé d'influence de la température d'étuvage sur le coefficient de frottement pourvu que le bois reste humide en surface. Les quelques essais que nous avons faits à 80°C sur le *Humiria* et

Tabebuia n'ont pas donné non plus de valeurs de ϕ significativement différentes de celles obtenues à température ambiante, nous les avons donc intégrés au calcul de la moyenne.

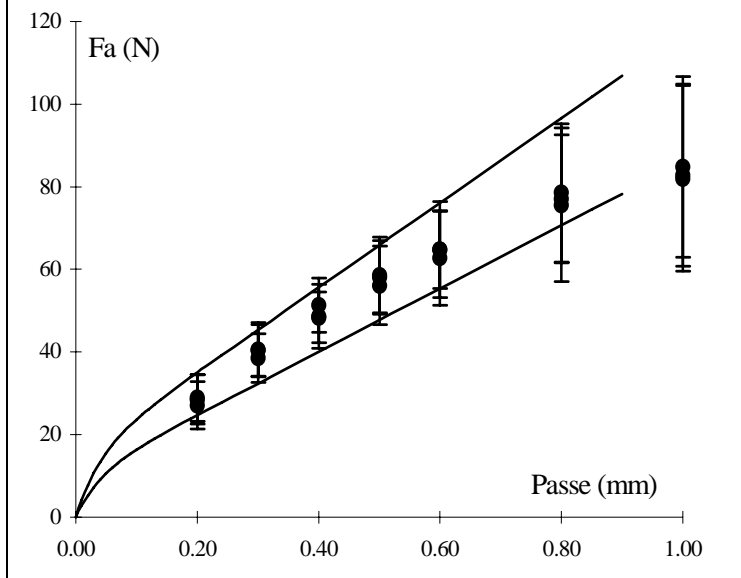
Remarquons la faible valeur de ϕ pour l'essence *Ocotea* : 14.4° ; cette essence contient une quantité importante de « cellules à huile » (DETIENNE & al, 1982). Cette huile est peut-être responsable du faible coefficient de frottement du Grignon.

V - 2.2. Variation de F_a en fonction de la passe et de la température

Remarque préliminaire : les valeurs des différents efforts de coupe cités (F_i , X_i , Y_i) correspondent à une largeur de copeau de 20 mm.

Dans nos essais F_a croît presque systématiquement quand la passe augmente et ceci quelle que soit la

Figure V - -12 Evolution de F_a en fonction de la passe, les barres d'erreurs représentent \pm l'écart-type (*Humiria*, 27°C) (3 essais par passe).



température. La figure V - -13 illustre assez bien la fissuration du copeau. A partir d'une certaine passe d'usinage (0.8 mm), celle-ci est très importante, F_a varie beaucoup et le coefficient de variation augmente fortement. Nous avons représenté sur cette figure, les courbes d'ajustement (sur la plage de passes où le copeau n'est pas fissuré) correspondant à la première équation du § I-2.1.4.2. La courbe supérieure s'ajuste sur les valeurs moyennes des efforts plus l'écart-type ; la courbe inférieure s'ajuste sur les valeurs moyennes des efforts moins l'écart-type.

Effet de la température sur F_a pour l'ensemble des plages d'épaisseurs

étudiées :

L'effet de la température sur l'effort d'attaque est plutôt faible, mais il est toujours visible : F_a décroît quand la température augmente. Pour une espèce considérée, l'influence de la température est, en générale, d'autant plus marquée que la passe d'usinage est grande.

Ces résultats confirment ceux obtenus par MARCHAL (1989) où l'influence de la température restait assez faible sur les valeurs des efforts F_a lors du déroulage de trois chênes méditerranéens.

Sur les figures **V - -1** (a,b et c), nous avons représenté l'évolution de F_a en fonction de la passe et de la température pour les dix essences étudiées. Pour chaque essence et pour les deux températures d'essai extrêmes, nous avons figuré les droites de régression calculées sur la plage d'épaisseur où le copeau est peu fissuré (cf. paragraphe V-2.4.).

L'influence de la température sur les pentes de ces droites de régression n'est importante que pour l'essence Parkia (où elle diminue de 66 % entre 27 et 90°C) et dans une moindre mesure pour l'essence Virola (où elle diminue de 37 % entre 27 et 90°C), en ce qui concerne les autres essences, la pente ne décroît pas de plus de 30% entre les essais à 27°C et ceux à 90°C.

Pour la suite de l'analyse, nous avons donc constitué un fichier de valeurs moyennes de F_a pour une épaisseur d'usinage, tel que le copeau soit relativement peu fissuré, quelle que soit l'essence. L'épaisseur retenue est de 0.4 mm. Pour donner plus de poids à ces données, nous les avons calculées en prenant la moyenne des valeurs de F_a à des épaisseurs de 0.3, 0.4 et 0.5 mm.

Le tableau **V - -2** récapitule les valeurs moyennes de F_a pour chaque essence et pour quatre températures d'essai de déroulage différentes. Nous y avons ajouté pour l'analyse ultérieure, les valeurs moyennes des différents descripteurs d'essai pour des températures d'essai équivalentes.

Figure V - -14 (a) Evolution de l'effort Fa en fonction de la passe et de la température.

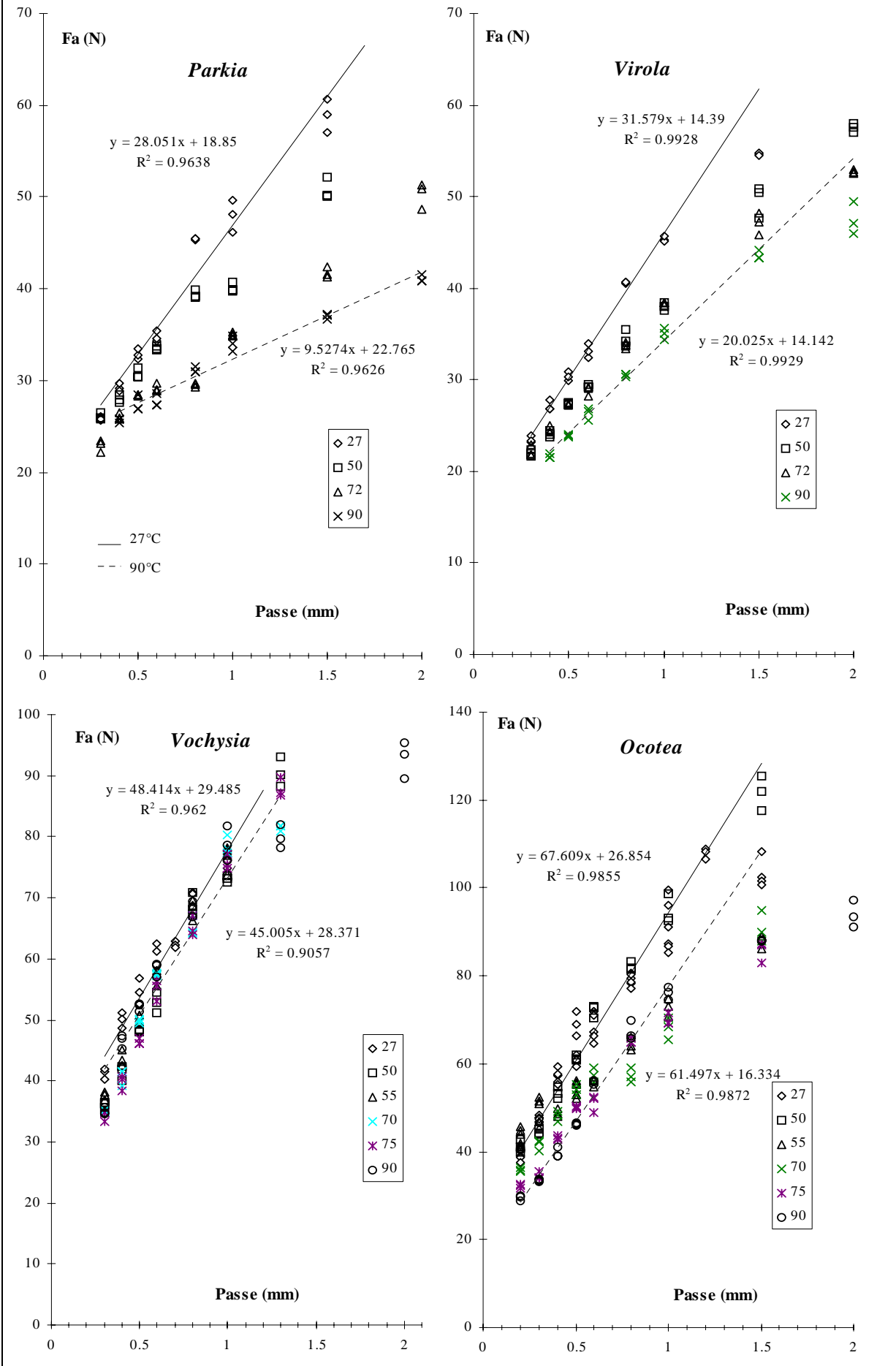


Figure V - -1 (b) Evolution de l'effort Fa en fonction de la passe et de la température (suite).

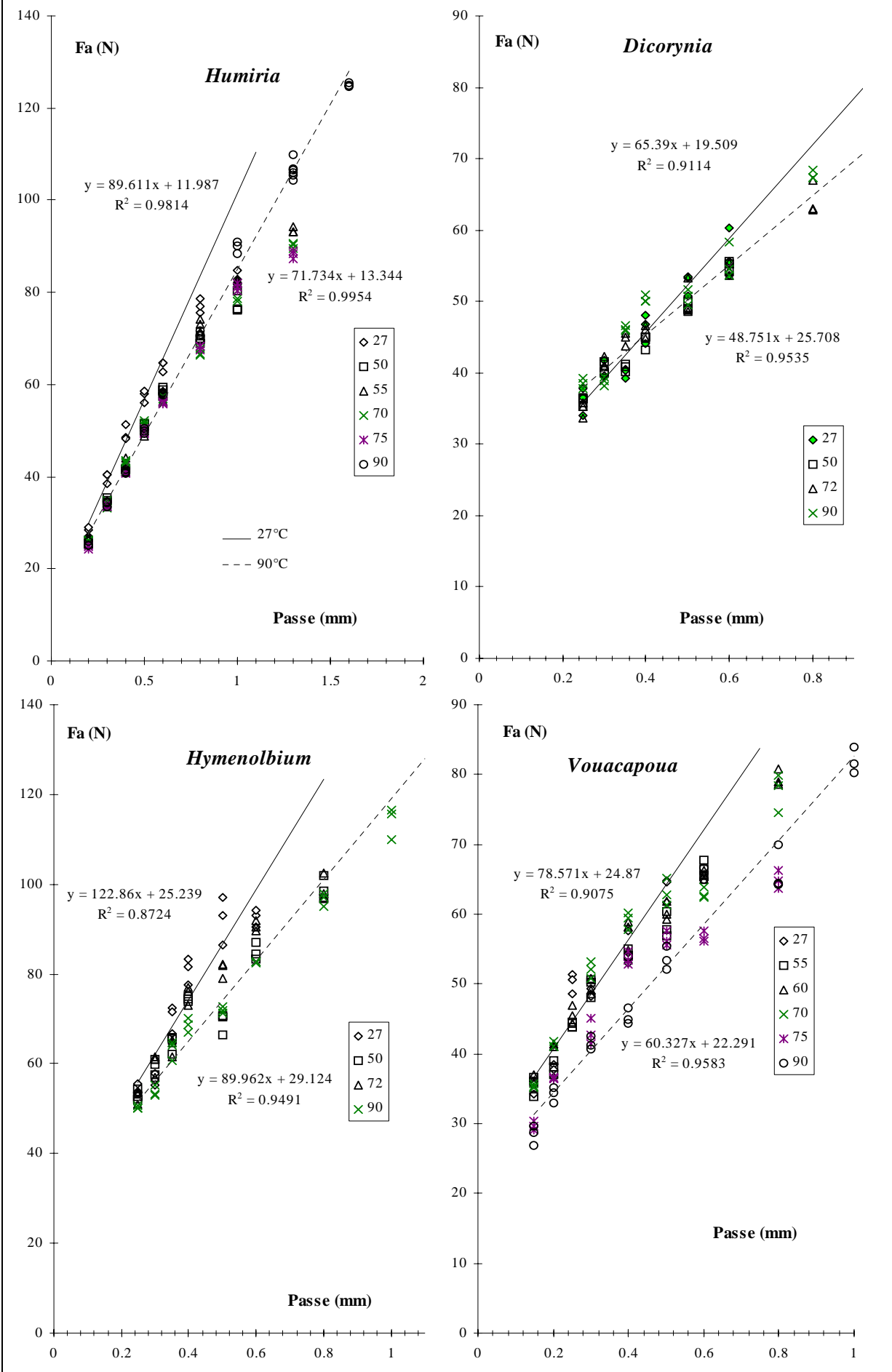


Figure V - -1 (c) Evolution de l'effort Fa en fonction de la passe et de la température (suite).

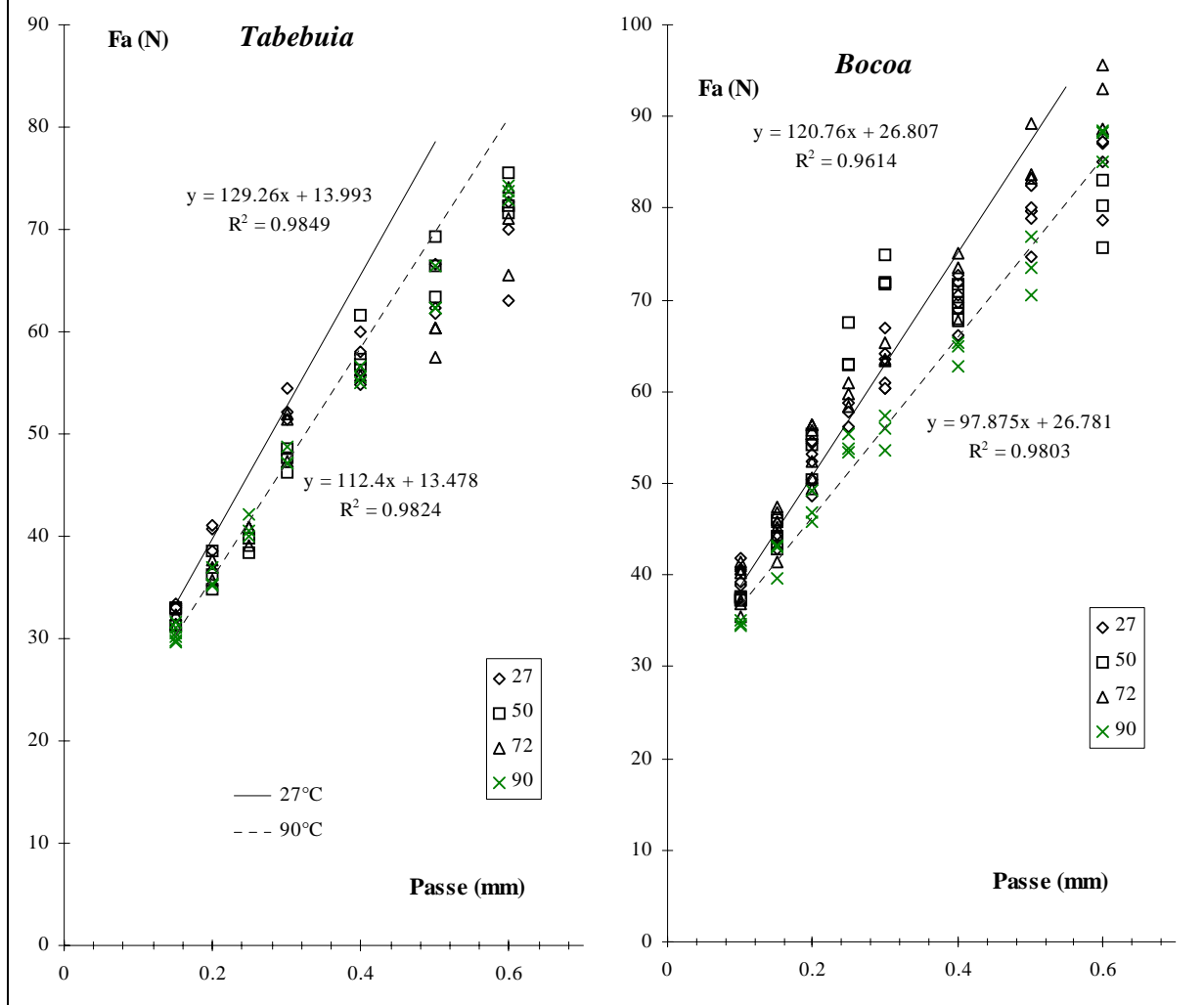


Tableau V - -2 Valeurs moyennes de Fa (pour une passe de 0.4 mm) et des descripteurs des essais mécaniques pour les dix essences et à quatre températures d'essai.

ID = infradensité moyenne des éprouvettes d'essais mécaniques (pour chacune des quatre températures) ;

ID1 = infradensité moyenne des copeaux déroulés pour des passes d'usinage de 0.3, 0.4, 0.5 mm.

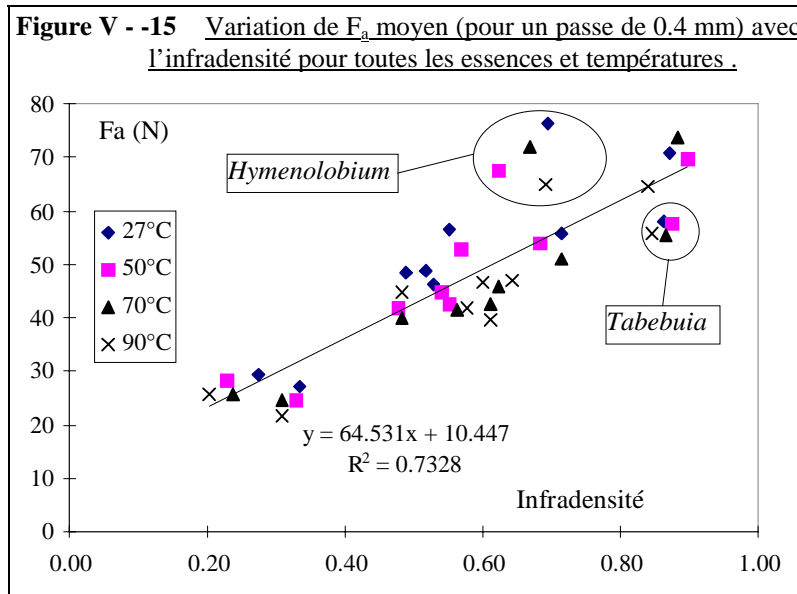
25-27°C	ID	W _{6%}	W _{13%}	W _{20%}	E _{re}	σ _v	W _{2.3°}	W _{4.6°}	W _{9.1°}	G _{re}	τ _r	G _{f,l}	P _{f,l}	S _{r,l}	ID ₁	F _a
<i>Parkia</i>	0.23	152	339	509	239	2.3	12.8	42	123	16.6	1.20	175	222	3.4	0.27	29.3
<i>Virola</i>	0.34	175	370	584	306	2.9	14.2	45	112	19.3	1.02	198	201	3.7	0.33	27.0
<i>Vochysia</i>	0.50	294	638	1030	584	4.7	30.5	101	270	38.9	2.39	343	451	6.7	0.49	48.6
<i>Ocotea</i>	0.58	407	840	1296	1034	7.4	33.3	108	315	39.1	2.99	273	528	7.5	0.55	56.5
<i>Humiria</i>	0.60	398	867	1381	747	6.4	31.3	104	323	41.5	2.92	390	515	8.6	0.52	49.0
<i>Dicorynia</i>	0.61	645	1367	2139	1116	11.1	40.0	145	436	48.1	4.06	286	563	8.4	0.53	46.4
<i>Hymenolobium</i>	0.66	760	1655	2648	1196	12.6	43.1	151	470	55.1	4.38	426	646	9.6	0.69	76.5
<i>Vouacapoua</i>	0.79	703	1465	2301	1349	13.7	45.2	162	480	58.4	4.65	364	637	8.8	0.72	55.8
<i>Tabebuia</i>	0.90	1155	2433	3882	1599	17.3	56.6	211	644	73.7	6.73	417	756	9.9	0.86	57.9
<i>Bocoa</i>	0.92	1070	2564	4062	1242	16.0	46.6	160	-	60.2	5.04	339	637	10.6	0.87	70.7
moyenne																51.8
50°C																
<i>Parkia</i>	0.22	117	245	391	204	1.7	11.5	35	98	14.6	1.02	196	191	3.2	0.23	28.3
<i>Virola</i>	0.35	140	295	460	253	2.3	11.7	36	92	15.8	0.75	234	150	3.1	0.33	24.5
<i>Vochysia</i>	0.50	205	440	709	422	3.4	21.4	67	186	28.7	1.64	405	331	5.5	0.48	41.9
<i>Ocotea</i>	0.59	305	618	961	739	5.6	24.1	76	231	32.2	2.31	344	397	6.4	0.57	53.0
<i>Humiria</i>	0.61	306	670	1081	587	4.9	26.9	84	244	34.8	2.21	421	340	6.4	0.55	42.6
<i>Dicorynia</i>	0.60	451	966	1527	728	7.7	34.8	125	358	40.8	3.22	281	495	8.0	0.54	44.7
<i>Hymenolobium</i>	0.66	536	1156	1851	898	8.9	32.2	106	354	45.7	3.44	489	432	8.1	0.62	67.7
<i>Vouacapoua</i>	0.79	522	1085	1740	871	10.1	35.6	127	394	48.3	3.59	354	462	7.4	0.68	54.1
<i>Tabebuia</i>	0.90	942	1971	3133	1153	13.9	43.4	162	560	58.4	5.53	323	535	7.4	0.87	57.5
<i>Bocoa</i>	0.92	809	2072	3361	916	12.0	40.7	143	-	53.5	4.34	358	446	8.6	0.90	69.8
moyenne																48.4

Tableau V - -3 (suite)

65-70°C	ID	W _{6%}	W _{13%}	W _{20%}	E _{re}	σ _v	W _{2,3°}	W _{4,6°}	W _{9,1°}	G _{re}	τ _r	G _{f,I}	P _{f,I}	σ _{r,I}	ID _I	F _a
<i>Parkia</i>	0.23	92	199	318	165	1.4	8.8	26	74	11.1	0.80	169	118	2.01	0.24	25.8
<i>Virola</i>	0.35	101	217	342	123	1.7	8.5	26	69	11.5	0.59	253	162	3.26	0.31	24.6
<i>Vochysia</i>	0.51	139	317	532	191	2.3	13.9	43	121	18.4	1.21	374	223	4.00	0.48	40.1
<i>Ocotea</i>	0.61	229	463	722	417	4.0	17.6	56	167	23.9	1.54	360	242	4.46	0.61	42.5
<i>Humiria</i>	0.60	206	470	780	326	3.2	17.4	55	163	24.2	1.57	370	230	4.75	0.56	41.5
<i>Dicorynia</i>	0.60	336	729	1180	604	5.4	26.0	85	245	32.5	2.23	333	338	6.26	0.62	45.8
<i>Hymenolobium</i>	0.65	360	799	1313	544	5.9	24.5	78	242	33.2	2.31	584	308	6.67	0.67	72.1
<i>Vouacapoua</i>	0.79	391	826	1333	508	7.5	25.5	82	253	36.0	2.60	438	350	6.77	0.71	51.0
<i>Tabebuia</i>	0.90	490	1365	2301	545	6.9	29.5	102	333	40.5	3.45	447	350	5.66	0.87	55.2
<i>Bocoa</i>	0.91	492	1405	2506	501	6.4	27.1	95	311	37.0	2.70	310	325	6.79	0.88	73.8
80-90°C														moyenne		47.3
<i>Parkia</i>	0.25	63	138	221	103	1.0	4.6	15.2	46	5.7	0.6	174	95	1.67	0.20	25.7
<i>Virola</i>	0.34	63	140	226	80	1.0	4.9	15.8	46	6.6	0.4	202	118	2.38	0.31	21.6
<i>Vochysia</i>	0.50	89	201	337	111	1.5	8.8	28.6	86	11.0	0.9	310	172	3.12	0.48	44.6
<i>Ocotea</i>	0.60	154	322	511	193	2.8	10.0	33.1	108	14.8	1.2	236	190	3.51	0.61	39.8
<i>Humiria</i>	0.59	147	349	587	173	2.2	10.5	34.1	104	13.2	1.0	269	122	2.95	0.58	41.7
<i>Dicorynia</i>	0.62	220	512	841	284	3.5	14.7	47.6	142	19.9	1.5	338	182	3.96	0.60	46.6
<i>Hymenolobium</i>	0.65	207	476	818	252	3.4	12.7	43.9	138	16.6	1.5	496	149	4.27	0.69	64.8
<i>Vouacapoua</i>	0.78	241	513	838	252	4.6	15.6	51.8	159	20.4	1.7	391	167	4.09	0.64	46.8
<i>Tabebuia</i>	0.89	267	731	1296	284	3.1	15.1	53.4	175	21.2	2.1	322	151	3.22	0.85	55.7
<i>Bocoa</i>	0.92	320	973	1856	263	4.1	14.1	47.8	167	18.0	1.8	289	171	4.72	0.84	64.6
														moyenne		45.2

V - 2.3. Variation de Fa en fonction de l'infradensité et de la température

V - 2.3.1. Variation de Fa en fonction de l'infradensité



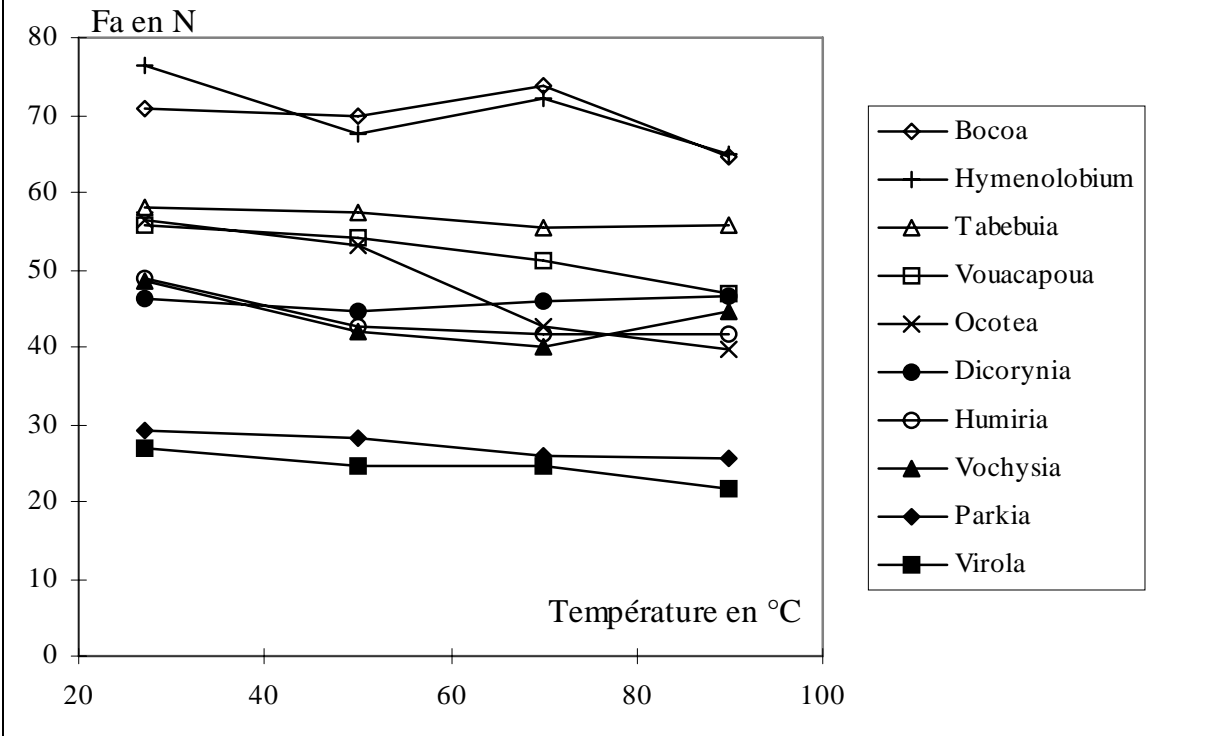
L'effort d'attaque moyen (pour une passe de 0.4 mm) est bien lié à l'infradensité $R^2 = 0.73$, F_a croît linéairement quand celle-ci augmente. Pour une même passe d'usinage, si l'infradensité est multipliée par deux, la valeur de l'effort F_a augmente de 75%.

V - 2.3.2. Variati

on de Fa en fonction de la température

A partir des valeurs moyennes de F_a pour une passe de 0.4 mm (tableau V - -4), c'est-à-dire lorsque le copeau est relativement peu fissuré quelle que soit l'essence, l'effort d'attaque est, là encore, assez peu influencé par la température (figure V - -5). Il ne décroît en moyenne (toutes essences confondues) que de 11% entre 27 et 90°C. Toutefois, dans les mêmes conditions, l'effet est un peu plus marqué pour deux essences *Virola* (20%) et *Ocotea* (30%).

Figure V - -16 Evolution de F_a moyen pour une passe d'usinage de 0.4 mm, en fonction de la température pour les dix essences étudiées

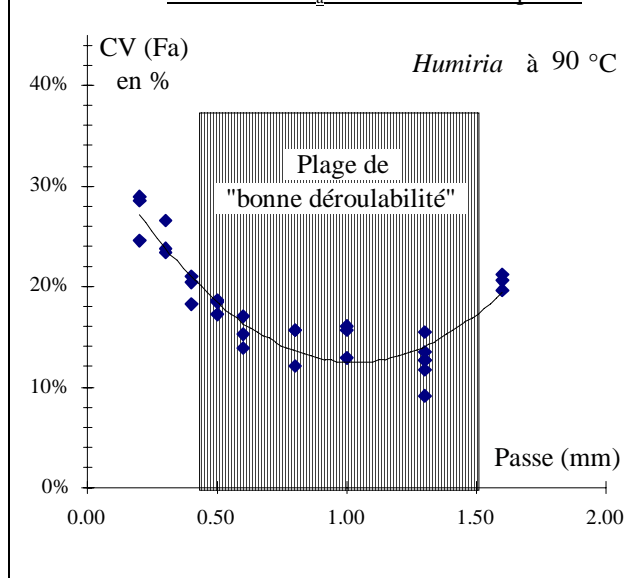


Remarque sur le classement des essences :

Si l'on compare les valeurs de F_a des différentes essences entre elles, on observe que l'essence *Hymenolobium* a des valeurs d'efforts d'attaque relativement fortes par rapport à son infradensité, ce qui n'est pas sans rappeler les résultats obtenus pour les essais mécaniques. Par contre, sur les mêmes bases de comparaison, l'essence *Tabebuia* engendre un effort d'attaque plutôt faible, il est probable que pour ces épaisseurs de passe, le copeau de cette essence est déjà fortement fissuré, ce qui diminuerait l'effort F_a moyen (d'autant que le coefficient de variation de F_a est assez élevé pour cette essence (annexe III)).

V - 2.4. Analyse des coefficients de variation de F_a

Figure V - -17 Exemple d'évolution du coefficient de variation de F_a en fonction de la passe.



Le coefficient de variation CV (§ V-2.2.) est un assez bon indicateur de la qualité du placage (THIBAUT, 1988). Lorsque l'écoulement du copeau est continu, celui-ci est peu fissuré et son CV est assez faible (les valeurs de CV sont alors inférieures à 15% dans nos essais). Par contre, lorsque qu'il y a une fissuration importante ou un effet Horner marqué, les efforts de coupe varient fortement (figure V - -18) et le coefficient de variation est élevé (CV > 20 % dans nos essais).

L'évolution de CV en fonction de la passe, aux différentes températures d'essai et pour les dix essences est donné en ANNEXE III.

coefficient de variation de F_a

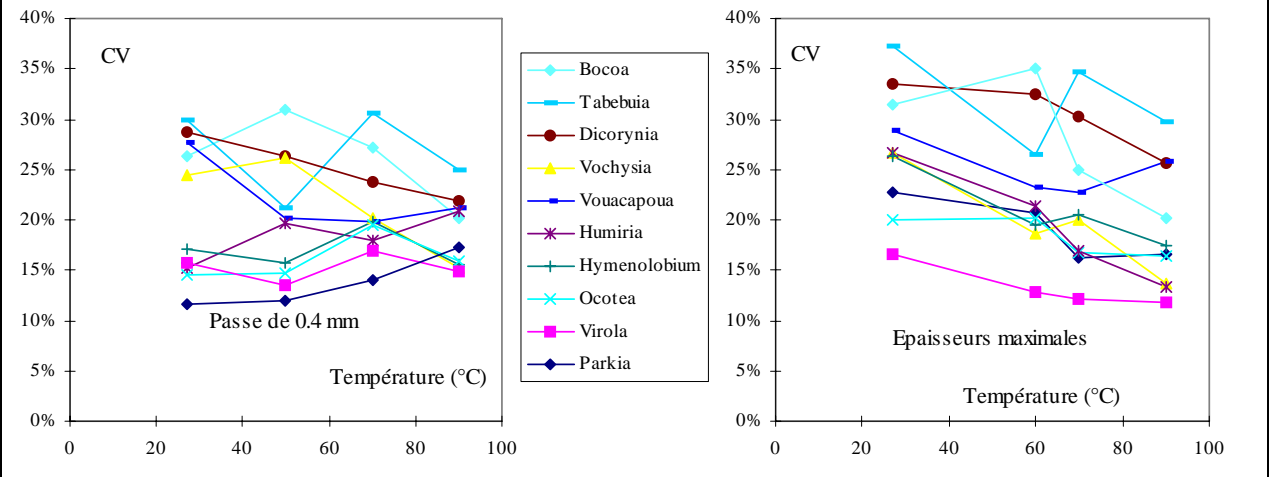
Effet positif de la température : Elle diminue les coefficients de variation pour les fortes épaisseurs d'usinage, la plage d'épaisseur où le copeau est peu fissuré s'élargit (figure V - -19). Cet effet est plus ou moins prononcé suivant les essences.

V - 2.4.1. Effet de la température sur le

Effet négatif de la température : Inversement pour les essences à bois tendre, la température peut favoriser le flambement du copeau (effet Horner) pour les faibles épaisseurs de copeau (figure V - -21). C'est pour cette raison que nous n'avons pas pu dérouler les essences *Parkia* et *Virola* en 3/10 de mm à températures élevées.

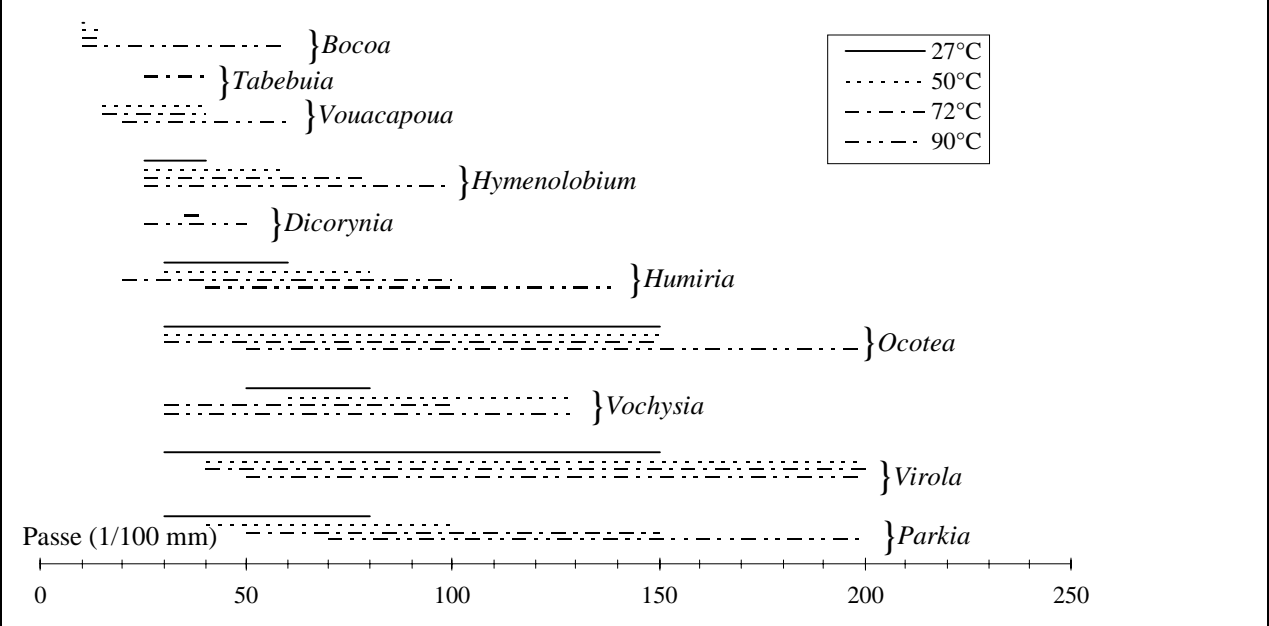
Pour une forte épaisseur de copeau usiné, où le placage est fortement fissuré, la température diminue presque systématiquement le coefficient de variation (figure V - -23 à droite).

Figure V - -20 Evolution du coefficient de variation de Fa en fonction de la température, pour une épaisseur de copeau de 0.4 mm à gauche et les épaisseurs de copeau maximales à droite.



Alors que pour une épaisseur moyenne de copeau de 0.4 mm, l'effet de la température sur CV est moins

Figure V - -22 Plages de passes d'usinage (aux différentes températures d'essais), pour lesquelles le coefficient de variation de Fa est relativement petit (par exemple, CV < 15 % pour *Parkia* et CV < 25% pour *Bocoa*).



net. Pour certaines essences comme *Parkia*, elle favorise l'effet Horner pour d'autre, comme *Dicorynia*, elle semble réduire la fissuration du copeau et diminuer la valeur du CV.

V - 2.4.2. Proposition de classement d'aptitude au déroulage

Plage de « bonne déroulabilité » et commentaires à partir de l'analyse des CV	Remarques sur l'usinage au cours de l'essai
Parkia	
A 27°C : commence à fissurer à 0.8 mm, bon usinage (CV<15%) pour la plage de 0.3 à 0.8 mm. A 90°C : flambement du copeau (CV>18%) jusqu'à 0.6 mm, bon usinage pour les épaisseurs de 0.8 à 1.5 mm.	Se déroule sans problème, à partir de 0.3 mm à température ambiante, mais le placage devient très pelucheux à cette épaisseur lorsque la température augmente (passe minimum de 0.4 mm à partir de 70°C). Copeau de bonne qualité, peu fissuré.
Virola	
A 27°C : fissure un peu à partir de 1.5 mm d'épaisseur, très bon usinage dans l'ensemble (CV<15%) sur la plage d'épaisseur étudiée. Flambement du copeau à partir de 70 °C pour les épaisseurs de 0.3 et 0.4 mm, bon usinage 0.5 à 2 mm. Se déroule mieux que le Parkia.	Se déroule très bien, à partir de 0.3 mm jusqu'à 1.5 mm à température ambiante, mais le placage devient pelucheux pour les faibles épaisseurs lorsque la température augmente (passe minimum de 0.4 mm à partir de 90°C). Copeau de bonne qualité, peu fissuré
Vochysia	
CV assez hétérogène dans l'ensemble. A 27°C : mauvais usinage pour les faibles épaisseurs (0.3-0.4 mm) et à partir de 1 mm. La plage de bon usinage s'élargit à 75°C pour des épaisseurs de copeau de 0.3 à 1.4 mm.	Se déroule assez bien sur la plage d'épaisseur étudiée. Copeau d'assez bonne qualité, peu fissuré mais plutôt rugueux (présence de bandes tangentielles de parenchyme).
Ocotea	
A 27°C : bon usinage pour des épaisseurs de 0.2 à 1 mm. A 90°C bon usinage jusqu'à 2 mm d'épaisseur mais un peu moins bon pour les faibles épaisseurs (0.2-0.3 mm).	Se déroule bien sur la plage d'épaisseur étudiée. Copeau de bonne qualité, peu fissuré.
Humiria	
A 27°C : fissure à partir de 0.8 mm. A 90°C : bon usinage jusqu'à 1.4 mm d'épaisseur du copeau. Par contre, le coefficient de variation augmente pour les faibles épaisseurs (0.2-0.3 mm).	Se déroule bien sur la plage d'épaisseur étudiée. Copeau de bonne qualité, assez peu fissuré.
Dicorynia	
A 27°C : mauvaise usinage, copeau très fissuré sur toute la plage d'épaisseur. A 90°C : la qualité du copeau s'améliore un peu sur la plage d'épaisseur de 0.2 à 0.4 mm.	Se déroule mal quelle que soit l'épaisseur, Le copeau est très fissuré et s'enroule fortement sur lui-même dès qu'il est usiné. De plus, il est très fragile et difficile à redresser.
Hymenolobium	
A 27°C : assez bon usinage, fissure à partir de 0.6mm d'épaisseur. A partir de 60°C la plage de bon usinage est de 0.25 à 0.8 mm, et à 90°C elle couvre 0.25 à 1mm.	Se déroule moyennement bien. Le copeau s'enroule sur lui-même et est assez rugueux. (présence de bandes tangentielles de parenchyme).
Vouacapoua	
A 27°C : fissure fortement quelle que soit l'épaisseur. A 75 et 90°C moins fissuré sur une plage d'épaisseur de 0.2 à 0.6 mm.	Se déroule assez difficilement. Le copeau s'enroule nettement sur lui même et il est assez fragile
Tabebuia	
CV toujours très grand, le copeau est toujours très fissuré quelles que soient la passe et la température. La plage pour laquelle le copeau est le moins fissuré semble être 0.3- 0.4 mm à 75°C.	Se déroule mal quelle que soit l'épaisseur, Le copeau est très fissuré et s'enroule fortement sur lui-même dès qu'il est usiné. Il est toutefois bien moins fragile que le copeau de l'essence <i>Dicorynia</i> .
Bocoa	
A 27°C : fissure très tôt (0.15 mm). A 90°C la fissuration est moyenne sur toute la plage d'épaisseur de 0.1 à 0.6 mm.	Se déroule relativement bien par rapport à sa densité. Bien que le copeau s'enroule sur lui-même, il se redresse bien même lors d'un déroulage à froid.

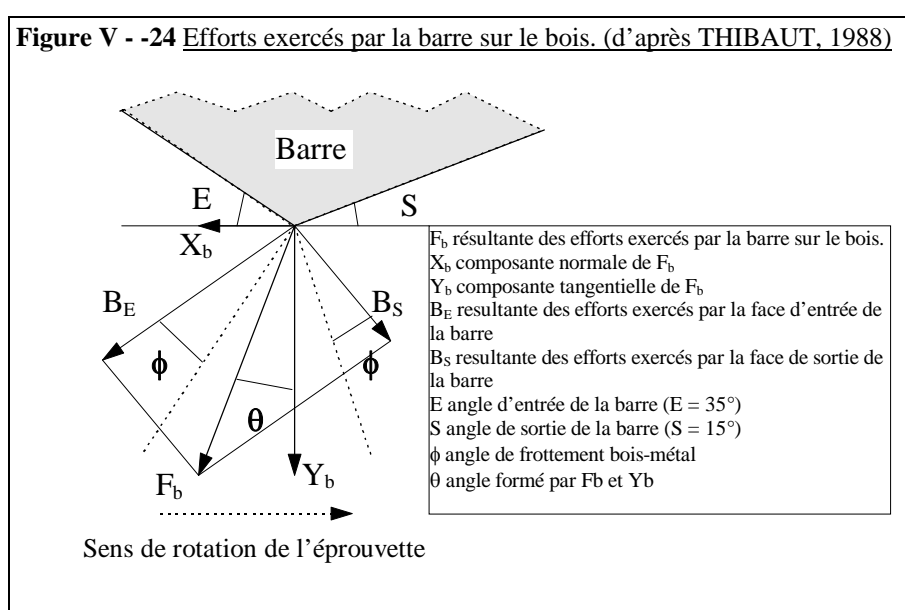
V - 2.4.3. Conclusion

- Pour une même infradensité, l'aptitude au déroulage du bois d'une essence donnée peut être contrasté :
- les essences *Ocotea*, *Humiria* et *Dicorynia* ont une infradensité très voisine d'environ 0.6. Alors que *Ocotea* et *Humiria* se déroulent « facilement » et donnent des copeaux de bonne qualité, l'essence *Dicorynia* est difficile à dérouler et donne (dans nos essais sur 1 seul arbre) un copeau fragile et très fissuré.
 - de même, pour les essences *Bocoa* et *Tabebuia* (infradensité voisine de 0.9), l'essence *Bocoa* se déroule relativement bien alors que l'essence *Tabebuia* se déroule très difficilement.

Dans nos essais, l'effet de la température est assez net : l'élévation de la température d'étuvage augmente l'épaisseur d'usinage où le copeau est relativement peu fissuré, et il favorise le flambement du copeau pour les essences de faible infradensité (ou d'infradensité moyenne comme *Ocotea* ou *Humiria*).

V - 3. Efforts exercés par la barre de pression

V - 3.1. Relation entre les composantes X_b et Y_b



La figure V - -25 présente les relations entre les composantes de l'effort exercé par la barre de pression sur le bois (X_b) et (Y_b). Pour les trois essences testées, les liaisons entre ces deux composantes sont toujours très bonnes, la composante tangentielle X_b est proportionnelle à la composante normale Y_b (dans nos essais, $Y_b = 2X_b$). On retrouve le résultat de THIBAUT (1988). θ est l'angle entre F_b et la direction normale à la coupe, il dépend de l'angle de frottement et de

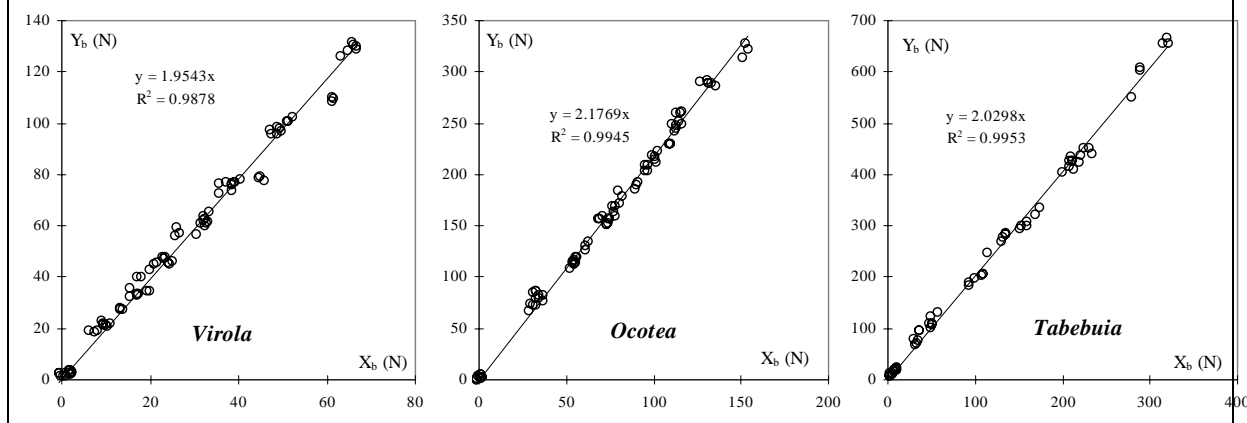
la géométrie de la barre (figure V - -26). La géométrie de la barre et la vitesse de déroulage étant fixée, θ ne dépend que de ϕ . Il est possible de calculer θ à partir des composantes normales et tangentielles de F_b

$$\theta = \text{ATan} \left(\frac{X_b}{Y_b} \right).$$

	<i>Virola</i>	<i>Ocotea</i>	<i>Tabebuia</i>
ϕ mesuré (en °)	23.3	14.4	19.6
θ mesuré (en°)	27.1	24.6	26.2

Les angles θ et ϕ évoluent dans le même sens mais l'amplitude de θ est moins marquée.

Figure V - -27 Relations entre les composantes normales Y_b et tangentielles X_b de l'effort F_b mesuré.



V - 3.2. Relation entre l'effort résultant F_b et la pénétration de la barre Δ_e

Pour les trois essences, la relation entre F_b et Δ_e est très bonne (Figure V - -28). En posant $F_b = P\Delta_e$, on obtient pour chaque essence et pour chaque température d'essai, les valeurs de P suivantes :

Température	Virola	Ocotea	Tabebuia
27°C	445	1076	4141
50°C	362	909	3177
72°C	286	758	2456
90°C	309	793	2350

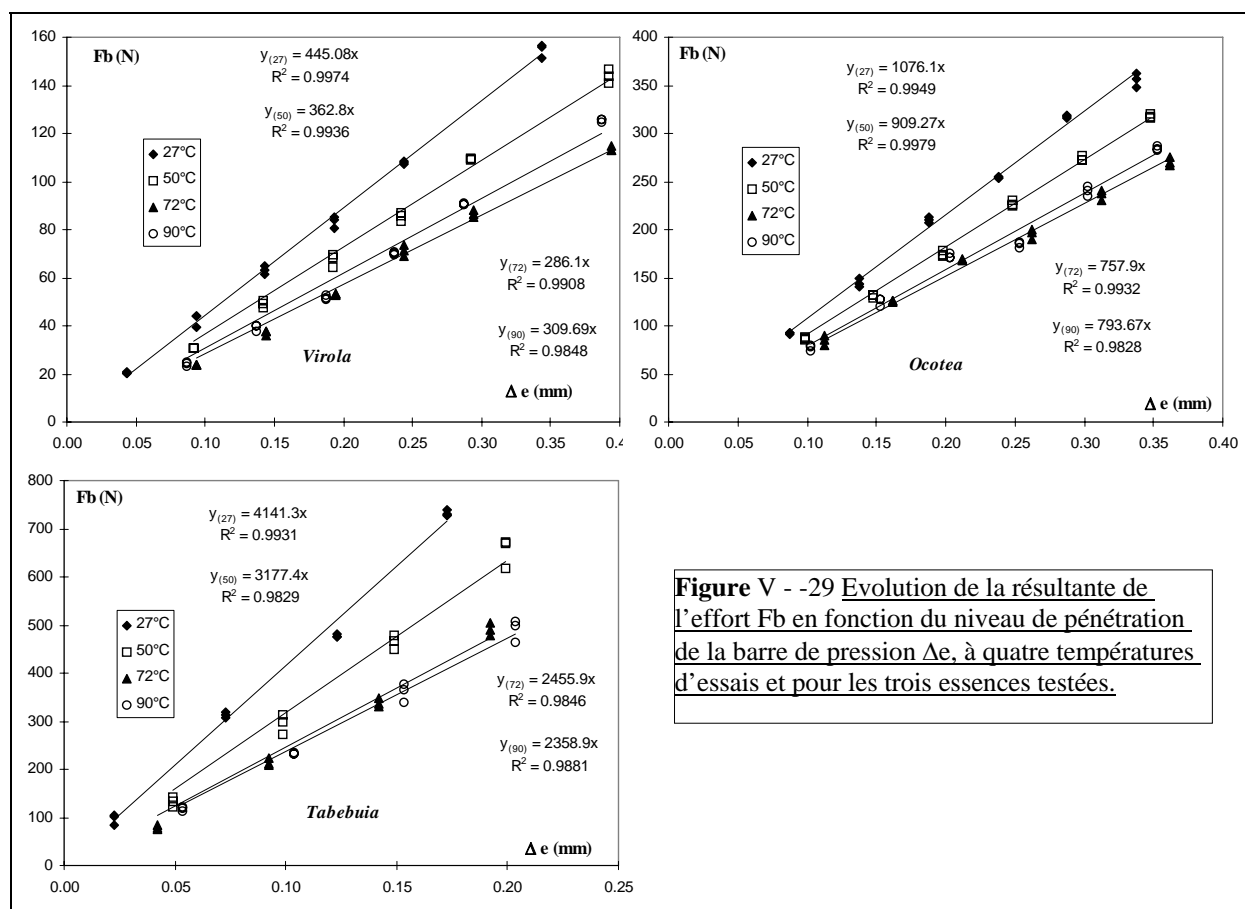


Figure V - -29 Evolution de la résultante de l'effort F_b en fonction du niveau de pénétration de la barre de pression Δ_e , à quatre températures d'essais et pour les trois essences testées.

Le coefficient de proportionnalité entre F_b et Δ_e décroît lorsque la température augmente à l'exception des valeurs observées pour la température de 90°C. Cette observation est à rapprocher de la remarque évoquée précédemment, concernant le dessèchement rapide de la surface usinée au cours de l'essai à 90°C. Le séchage de la couche superficielle soumise à l'action de la barre (quelques dixièmes de millimètres) explique sans doute cet effet perturbateur, qu'il faudra étudier plus avant. Dans l'analyse qui suit nous n'avons pas utilisé les résultats obtenus à 90°C.

V - 4. Comparaison déroulage essais mécaniques

V - 4.1. Relations entre les valeurs de F_a et de F_b et les descripteurs mécaniques

V - 4.1.1. Effort résultant exercé par la face d'attaque du couteau F_a

Lorsque l'on essaie d'expliquer F_a moyen pour une passe de 0.4 mm (tableau V - -6), à partir d'une analyse statistique (régressions linéaires multiples) et en prenant comme variables explicatives l'ensemble des descripteurs des essais mécaniques (tableau Tableau V - -7) ; L'énergie de rupture $G_{f,I}$ associée à l'énergie de compression à 20 % de déformation $W_{20\%}$, expliquent déjà 76 % de la variabilité de F_a (figure V - -30). Un modèle simple peut alors s'écrire sous la forme :

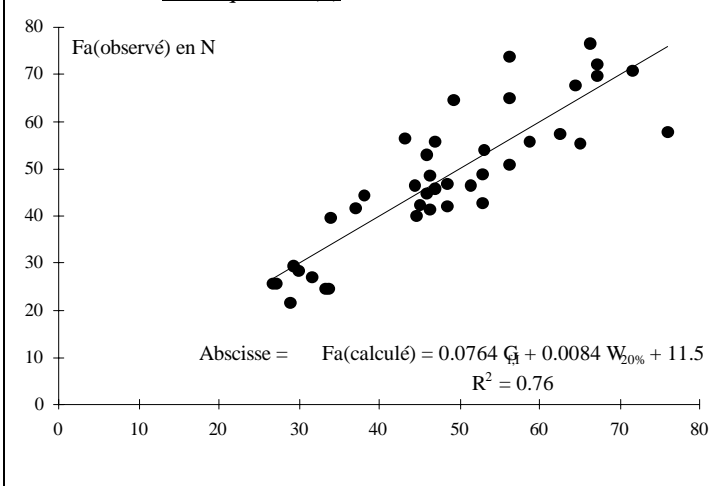
$$(1) F_a = 0.0084W_{20\%} + 0.0764G_{f,I} + 11.52$$

(F_a en N, $W_{20\%}$ en kJ/m^3 et $G_{f,I}$ en J/m^2)

Tableau V - -8 Relation entre les descripteurs mécaniques et F_a moyen (pour une passe de 0.4 mm). Seuil de signification pour mille $r = 0.50$. (cf. tableau V - -9).

	$W_{6\%}$	$W_{13\%}$	$W_{20\%}$	E_{re}	σ_v	$W_{2,3^\circ}$	$W_{4,6^\circ}$	$W_{9,1^\circ}$	G_{re}	τ_r	$G_{f,I}$	$P_{f,I}$	$S_{f,I}$
Coefficient de corrélation (r) entre F_a et les autres variables	0.68	0.73	0.75	0.61	0.66	0.65	0.64	0.63	0.67	0.68	0.70	0.58	0.72

Figure V - -31 Relation entre F_a observé et F_a calculé à partir de l'équation (1)



Remarque :

Dans l'analyse statistique que nous avons faite, les critères énergétiques sont toujours meilleurs (plus significatifs) pour expliquer la variabilité de F_a . Ceci subodore qu'une approche énergétique serait peut-être préférable à l'approche basée sur les contraintes limites transverses du bois vert, pour expliquer les efforts de coupe.

V - 4.1.2. Effort résultant exercé par la barre de pression F_b

L'analyse des liaisons entre les descripteurs de l'essai de compression et le coefficient de proportionnalité P , de la relation $F_b = P\Delta_c$ (tableau Figure V - -32), montre que l'énergie de compression à 20 % de déformation $W_{20\%}$ explique à 99.5 % la variabilité de P (résultats obtenus en éliminant les valeurs de P à 90°C, soit sur 9 points de mesure seulement (tableau V - -33).

Tableau V - -10 Relation entre les descripteurs mécaniques de l'essai de compression et la variable P (Seuil de signification pour mille $r = 0.872$).

	$W_{6\%}$	$W_{13\%}$	$W_{20\%}$	E_{re}	σ_v
Coefficient de corrélation	0.976	0.996	0.998	0.850	0.959

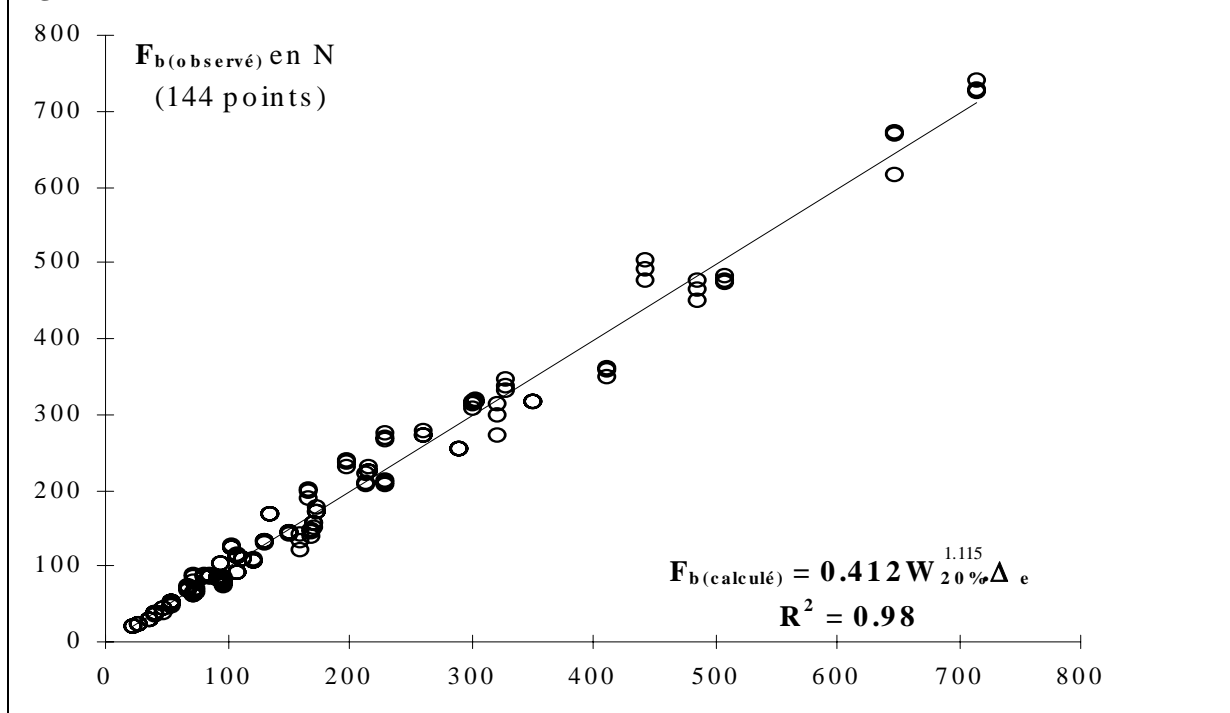
Tableau V - -11 Valeur de P et de $W_{20\%}$ pour les trois essences à trois températures d'essai

	P (N/mm)	$W_{20\%}$ (kJ/m ³)
<i>Virola</i> à 27°C	445	584
<i>Virola</i> à 50°C	363	460
<i>Virola</i> à 72°C	286	342
<i>Ocotea</i> à 27°C	1076	1296
<i>Ocotea</i> à 50°C	909	961
<i>Ocotea</i> à 72°C	760	722
<i>Tabebuia</i> à 27°C	4141	3882
<i>Tabebuia</i> à 50°C	3177	3133
<i>Tabebuia</i> à 72°C	2456	2301

Plus précisément, P croît comme une fonction puissance de $W_{20\%}$ (de puissance 1.115). Comme $F_b = P\Delta_e$, on a :

$$F_b = 0.412 W_{20\%}^{1.115} \cdot \Delta_e$$

(F_b en N, $W_{20\%}$ en kJ/m³ et Δ_e en mm)

Figure V - -34 Relation entre F_b calculé et F_b observé

L'énergie de compression à 20% de déformation est donc un très bon prédicteur de l'effort résultant exercé par la barre de pression (figure Figure V - -35).

V - 4.1.3. Commentaires

Dans les deux cas, les descripteurs « énergétiques » semblent plus pertinents.

- Dans le cas de F_b , on trouve assez naturellement une liaison très forte entre l'effort et comportement en compression transverse du bois.
- Par contre dans le cas de F_a , l'énergie de rupture que l'on peut considérer comme une énergie nécessaire à la création d'une nouvelle surface, lors de la séparation du copeau, est un des descripteurs qui apparaît relativement tôt, alors que le modèle de THIBAUT privilégiait plutôt le phénomène de cisaillement RT.

V - 4.2. Déroulabilité et ratios

V - 4.2.1. Signification des ratios des figures VI-36 à VI-39

Dans le chapitre IV, nous avons présenté l'évolution des ratios de certains descripteurs mécaniques en fonction de la température. Quelles sont les significations de ces ratios dans la formation du copeau déroulé ?

⇒ Le rapport entre la contrainte au premier coude de la courbe de compression transverse et la contrainte à la

rupture en cisaillement RT : $\frac{\sigma_y}{\tau_r}$, est un indicateur du risque de **flambement du copeau** (ou effet Horner).

Plus la valeur de ce ratio est petite, plus la résistance au flambement des cellules (situées dans une portion du

copeau sollicité au-dessus du couteau, voisine du plan de cisaillement, défini au § I-2.1.4.) est faible par rapport à la résistance au cisaillement (au niveau de ce plan de cisaillement), et plus le risque de flambement du copeau est élevé.

⇒ Le rapport entre la contrainte limite de rupture en ténacité et la contrainte à la rupture en cisaillement RT :

$$\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r},$$

est un indicateur du risque de **fissuration du copeau**. Plus la valeur de ce ratio est grande, plus la résistance à la rupture est élevée par rapport à la résistance au cisaillement, et plus le risque de fissuration du copeau est faible.

⇒ Le rapport entre l'énergie de rupture et l'énergie de cisaillement RT pour une déformation angulaire de 4.6° :

$$\frac{G_{f,I}}{W_{4.6^\circ}},$$

est aussi un indicateur du risque de **fissuration du copeau**, mais il indique aussi l'influence de la température sur la fissuration. Plus la valeur de ce ratio est grande, plus l'énergie nécessaire à la création d'une nouvelle surface est élevée par rapport à l'énergie nécessaire au cisaillement du copeau (à la formation du copeau), plus le risque de fissuration est limité. $G_{f,I}$ est, nous l'avons vu, peu sensible à la température, alors que $W_{4.6^\circ}$ diminue d'un facteur 2 à 3 lorsque la température augmente de 25 à 80°C. L'énergie de cisaillement nécessaire à la création du copeau diminue quand la température augmente, contrairement à l'énergie de rupture qui reste presque inchangée quelle que soit la température, le ratio de ces deux énergies augmente donc lorsque la température augmente et la risque de fissuration diminue.

⇒ Le rapport entre la contrainte au premier coude de la courbe de compression et la contrainte limite de rupture

en ténacité : $\frac{\sigma_y}{\sigma_{r,I}}$, est un indicateur de **l'influence de la barre de pression** sur le risque de fissuration du

copeau. Plus la valeur de ce ratio est grande, plus la résistance au flambement des cellules (dans une zone de bois proche du nez de la barre) est élevée par rapport à la résistance à la rupture, plus le niveau de contrainte en compression généré par la barre sur la zone d'initiation de la fissure (zone où l'intensité des contraintes est maximale, située juste devant l'arête du couteau) sera efficace et moins le risque de fissuration sera élevé. Nous n'avons pas pu tester la pertinence de cet indicateur car nous n'avons pas réalisé d'essais de déroulage avec barre de pression.

V - 4.2.2. *Pertinence des ratios et plage de bonne « déroulabilité »*

La comparaison des ratios entre essences et l'influence de la température sur ces ratios, nous permettent de définir des plages de bons déroulages. Ces plages de bons déroulages sont à confronter aux résultats présentés sur la figure V - -36.

Pour garder une certaine cohérence dans les comparaisons de l'évolution des ratios entre les essences, nous avons établi trois classes de densité (essences de faible densité, essences de densité moyenne et essence à forte densité).

Essences de faible densité : *Parkia* et *Virola*

La plage pour laquelle l'essence *Virola* se déroule bien est plus grande que celle de *Parkia* *Virola* fissure moins tôt à basse température. La valeur moyenne du rapport $\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r}$ est nettement plus élevée pour *Virola* (3.6) que pour *Parkia* (2.8).

Le copeau de *Virola* flambe moins vite à haute température, la valeur du rapport $\frac{\sigma_y}{\tau_r}$ du *Parkia* est toujours inférieure à 2, elle est de 1.6 à 80°C, alors que celle du *Virola* est au minimum égale à 2.3 pour une température de 80°C.

Essences de forte densité : *Tabebuia* et *Bocoa*

La fissuration de ces deux essences est importante puisque les valeurs du rapport $\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r}$ restent petites par rapport aux essences facilement déroulables. Toutefois, les valeurs moyennes (toutes températures confondues) de ce ratio, à savoir 2.3 pour *Bocoa* et 1.5 pour *Tabebuia*, confirment que le copeau de *Bocoa* est moins sensible à la fissuration que celui de *Tabebuia*.



Essences de densité moyenne : *Ocotea*, *Humiria*, *Dicorynia* et *Hymenolobium*

Tableau V - -12 Valeurs des ratios à 25°C pour les 4

Essence	essences de densité moyenne.			$\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r}$ élevées, ils sont à la fois résistants (déformables) en cisaillement et résistants à la rupture, ce sont des essences très favorables au déroulage.
	$\frac{\sigma_y}{\tau_r}$	$\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r}$	$\frac{G_{f,I}}{W_{4.6^\circ}}$	
<i>Ocotea</i>	2.4	2.5	2.7	Dicorynia a de mauvais (petits) rapports $\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r}$ ou $\frac{G_{f,I}}{W_{4.6^\circ}}$ à température ambiante, c'est donc, une essence
<i>Humiria</i>	2.2	3	3.8	
<i>Dicorynia</i>	2.8	2.1	1.8	
<i>Hymenolobium</i>	2.8	2.2	3	

très sensible à la fissuration.

V - 4.2.3. Critères de bonne « déroulabilité »

En comparant les valeurs des ratios des essences et leur évolution avec la température et les résultats présentés sur la figure V - -37, il est possible de proposer des valeurs limites des ratios pour lesquelles le déroulage se « passe bien ».

Il y a une fissuration importante du copeau lorsque $\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r} < 2.5$, exemple : *Vouacapoua*, *Dicorynia*, *Bocoa* et surtout *Tabebuia*.

On note un effet Horner lorsque $\frac{\sigma_y}{\tau_r} < 2$, exemple *Parkia*, *Vochysia*.

Il est nécessaire de chauffer les essences dont le ratio $\frac{G_{f,I}}{W_{4.6^\circ}} < 3$, exemple *Vouacapoua*, *Dicorynia*, *Bocoa*, *Hymenolobium* et *Tabebuia*.

En définitive, les critères favorables à un « bon » déroulage sont, dans nos essais :

$$\frac{\sigma_{r,I}}{\tau_r} > 2.5, \quad \frac{G_{f,I}}{W_{4.6^\circ}} > 3 \text{ et } \frac{\sigma_y}{\tau_r} > 2.$$

V - 5. Conclusion du chapitre

Pour confirmer les résultats, il est nécessaire de faire de nombreux autres essais de déroulage sans barre et avec enfoncement de la barre de pression, en augmentant : le nombre de températures d'essai, de passes d'usinage, de niveaux d'enfoncement de la barre et enfin en élargissant le nombre d'essences.

L'influence de la température sur les efforts de coupe est relativement faible, en comparaison de son influence sur les propriétés mécaniques. Par contre, l'effet de la température est assez net sur la plage de bonne déroulabilité déterminée par les coefficients de variation de l'effort d'attaque.

Les essais tels que nous les avons réalisés permettent de qualifier d'une façon correcte les essences qui se déroulent bien et celles qui sont moins bien déroulables.

Certains ratios des propriétés mécaniques (comme le rapport entre la contrainte limite de rupture en ténacité et la contrainte à la rupture en cisaillement RT) semblent pertinents pour qualifier l'aptitude au déroulage des différentes essences.

|

|

CONCLUSION GENERALE

L'objectif premier de ce travail était d'analyser le comportement mécanique du bois vert dans trois types de sollicitations a priori proches des principaux phénomènes physiques régissant le processus de coupe du bois par déroulage ou tranchage :

- la compression radiale (plus généralement orthogonale à la direction du fil du bois) jusqu'à un niveau de déformation élevé (> 20 %),
- le cisaillement RT, dit de « roulement » (rolling shear pour les anglophones) également jusqu'à des niveaux élevés de déformation angulaire (0.1 rd),
- la propagation de fissure en mode I dans la configuration LT (plan de fissure Longitudinal Tangentiel, direction de propagation de la fissure longitudinale).

Afin d'estimer l'influence respective de l'essence utilisée, de la densité et de la température du bois pendant l'essai, dix essences de densités (à H% =12 %) variant de 0.25 à 1.2 ont été testées à douze températures variant de 25 °C à 80 °C, dans chacune des trois sollicitations, avec trois répétitions par cas, en essayant d'utiliser des éprouvettes aussi proches que possible les unes des autres.

Les dispositifs expérimentaux nouveaux mis en place, en s'inspirant le plus possible d'essais existants, se sont révélés à la fois fiables et suffisamment performants pour réaliser des campagnes d'essais comparatifs. Ils ont permis de calculer dans chaque cas, trois descripteurs mécaniques intéressants :

- un paramètre de raideur, équivalent à un module, obtenu à partir de la pente de la partie initiale linéaire de la courbe effort - déplacement,
- un paramètre de résistance limite, équivalent à une contrainte, (associé à un paramètre de déformation correspondant) caractérisant un changement prononcé de comportement (flambement des cellules en compression ou amorce de rupture en cisaillement et en ténacité),
- un paramètre de dépense énergétique associé à l'histoire de la sollicitation résultant de l'aire mesurée sous la courbe effort - déplacement.

Il apparaît possible d'améliorer les essais de compression et de cisaillement en diminuant dans chaque cas, la hauteur (ou la largeur) de la partie soumise au champ de contrainte de compression (et de cisaillement). Avec une éprouvette de compression de dimensions 20R x 30T x 30L mm³, il serait possible de retarder l'apparition des bandes de cisaillement. Néanmoins, il ne faut pas perdre de vue que le but de ces essais n'est pas de décrire rigoureusement la loi de comportement mécanique du bois vert mais d'obtenir à partir d'essais rapides et fiables, des descripteurs explicatifs du comportement de l'essence étudiée lors du déroulage ou d'autres opérations de thermoformage.

L'analyse de l'ensemble des essais mécaniques met bien en évidence la double influence de la densité et de la température d'essai, paramètres qui à eux seuls expliquent des variations de 200% à 600% des descripteurs mesurés.

L'influence de la densité sur ces descripteurs peut se traduire raisonnablement bien par des fonctions puissances de type $C = K \cdot ID^\infty$

C = descripteur mécanique
 ID = infradensité
 ∞ = puissance variant de 0.5 à 2.5 selon le descripteur et la température d'essai.

Les valeurs de ∞ sont les plus élevées pour les descripteurs de l'essai de compression (respectivement, 2, 1.5 et 1 environ pour les descripteurs de type énergie, contrainte de limite et module), intermédiaires pour l'essai de cisaillement (respectivement 1, 1.35 et 1) et les plus basses pour l'essai de ténacité (respectivement 0.5, 0.66 et 0.66). Il faut noter que la qualité des régressions est généralement bonne pour les essais de cisaillement et de compression mais que l'influence de la densité sur la ténacité est beaucoup moins nette.

Les résultats montrent également un fort couplage entre densité et température. Il apparaît évident que l'influence de la température sur les propriétés mécaniques évolue quand la densité augmente. En règle générale, cette influence est d'autant plus marquée que la densité est élevée.

L'influence de la température sur tous les descripteurs mécanique, excepté l'énergie de rupture est très bien représentée, dans la plage expérimentale utilisée, par une formulation non linéaire du type :

$$C = M - N \cdot \text{Tanh} \left[a \frac{(T - T_p)}{T_p} \right]$$

M, N et a sont des paramètres d'étalement de la courbe selon les deux coordonnées.

T est la température d'essai

T_p est une température « critique » correspondant au point d'inflexion de la tangente hyperbolique utilisée dans la formule. elle peut être assimilée à une température de transition.

Il faut noter que l'estimation de cette température de transition est sujette à une certaine incertitude que l'on peut estimer à 4 ou 5 ° dans la plupart des cas. Elle n'apparaît pas significativement différente entre les différents descripteurs ; par contre, il apparaît des différences de comportement entre essences, la différence entre températures de transitions moyennes pouvant atteindre 10°C entre la plus faible (*Vochysia* ≈ 53° C) et la plus forte (*Parkia* ≈ 62 °C).

Le ratio entre valeurs maxima et minima d'un descripteur dans la plage de température expérimentée permet de qualifier la sensibilité à la température de ce descripteur. En moyenne, l'essai de compression est légèrement plus sensible (ratios moyens de 2.5 à 4.5 environ) que l'essai de cisaillement (ratios moyens de 2.5 à 3.5 environ). L'essai de propagation de fissure est nettement moins sensible à l'influence de la température (ratios moyen de 1.5 à 3 environ) en raison essentiellement de l'évolution particulière de l'énergie de rupture. Contrairement à tous les autres descripteurs, l'énergie de rupture ne décroît pas régulièrement quand la température de l'essai augmente. Il est même fréquent d'observer un maxima à une température intermédiaire avec des valeurs peu différentes entre hautes et basses températures.

Le couplage température - infradensité apparaît clairement avec ces ratios qui augmentent de façon significative depuis les faibles infradensités (2 environ pour les moins denses) jusqu'aux essences les plus denses (3.5 environ).

L'influence de la température sur les descripteurs mécaniques du comportement transverse du bois vert est d'autant plus prononcée que le bois est plus dense.

Les différences parfois sensibles entre essences de densité équivalente sont certainement à rechercher dans la composition intime de la paroi cellulaire.

Les résultats obtenus dans ces expérimentations permettent de classer les essences en essences « mécaniquement » supérieures (*Hymenolobium* par exemple) ou inférieures (*Bocoa* par exemple) à la moyenne compte tenu de leur densité, pour le comportement transverse.

Toutes essences et températures confondues dans l'analyse, il existe de très fortes corrélations entre tous les descripteurs mécaniques pour les différents essais, sauf pour l'énergie de rupture (R toujours < 0.5). Ces relations sont naturellement encore plus fortes à l'intérieur de chaque essence et; il apparaît cette fois-ci, des différences sensibles entre essences quant à la relation elle même entre descripteurs. Cela est particulièrement vrai pour les relations entre la contrainte limite à la rupture dans l'essai de ténacité et les contraintes limites des essais de compression et de cisaillement.

L'analyse de quelques ratios de descripteurs estimés a priori pertinents pour le déroulage montre que :

- il y a des différences très fortes entre essences pour ces ratios ; par exemple, le rapport entre descripteurs de contrainte limite en ténacité et en cisaillement varie de 1.5 en moyenne pour *Tabebuia*, à plus de 4 pour *Virola* ; il varie de 2 à 3 à température ambiante entre *Dicorynia* et *Humiria* ou *Vochysia*, pourtant d'infradensité comparable.
- ces ratios sont plus ou moins stables avec la température, selon les essences (très stables le cas d'*Ocotea* ou *Humiria*, variant fréquemment de plus de 50 % pour *Virola* ou *Bocoa*)
- bien évidemment les ratios entre l'énergie de rupture et les descripteurs « énergétiques » des autres sollicitations sont particulièrement sensibles à l'influence de la température, mais avec des schémas et des amplitudes de variation qui dépendent de l'essence et qui confirment qu'en moyenne cette influence est plus prononcée pour les bois de forte densité.

Enfin l'examen des déformations associées aux descripteurs de contrainte limite montre clairement que la « déformabilité » du bois humide augmente avec la température, ce qui est bien connu des praticiens du formage du bois.

Dans l'avenir, un certain nombre de simplifications peuvent être envisagées :

- limiter le nombre de température d'essai à 25, 50, 60, 70, 80 °C, tout en réalisant quelques essais proches de zéro et de 100°C pour mieux valider le modèle de représentation utilisé dans ce travail. Cela permettrait déjà de réduire de moitié le nombre d'essais.

- limiter le nombre d'essais de compression et de cisaillement compte tenu des corrélations très fortes entre les descripteurs de ces deux essais.

Par contre, il est indispensable d'étendre l'expérimentation à d'autres arbres des mêmes espèces pour quantifier le poids respectif de l'effet arbre et de l'effet espèce (en restant toujours dans le duramen mature d'arbres de grand diamètre).

L'analyse sur des espèces homogènes à croissance rapide, de l'effet distance à la moelle (juvénilité) permettrait sans doute d'éclairer l'influence de paramètres ultrastructuraux (composition chimique, angle des microfibrilles) et structuraux (épaisseurs des parois) qui évoluent dans ce cas, à partir du même plan ligneux.

Il est tout aussi important, pour ce qui concerne les bois de Guyane, de balayer plus largement la diversité des espèces présentes pour mieux apprécier l'effet espèce au-delà de l'infradensité.

Les essais de déroulage ont été beaucoup plus limités dans ce travail où nous nous sommes contentés d'analyser les efforts Fa et Fb ainsi que l'usinabilité des bois testés à différentes températures, sans barre de pression. L'expérimentation mise en place à l'ENSAM Cluny par Butaud, Decès Petit et Marchal est aujourd'hui presque opérationnelle et offre un champs d'expérimentation direct de l'aptitude au déroulage quasi illimité. La régulation thermique (maintien de l'humidité et de la température localement pendant l'usinage) reste un problème mal résolu. Une solution assez simple pourrait être un arrosage maîtrisé de la zone usinée par un filet d'eau régulé à la température du bois en cours d'essai, venant en complément des précautions déjà prises.

Pour Fa, nous avons retrouvé une faible décroissance de cet effort exercé par la face d'attaque de l'outil sur le placage en formation, quand la température augmente. Dans ce cas, l'infradensité du placage reste le premier facteur explicatif des variations de Fa. Si l'on n'utilise que les descripteurs mécaniques, les descripteurs de type « énergétique » et notamment l'énergie de rupture apparaissent comme les plus pertinents. Il serait intéressant dans l'avenir de développer un modèle de type « énergétique » du déroulage en parallèle avec le modèle de Thibaut, basé sur une analyse en terme d'efforts surfaciques, d'efforts résultants et de contraintes limites.

Les variations de Fb, effort exercé par la barre de pression sont très bien expliquées par les descripteurs de l'essai de compression, les descripteurs énergétiques se révélant à nouveau plus performants. Cette fois, l'influence de la température est nettement plus prononcée.

Nous retrouvons aussi une influence très prononcée de la température sur la plage de bonne usinabilité des bois testés en l'absence de barre de pression - cette plage s'amplifie et se décale vers les fortes épaisseurs quand la température augmente. Pour les bois tendres, le risque de mauvais usinage avec des placages pelucheux pour les faibles épaisseurs augmente avec la température. Par contre, pour les plus fortes épaisseurs le risque de microfissurations, affectant une proportion importante de l'épaisseur du placage, diminue lorsque la température augmente.

La comparaison de l'aptitude à l'usinage, basée sur l'observation et l'analyse de ces plages d'usinabilité, et des ratios entre descripteurs mécaniques entre essences laisse entrevoir des critères possibles d'aptitude au déroulage. Ils permettraient d'estimer cette aptitude a priori mais aussi d'examiner l'efficacité éventuelle d'un traitement thermique préalable.

Dans l'avenir, il est nécessaire dans un premier temps, d'augmenter sérieusement la palette d'espèces testées, en examinant parallèlement la variabilité de cette aptitude au déroulage dans chaque essence importante. Cela permettra de proposer sur une base plus solide qu'actuellement, une batterie de critères (ratios sans doute) pertinents pour tester l'usinabilité. Il est aussi indispensable de réaliser des essais avec barre de pression, seuls représentatifs de la pratique réelle du déroulage industriel.

Pour répondre à un problème industriel type sur l'utilisation d'une essence méconnue, la démarche suivante peut être proposée :

A)

- réalisation d'essais mécaniques à plusieurs températures
- examen du phénomène de recouvrance hygrothermique et des températures critiques risquant de provoquer des fentes importantes en bout de billon
- essais de déroulage sans barre de pression à différentes températures sur une microdérouleuse qui n'a pas besoin d'être instrumentée

A la fin de cette phase de laboratoire, on disposera d'indications sur l'usinabilité et les températures a priori optimales de travail.

B)

- Essais complémentaires de déroulage avec barre de pression, aux températures conseillées, afin de proposer des gammes de réglages optima (épaisseur de placage, angle de dépouille et cotes de la barre de pression en fonction du rayon de déroulage) sur la microdérouleuse.
- Validation de ces résultats (étuvage et déroulage) par des essais préindustriels et industriels sur une dérouleuse de qualité. : analyse des propriétés des placages ainsi obtenus du point de vue physicomécanique (retraits, modules d'élasticité, résistance à la rupture) et esthétique (couleur, dessin, défauts visuels).

C)

Réalisation et test de produits cibles semi-finis ou finis :

- Contre-plaqués intérieurs ou extérieurs à usage structural ou décoratif,
- emballages légers,
- LVL pour un usage en charpente ou en menuiserie, en examinant leurs aptitudes à répondre aux cahiers des charges (résistance mécaniques, durabilité, contact alimentaire etc...).

L'objectif pour un organisme de recherche pour le développement pourrait être de rassembler et tenir à disposition des utilisateurs potentiels, les résultats des ces 3 phases d'essais sous forme d'une base de données organisée.

En matière de recherche plus fondamentale, le champ est très ouvert et la combinaison d'essais mécaniques simples, quasistatiques, à vitesse de déformation variant dans une large plage, (de 10^4 à 10^5 par exemple), d'essais mécaniques à grandes vitesses de déformation (barre de Hopkinson par exemple) et d'essai de déroulage à des vitesses variant dans une plage de l'ordre 10^4 , permettrait de mieux explorer l'influence de la température et du temps dans le comportement mécanique du bois vert.

REFERENCES CITEES

- 1 - **BALDWIN R. F. (1995)**
Plywood and veneer-based products, manufacturing practices.
Miller Freeman books Inc., USA, 388 p.
- 2 - **BENA P. (1960)**
Essences forestières de Guyane.
Office National des Forêts, 497 p.
- 3 - **BERRADA E. (1991)**
Recouvrance Hygro-Thermique du bois vert.
Doctorat de l'Université de Montpellier II, 248 p.
- 4 - **BERTIN A. (1920)**
Les bois de Guyane et du Bresil. Mission forestière coloniale, Tome 5.
Edit. E. Larose, Paris, 324 p.
- 5 - **BUTAUD J. C. (1994)**
Conception d'une microdériveuse instrumentée.
Mémoire d'ingénieur du CNAM.
- 6 - **BUTAUD J. C., DECES-PETIT C., MARCHAL R. (1995)**
An experimental device for the study of wood cutting mechanisms : the microlathe.
Poster session proceedings of the 12th International Wood Seminar, Oct. 2, KYOTO (Japan), 479-485..
- 7 - **C.T.F.T. (Centre Technique Forestier Tropical) (1989)**
Bois de DOM-TOM, tome I : Guyane.
CIRAD, Montpellier 226 p.
- 8 - **CÔTÉ W.A. (1981)**
Ultrastructural-Critical Domain for Wood Behavior, Origins, Current Concepts, Future Potentiel..
Wood Science and Technology, 15(1), 1-29.
- 9 - **DAVIDSON R.W. (1962)**
The influence of temperature on creep wood.
Forest Products Journal, 12(8), 377-381.
- 10 - **de FRAMOND L. (1990)**
Figurations et qualité d'aspect des placages de Chênes français.
Mémoire de troisième année d'ingénieur ENITEF.
- 11 - **DELAGE P., MONTCERISIER H., NETTER P. (1995)**
Audit de la filière bois en Guyane.
Direction de l'Agriculture et de la forêt de Guyane - à paraître.
- 12 - **DETIENNE P. (1988)**
Cours illustré d'anatomie des bois.
Ed. Centre Technique Forestier Tropical, 47 p.
- 13 - **DETIENNE P. (1995)**
Nature et périodicité des cernes dans quelques bois guyanais.
Bois et Forêts des Tropiques n°243, p.65-75.
- 14 - **DETIENNE P., JACQUET P., MARIAUX A. (1982)**
Manuel d'identification des bois tropicaux. Tome 3 : Guyane française.
Ed. Centre Technique Forestier Tropical, 315p.
- 15 - **DEVEZ G. (1932)**
Les plantes utiles et les bois industriels de la Guyane.
Société d'éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris 90 p.
- 16 - **EGUSA Y. (1967)**
Cutting of rotary veneer. I: Effect of the position of nose bar to knife edge. Bulletin of the Government Forest Exp. Station, Tokyo, n° 203
- 17 - **FOUQUET D., BEAUCHENE J. (1995)**
Mise en valeur des essences forestières guyanaises par expérimentation aboutage et tranchage.
Rapport technique CIRAD Forêt.
- 18 - **FRANÇOIS P. (1992)**
Plasticité du bois en compression multiaxiale.
Doctorat de l'Université de Bordeaux I, 98 p
- 19 - **GAZEL M. (1990)**
Les bois.
La documentation guyanaise, collection Saga, 63 p.

- 20 - **GERHARDS . (1982)**
Essences forestières de Guyane.
Office National des Forêts, 497 p.
- 21 - **GERHARDS C.C. (1982)**
Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of woods: an analysis of immediate effects.
Wood and Fiber 14 (1), 4-36
- 22 - **GORING D.A.I. (1963)**
Thermal softening of lignin, hemicellulose and cellulose.
Pulp and Paper mag. Canada, 64, T517-527.
- 23 - **GRENAND P., MORRETI C., JACQUEMIN H. (1987)**
Pharmacopées traditionnelles en Guyane.
Publi. ORSTOM, Paris, 569 p.
- 24 - **GRIL J., BERREDA E, THIBAUT B. (1993a)**
Recouvrance hygrothermique du bois vert. I : Influence de la température. Cas de Jujubier (*Ziziphus lotus L. Lam.*).
Ann. Sci. For., 50 (1), p. 57-70.
- 25 - **GRIL J., BERREDA E, THIBAUT B. (1993b)**
Recouvrance hygrothermique du bois vert II Variation dans le plan transverse chez le châtaignier (*Castanea sativa Mill.*) et l'Épicéa (*Picea abies Karst.*) et conséquences pour la fissuration à coeur induite par l'étuvage.
Ann. Sci. For., 50(5), 487-508.
- 26 - **GRIL J., NORIMOTO M. (1993)**
Compression of wood at high temperature
COST 508 Wood mechanics, Limerick, Ireland
- 27 - **GRIL J., THIBAUT B., BERREDA E., MARTIN G. (1993a)**
Recouvrance hygrothermique du bois vert. I Influence de la température. Cas du Jujubier (*Ziziphus lotus L. Lam.*)
Ann. Sci. For., (1), 57-70
- 28 - **GUITARD D. (1987)**
Mécaniques du matériau bois et composites.
Cepadues éditions.
- 29 - **GUITET S. (1995)**
Contribution à l'étude de la qualité du bois d'une essence forestière guyanaise, l'Angélique..
Mémoire de fin d'étude FIF-ENGREF.
- 30 - **HILLIS W.E., ROZSA A.N. (1985)**
High temperature and chemical effects on wood stability. Part 2. The effect of heat on the softening of radiata Pine.
Wood Sciences and Technology 19, 57-66
- 31 - **HILLIS W.E., ROZSA A.N.(1978)**
The softening temperatures of wood.
Holzforschung 32 (2), 68-73
- 32 - **HOADLEY R.B. (1962)**
Dynamic equilibrium in veneer cutting.
Forest Products Journal. 12 (3)
- 33 - **HSU N.N., TANG R.C. (1974)**
Internal stresses in wood logs due to anisotropic shrinkage.
Wood Sci. 7(1), 43-51
- 34 - **IIDA I. (1986)**
The thermal softening of green wood evaluated by Young's modulus in bending.
Mokuzai gakkaiishi vol. 32, n°6, 472-477
- 35 - **KELLEY S.S., RIALS T.G., GLASSER W.G. (1987)**
Relaxation behaviour of the amorphous components of wood.
Journal of Materials Science, vol. 22, 617-624.
- 36 - **KELSEY K.E. (1963)**
A critical review of the relationships between the shrinkage and stucture of wood.
Division of Forest Products, Technological Paper n°28, CSIRO, Australia.
- 37 - **KOLLMAN F.F.P., COTE W.A. (1984)**
Principles of wood science and technology. Vol. I : Solid wood.
Spinger-Vergal, 1050 p..

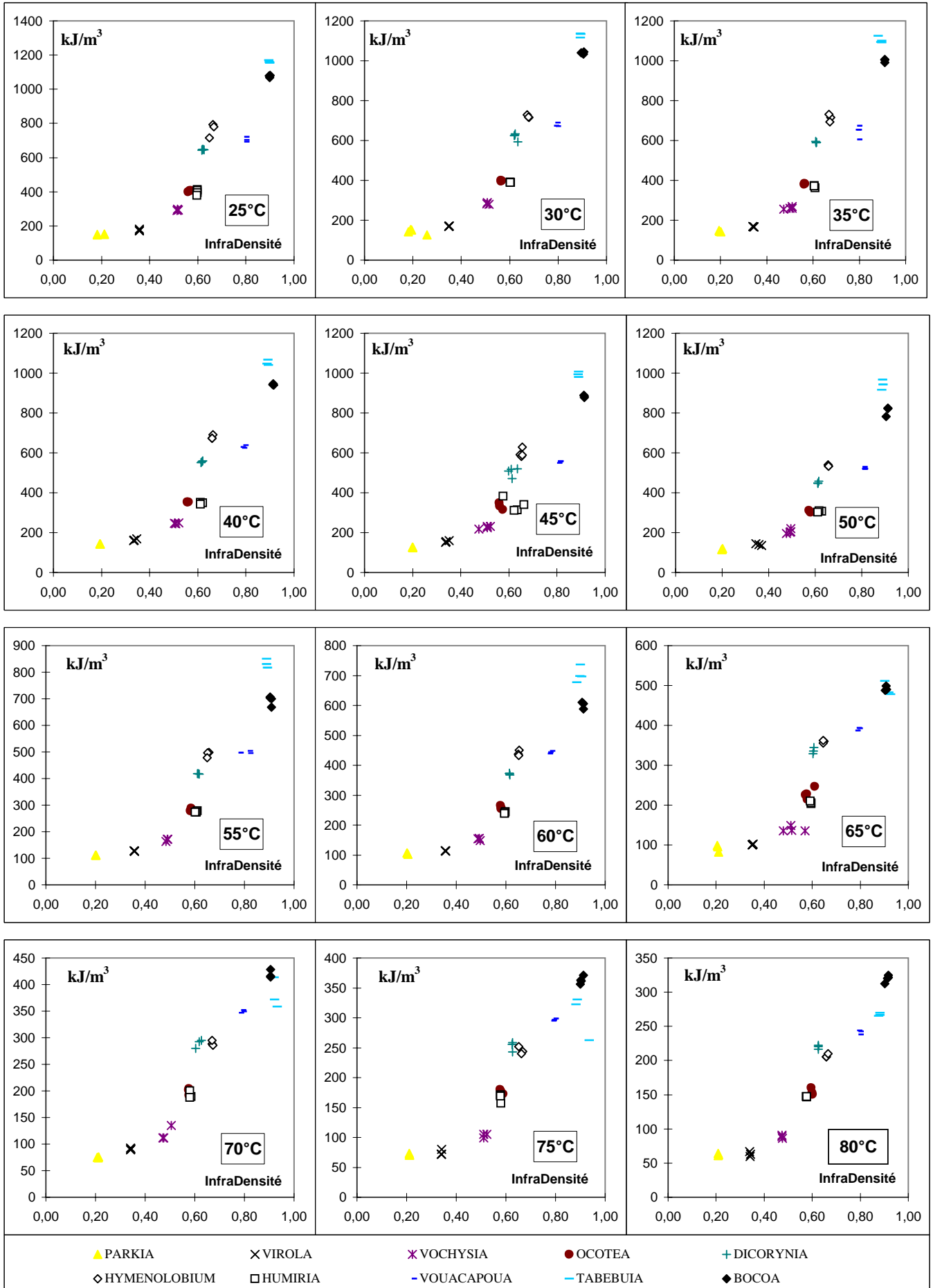
- 38 - **KRETSCHMANN D.E., GREEN D.W., NELSON W.J. (1990)**
The effect of moisture content on mode I fracture energy toughness in southern pine.
Timber Engineering Meeting, Technical University of Denmark, Horsholm, Denmark.
- 39 - **KUBLER H. (1977)**
Formation of checks in tree stems during heating.
Forest Products Journal, 27 (1), 41-46
- 40 - **KUBLER H. (1987)**
Grow stresses in the tree stems and related wood properties.
Forest Products Abstracts, 10(3), 61-119
- 41 - **KULBER H. (1973)**
Hygrothermal recovery under stress and release of inelastic strain.
Wood Science, 6 (1), p. 78-86.
- 42 - **LAPIERRE C., MONTIES B. ET ROLANDO C. (1986)**
Thioacidolysis of poplar lignins: identification of monomeric syringyl products and characterization of guaiacyl-syringyl lignin fraction.
Holzforschung 10, 113-118.
- 43 - **LARSEN H.J., GUSTAFSSON P.J. (1990)**
Fracture energy of wood in tension perpendicular to the grain - results from a joint test project.
Paper 23-19-2 in Proc. of CIB-W18A meeting in Lisbon.
- 44 - **LE GOVIC C, BENZAIM A., ROUGER F. (1989)**
Fluage du bois en fonction de la température : Etude expérimentale, modélisation et conséquences réglementaires
CTBA, dossier scientifique et technique, n° 6 p.
- 45 - **LEWIN M. ET GOLDSTEIN I.S. (1991)**
Wood structure and composition.
International fiber science and technology. Vol 11, Marcel Dekker Inc., New York, 488p.
- 46 - **LINDEMAN J. C. ET MENNEGA A. M. W. (1963)**
Bomenboek voor Surinam.
Uitgave Dienst's Lands Bobbeheer Suriname, Paramaribo, 1963, 312p.
- 47 - **LUI Y., NORIMOTO M., MOROOKA T.(1993)**
The large compressive deformation of wood in the transverse direction I.
Mokuzai Gakkaishi vol. 39, n°10, 1140-1145.
- 48 - **LUTZ J. F. (1971)**
Wood and log characteristics affecting veneer production.
USDA Forest service research paper FLP 150,31 p.
- 49 - **LUTZ J. F. (1972)**
Veneer species that grow in the United States.
USDA Forest service research paper FLP 167,127 p.
- 50 - **LUTZ J. F. (1974)**
Techniques for peeling, slicing and drying veneer.
FLP Madison Report, 228 p.
- 51 - **MARCHAL R. (1989)**
Valorisation par tranchage et déroulage des bois de chênes méditerranéens.
Doctorat de l'INPL en sciences du Bois, 294 p.
- 52 - **MARCHAL R., JULIEN D, MOTHE F., THIBAUT B. (1993)**
Mechanical aspects of heating wood in rotary veneer cutting.
11 International Wood Machining Seminar, Honne, Norvège.
- 53 - **Mc MILLIN W. (1958)**
The relation of mechanical properties of ,wood and nosebar pressure in the production of veneer.
Forest Products Journal, 1958 (1), 23-32
- 54 - **MONTIES B. (1980)**
Les polymères végétaux.
Ed. Gauthier- Villars, Collection de Biochimie Appliquée, Bordas, Paris, 345p.
- 55 - **MOROHOSHI N., SAKAKIBARA A. (1971)**
The chemical composition of reaction wood.
Mokuzai Gakkaishi 17, 400-404.

- 56 - **MOROOKA T., INOUE M., KAWAI S., NORIMOTO M. (1994)**
Rheological properties of wood under high temperature steam condition.
The proceedings of the international symposium on the utilisation of fast-growing trees, Oct. 15-17, 1994, Nanjing, P. R.. China, 707 p.
- 57 - **MOTHE F. (1988)**
Aptitude au déroulage du bois de douglas. Conséquences de l'hétérogénéité du bois sur la qualité des placages.
Doctorat de l'INPL en Sciences du Bois, Nancy.
- 58 - **MOVASSAGHI E. (1985)**
Influence des paramètres microdensitométriques du bois sur les efforts de coupe et la qualité des placages de Douglas et de Châtaignier obtenus par déroulage.
Doctorat de l'INPL en Sciences du Bois, Nancy.
- 59 - **MOVASSAGHI E., MOTHE F., THIBAUT B. (1986)**
Étude de la faisabilité du déroulage de brins de taillis de châtaignier.
Rapport de contrat avec la Société R.O.L., Université de Montpellier II.
- 60 - **NORIMOTO M., GRIL J. (1989)**
Wood bending using microwave heating.
Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, Vol. 24, n° 4, 203-212.
- 61 - **OKUYAMA T., SUZUKI S., TERAZAWA S. (1977)**
Effect of temperature on orthotropic properties of wood. I: On the transverse anisotropy in bending.
Mokuzai Gakkaishi vol. 23, n°12, 609-616
- 62 - **PERSON K., GUSTAFSSON P.J., PETERSSON H. (1993)**
Influence of plastic dissipation on apparent fracture energy determined by a three point bending test.
Preliminary version.
- 63 - **POLAK A.M.(1992)**
Major timber trees of Guyana, a field guide.
The tropenbos Foundation Wageningen, the Netherlands, 272 p.
- 64 - **RENAUD M. (1932)**
Contribution à l'étude des bois de la Guyane française.
Editions Melun, Paris, 240 p.
- 65 - **ROOSMALEN M.G.M. van (1985)**
Fruits of the Guianan Flora.
Institute of Systematic Botany, University of Utrecht, the Netherlands, 483 p.
- 66 - **SADOH T. (1981)**
Viscoelastic properties of wood in swelling systems.
Wood Science and Technology 15, 57-66.
- 67 - **SALMEN L. (1984)**
Viscoelastic properties of in situ lignin under water-saturated conditions.
Journal of Materials Science 19 , 3090-3096.
- 68 - **SAO CHAN CHEONG G. (1992)**
Etude de faisabilité d'une unité de tranchage ou de déroulage en Guyane française.
Diplôme de troisième année CNEARC.
- 69 - **SAVARD J., BESSON A., MORIZE S. (1954)**
Analyse chimique des bois tropicaux.
Centre Technique Forestier Tropical, 190 p.
- 70 - **SCHENER B. (1984)**
Biostatistique.
Edit. Gaëtan Morin, 850 p.
- 71 - **SCHNIEWIND A.P., OHGAMA T., AOKI T., YAMADA T. (1982)**
Effect of specific gravity, moisture content and temperature on fracture toughness of wood.
Wood Science 15 (2), 101-109
- 72 - **SEICHEPINE J. L. (1980)**
Mise au point d'une méthode expérimentale destinée à l'identification de la matrice des complaisances élastiques des solides anisotropes : application au matériau bois.
Doctorat d'ingénieur de l'Institut National de Polytechnique de Lorraine.
- 73 - **SIAU J.F. (1984)**
Transport Processes in Wood.

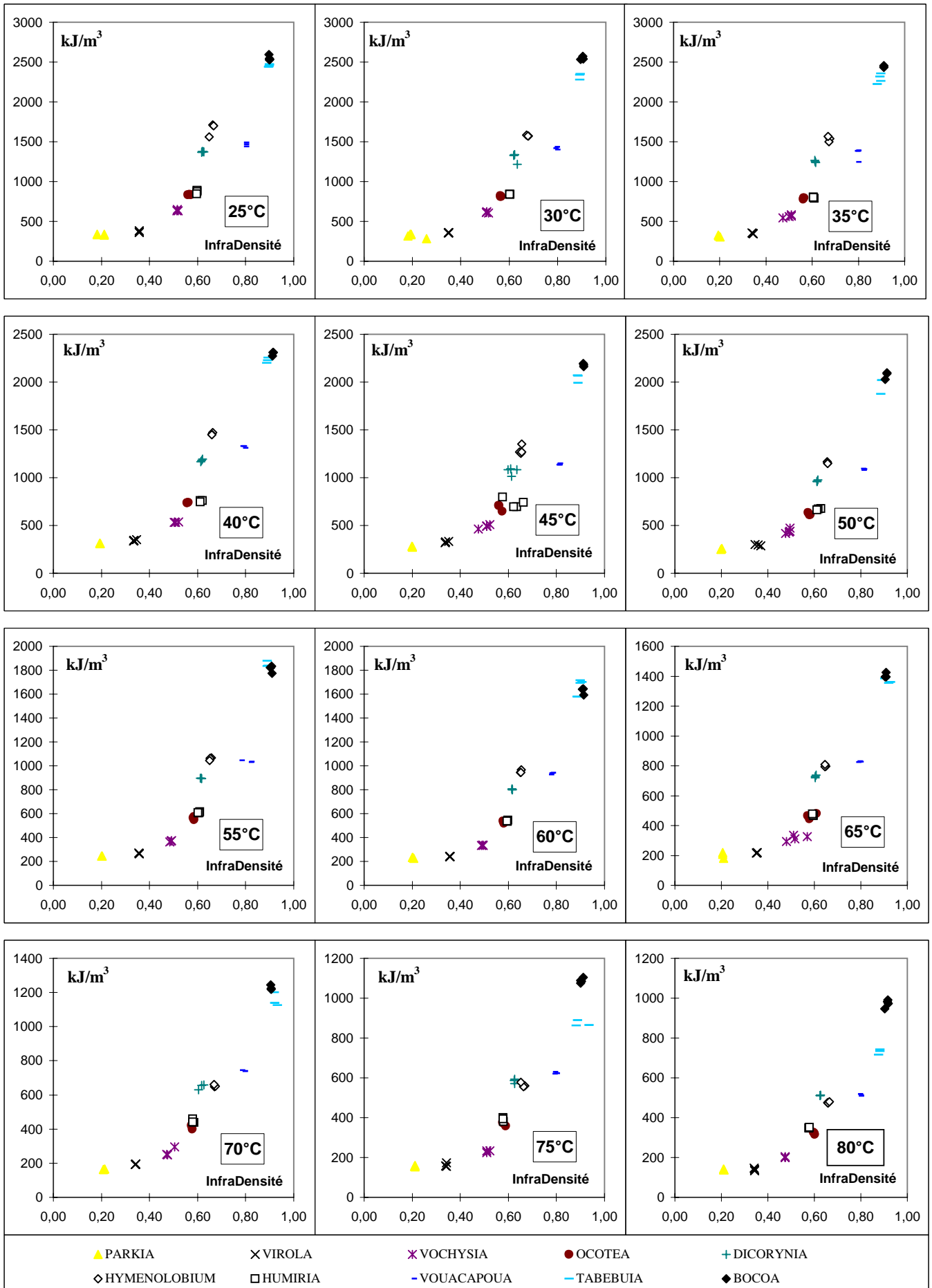
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 245 p.

- 74 - **SIH G. C., PARIS P. C., IRWIN G. R. (1965)**
On cracks in rectilinearly anisotropic bodies.
International Journal of Fracture Mechanics, Vol. 1, p.189-203.
- 75 - **SKAAR C. (1988)**
Wood-water relations.
 Springer-Verlag, 279 p.
- 76 - **SMITH I., CHUI Y.H. (1994)**
Factors affecting model fracture energy of plantation-grown red pine.
Wood Sciences and Technology 28, 147-157.
- 77 - **STARKANEN K.V. ET HERGETT H.L. (1971)**
Lignins - Occurrence, Formation, Structure and Reactions.
 (Starkanen K.V., Lugwig C.H., eds)Wiley-Interscience, New York, USA, 73p.
- 78 - **THIBAUT B. (1976)**
Connaissance du processus de déroulage du bois. Etude de l'apparition des microfissurations pendant la coupe.
Compte rendu de fin d'étude. DGRST N° 76-7-0555.
- 79 - **THIBAUT B. (1988)**
Le processus de coupe du bois par déroulage.
 Thèse de doctorat d'État mention Sciences, Montpellier II, 367 p.
- 80 - **THIBAUT B. (1988b)**
Analyse des phénomènes de flambement du copeau lors de l'usinage du bois en mode 0° 90°.
1er colloque européen : Comportement mécanique du bois, Bordeaux, GS Réologie du Bois (ed.), p. 287-298.
- 81 - **THIBAUT B. (1989)**
Le déroulage des bois de petit diamètre.
Projet groupe P5.01 : « Proprieties and utilisation of tropical woods », IUFRO, Abidjan, P. 117-129.
- 82 - **THIBAUT B. (1992)**
Basic process in veneer cutting, summary of the main experimental results and proposed simplistic models.
IUFRO All Division 5 conference, Nancy, 23-28/08/92, ARBOLOR (ed.), p. 579..
- 83 - **THIBAUT B., CHANSON B., FOURNIER M., GRIL J. (1993)**
Quelques aspects de la mécanique du bois.
MECAMAT, juin 93, n° 10.
- 84 - **URAKAMI H., NAKATO K. (1966)**
The effect of temperature on torsional stress relaxation of wet Hinoki wood.
Mokuzai Gakkaishi vol. 12, 118-123
- 85 - **VALENTIN G., ADJANOHOUN G. (1992)**
Applicability of classical isotropic fracture mechanics.
Materials and Structures, 25, 3-13.
- 86 - **VINK A.T. (1983)**
Surinam timbers.
State Forest Industries Inc. (SURTIM), Paramaribo, 253 p.

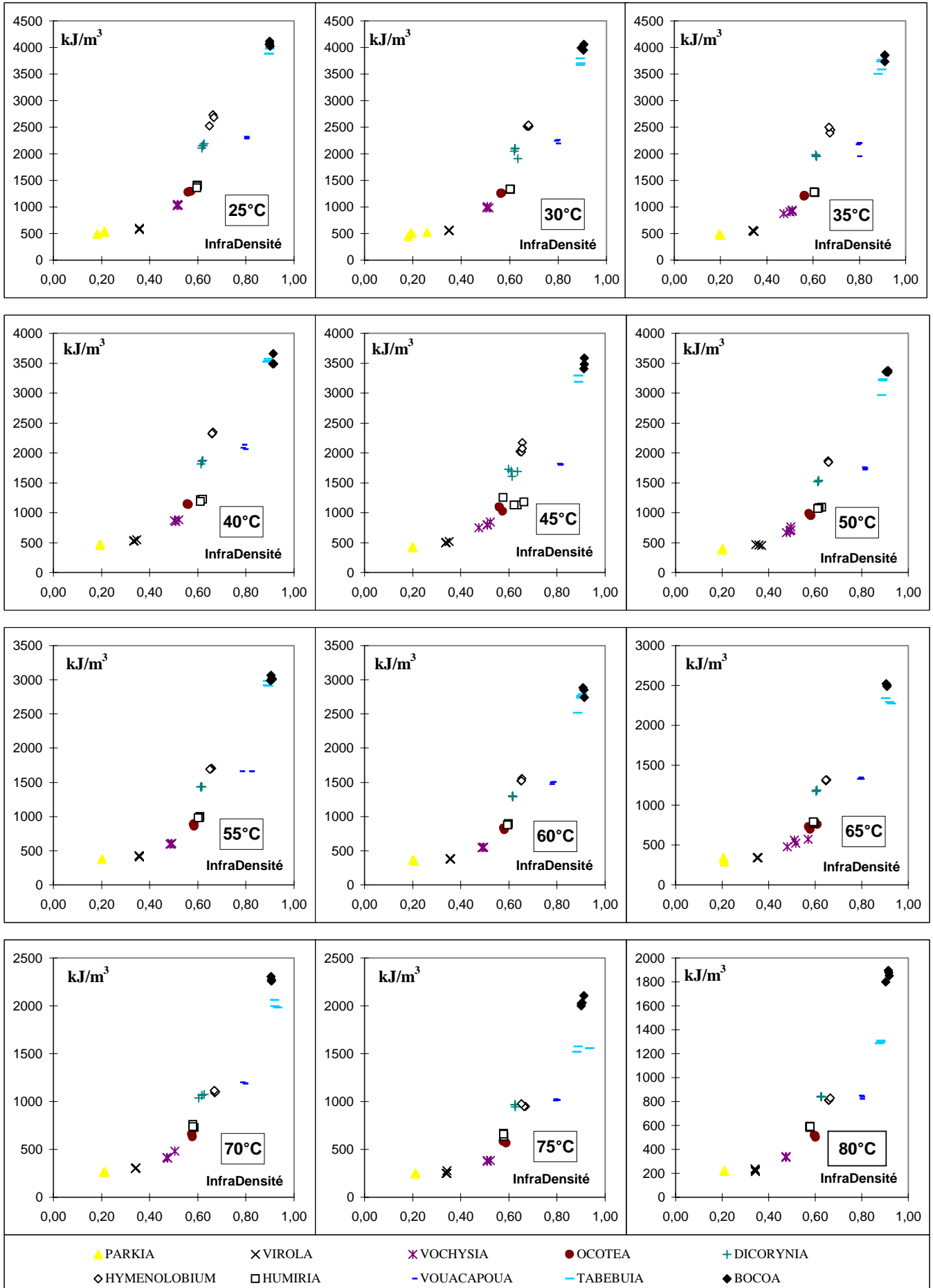
ANNEXES



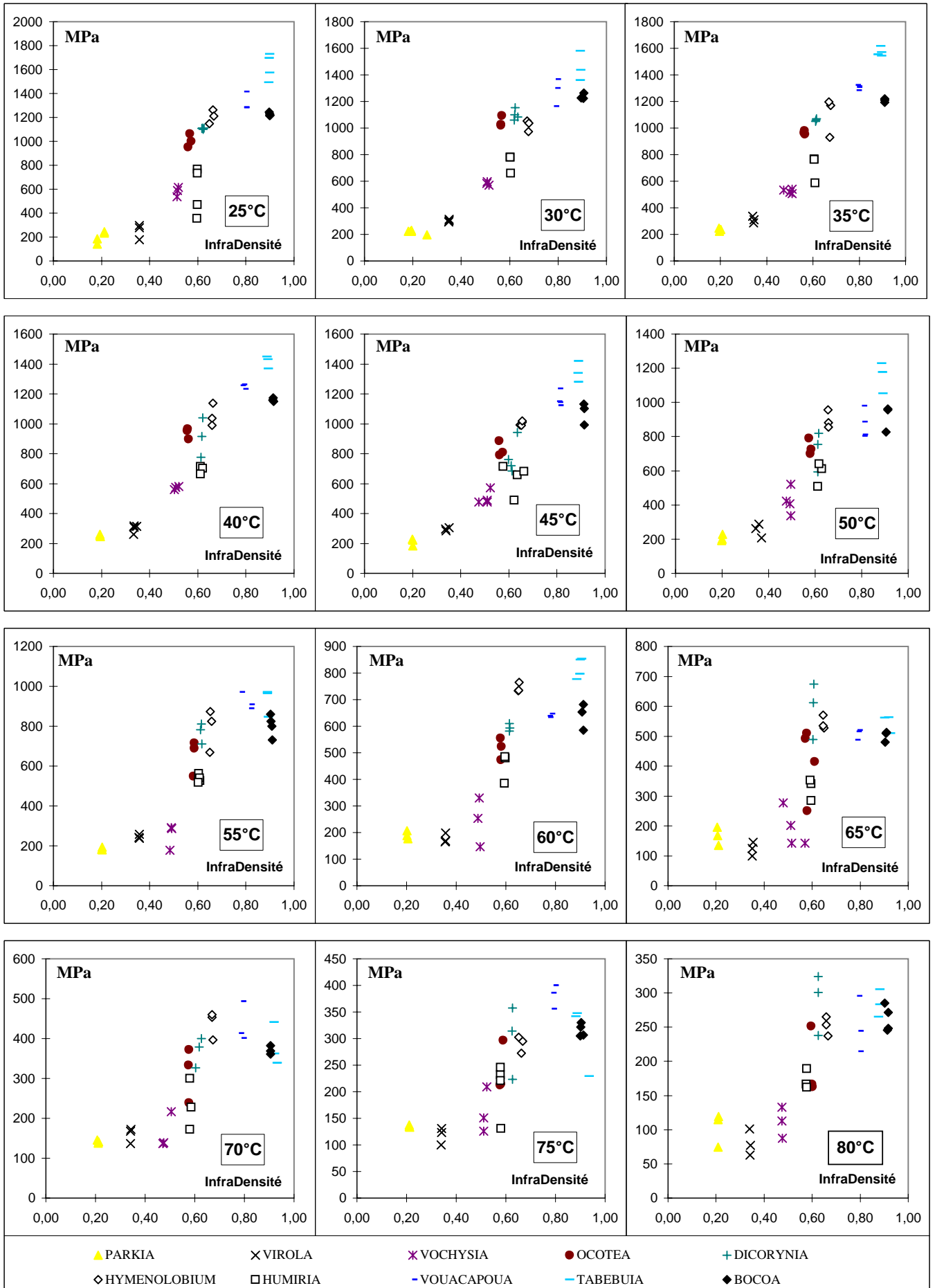
Evolution de l'énergie de compression à 6.67 % de déformation $W_{6.67\%}$ (en kJ/m^3) de la courbe de *compression* radiale en fonction de l'infradensité des dix espèces aux différentes températures d'essai.



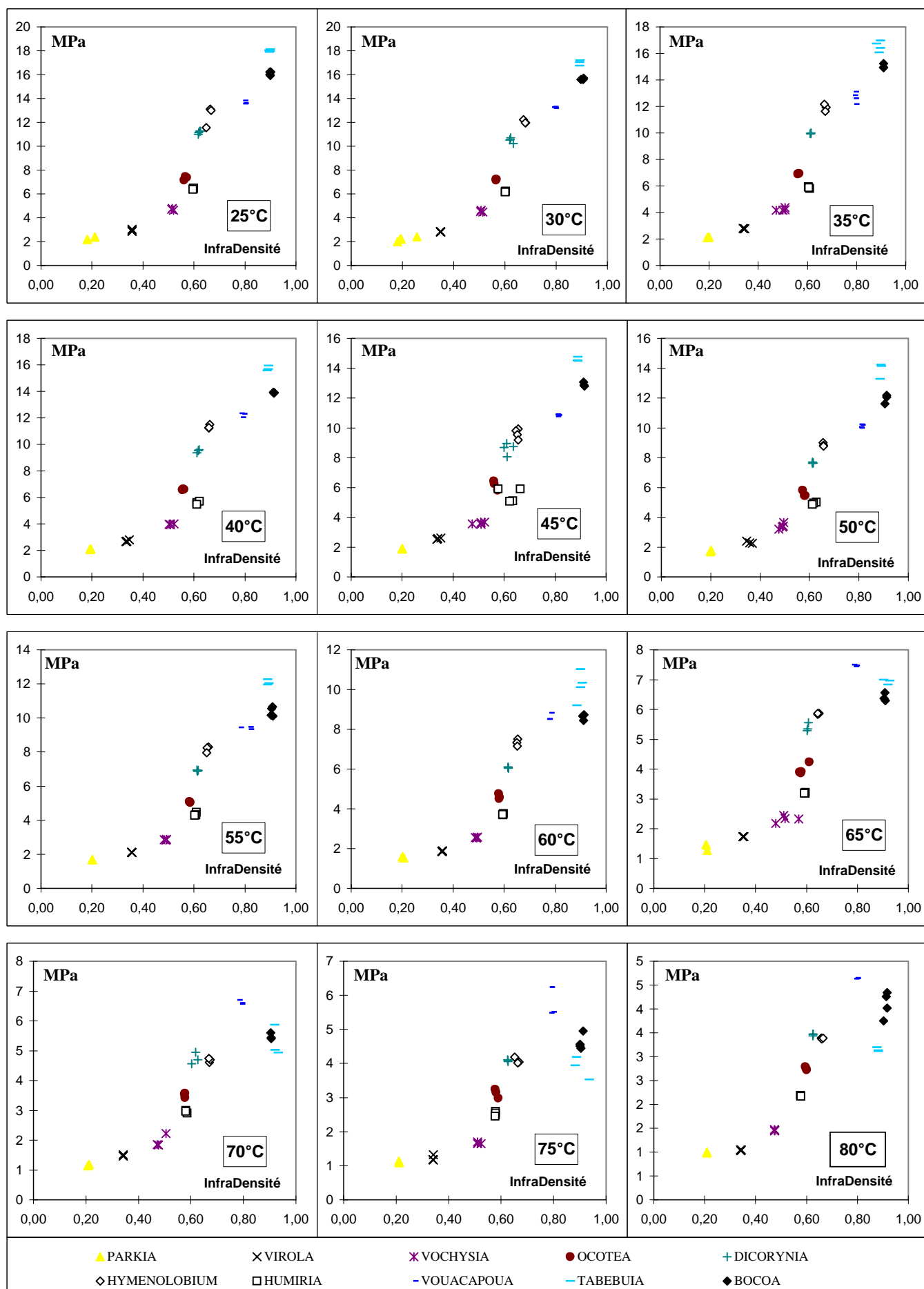
Evolution de l'énergie de compression à 13.3 % de déformation $W_{13.3\%}$ (en kJ/m^3) de la courbe de *compression* radiale en fonction de l'infradensité des dix espèces aux différentes températures d'essai.



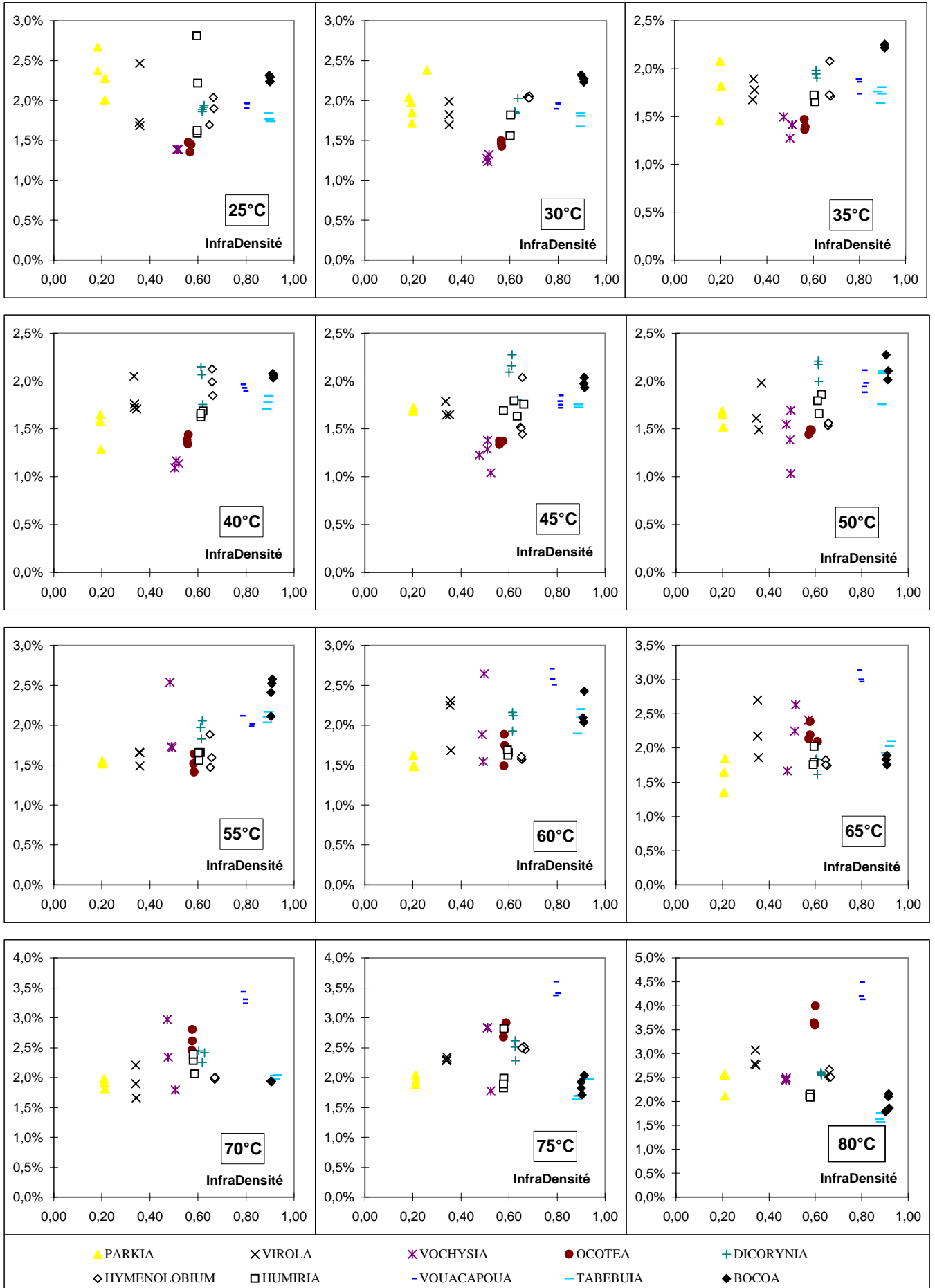
Evolution de l'énergie de compression à 20 % de déformation $W_{20\%}$ (en kJ/m^3) de la courbe de *compression* radiale en fonction de l'infradensité des dix espèces aux différentes températures d'essai.



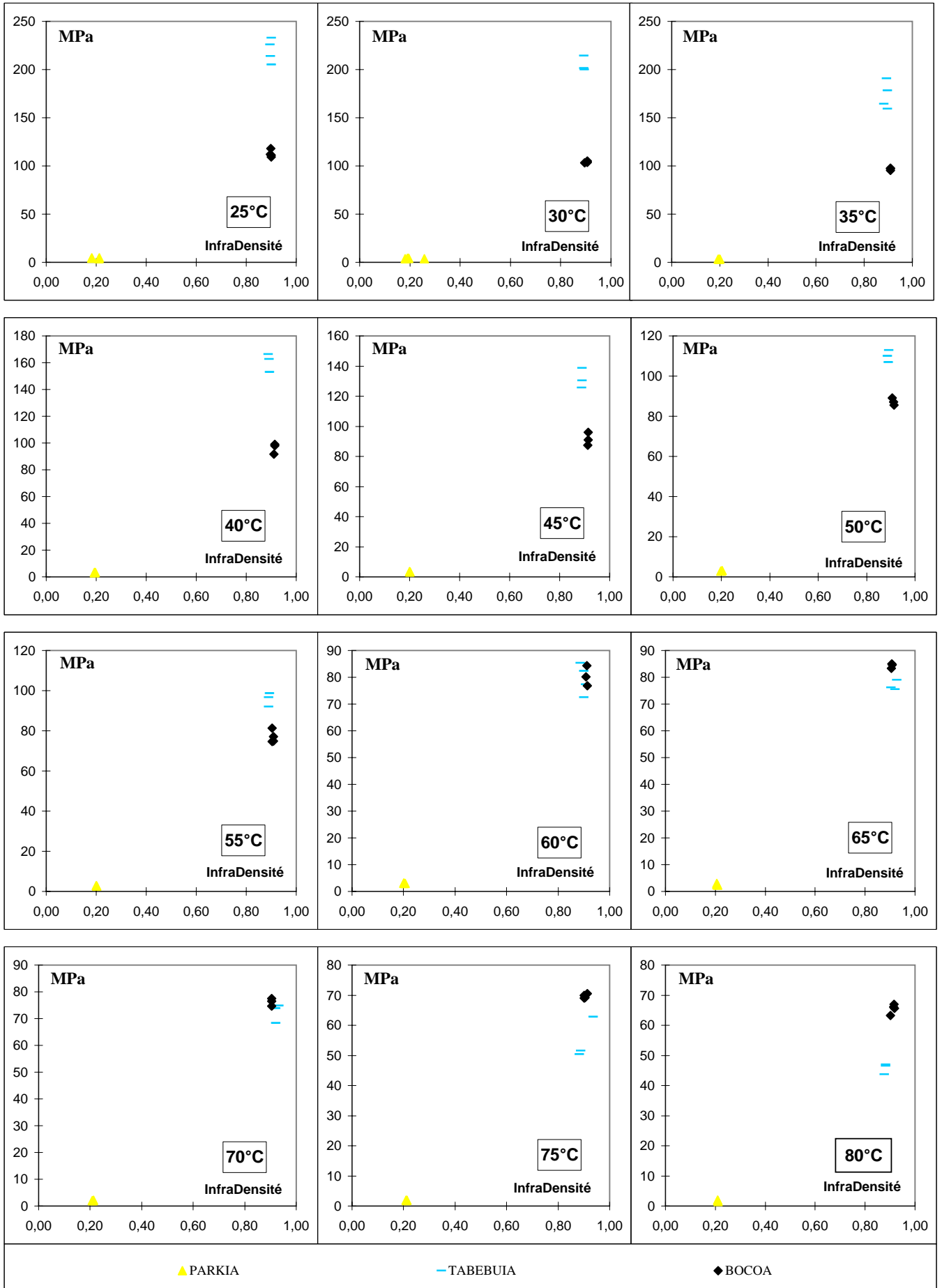
Evolution du module équivalent E_{re} (en MPa) de la courbe *decompression* radiale en fonction de l'infra-densité des dix espèces aux différentes températures d'essai.



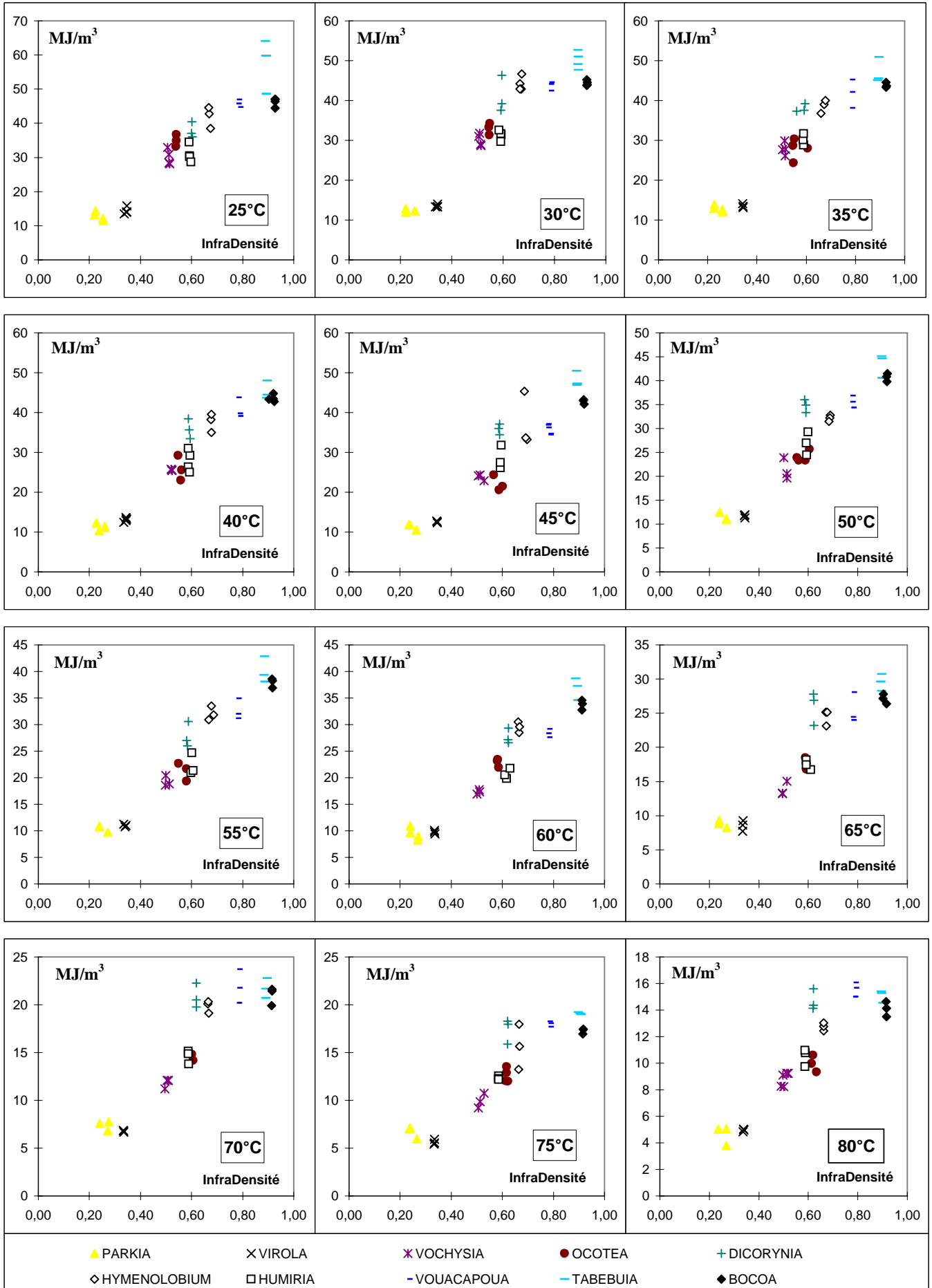
Evolution de la contrainte σ_y (en MPa) au premier coude de la courbe *decompression* radiale en fonction de l'infra-densité des dix espèces aux différentes températures d'essai



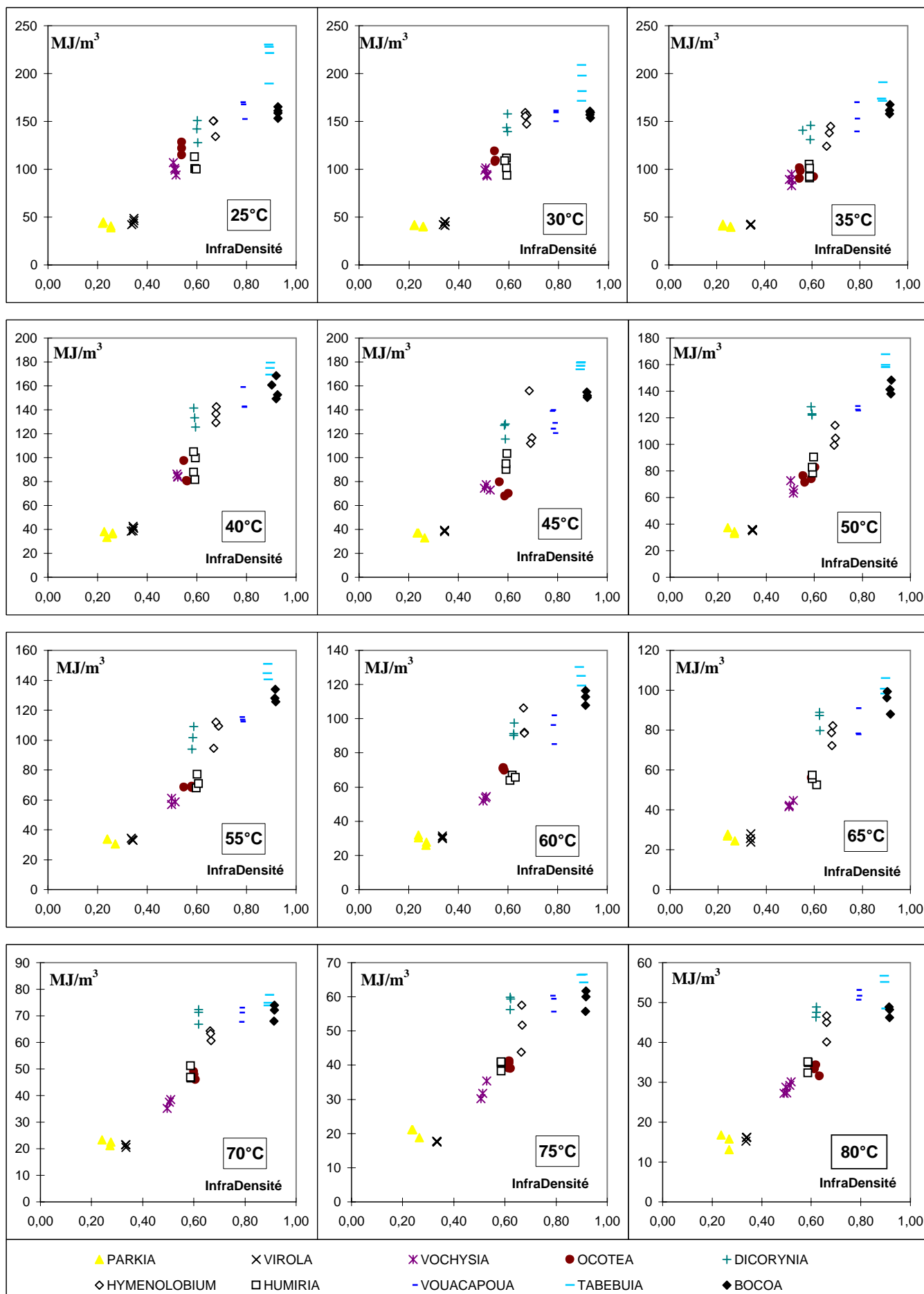
Evolution de la déformation ϵ_y (en %) au point d'inflexion de la courbe *decompression* radiale en fonction de l'infradensité des dix espèces aux différentes températures d'essai



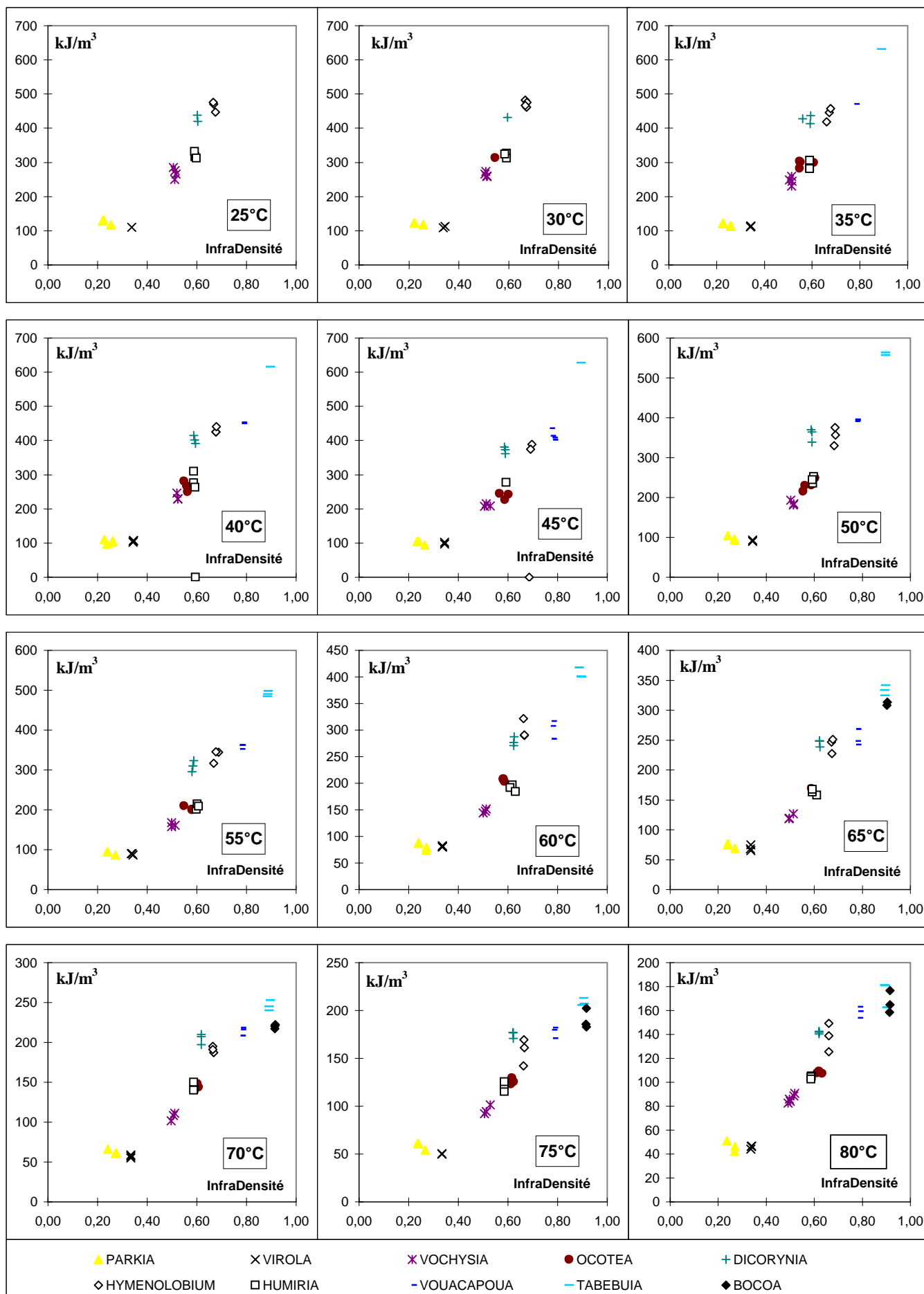
Evolution de la de la pente du plateau de flambement F (en MPa) de la courbe *decompression* radiale en fonction de l'infradensité des trois espèces concernées aux différentes températures d'essai.



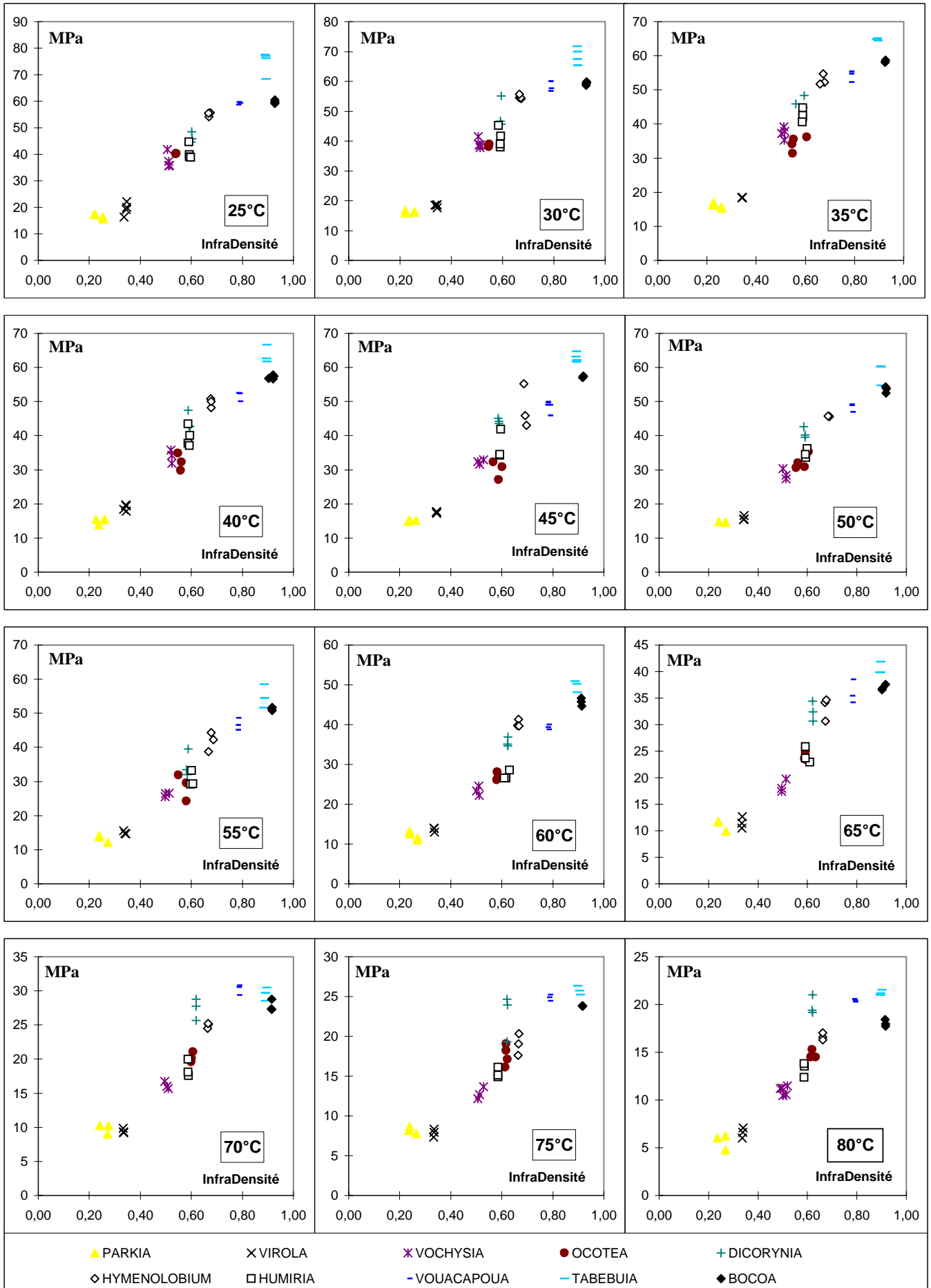
Evolution de l'énergie *decisaillement* pour un angle de cisaillement de 2.3° :W_{2,3°} (en kJ/m³) en fonction de l'infradensité des dix espèces aux différentes températures d'essai.



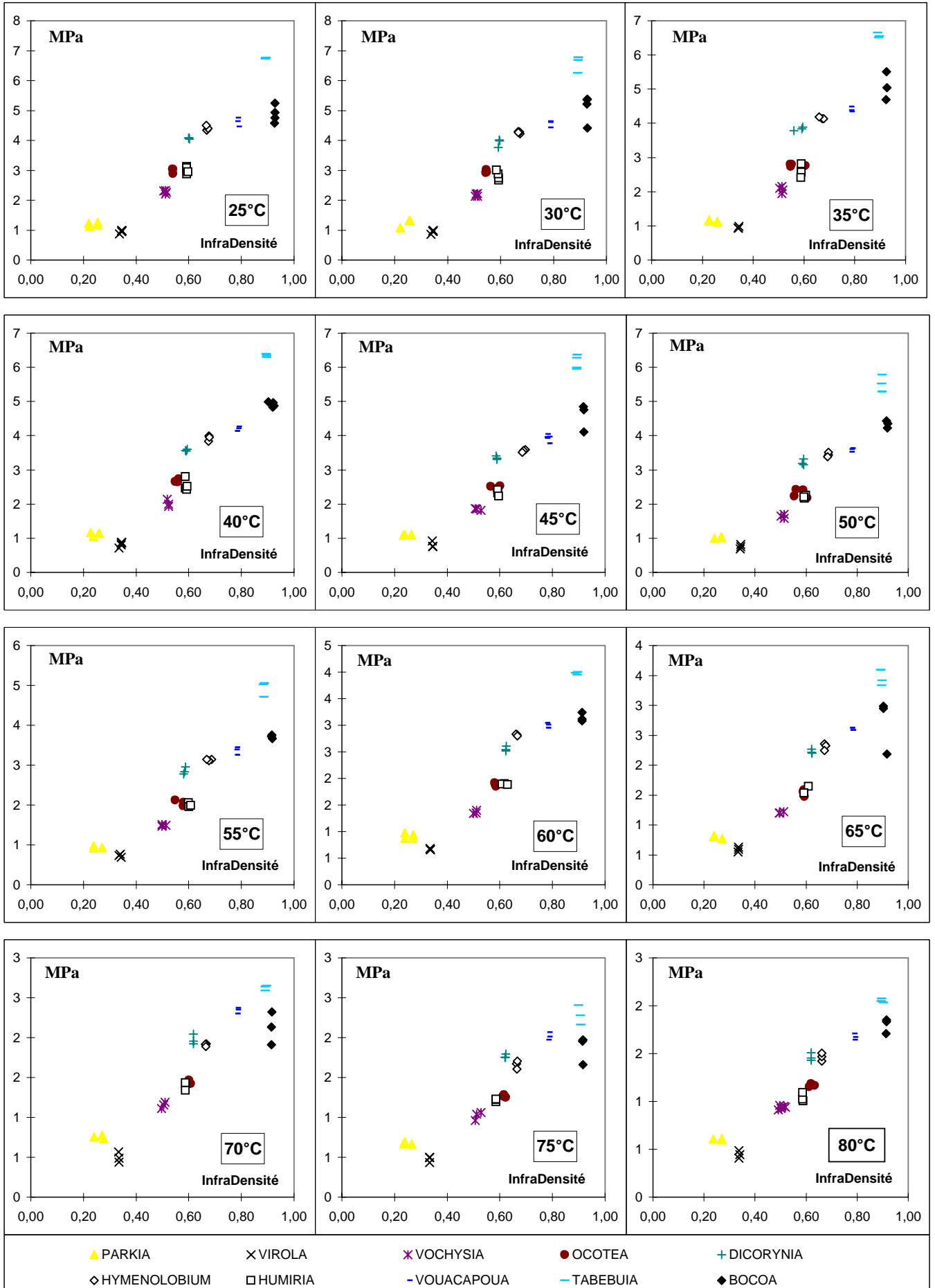
Evolution de l'énergie *decisaillement* pour un angle de cisaillement de 4.6° : $W_{4.6^\circ}$ (en kJ/m³) en fonction de l'infradensité des dix espèces aux différentes températures d'essai.



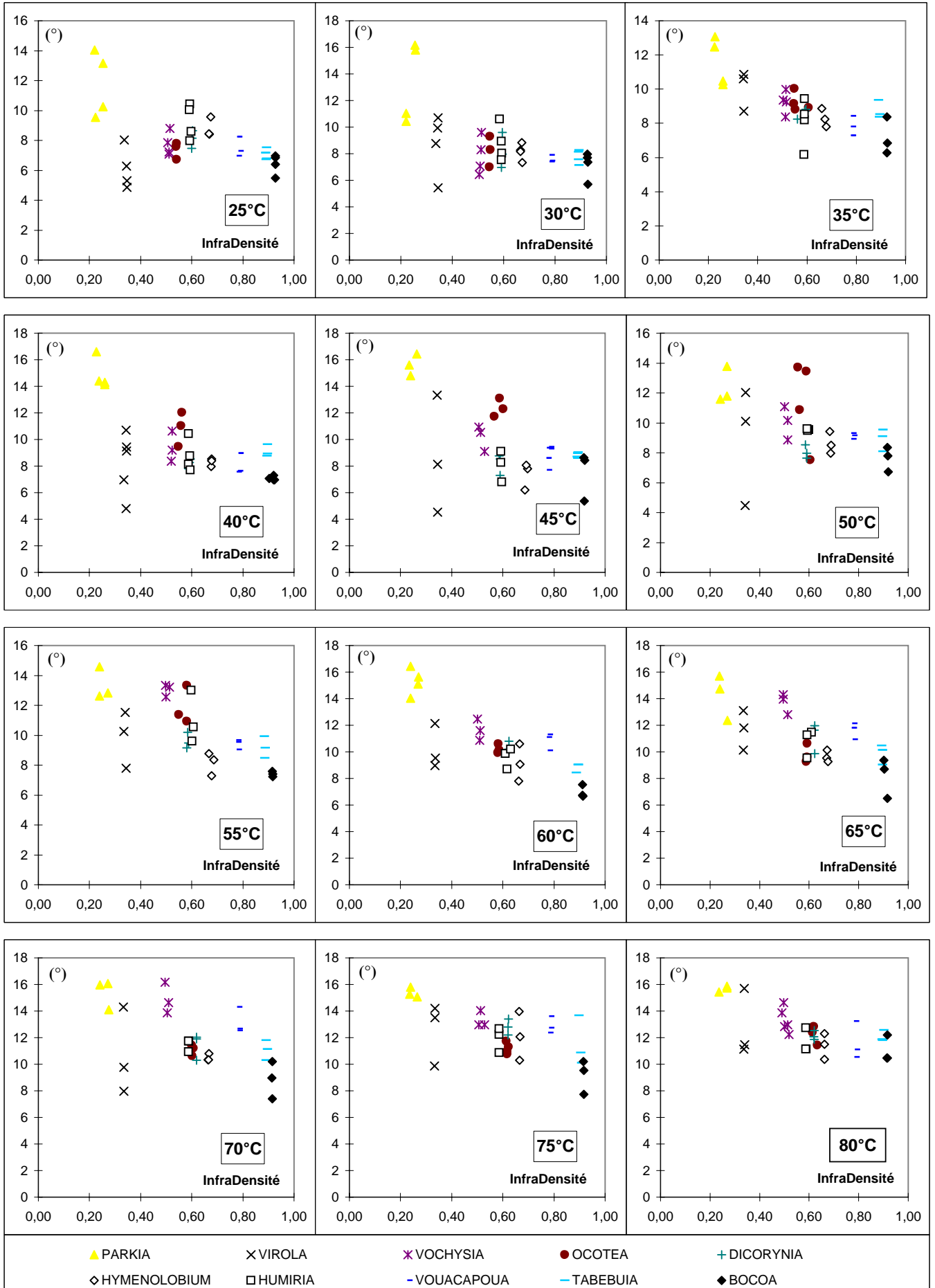
Evolution de l'énergie *decisaillement* pour un angle de cisaillement de 9.1° :W_{9,1°} (en kJ/m³) en fonction de l'infradensité des dix espèces aux différentes températures d'essai (valeur prise en compte si la rupture n'a pas eu lieu).



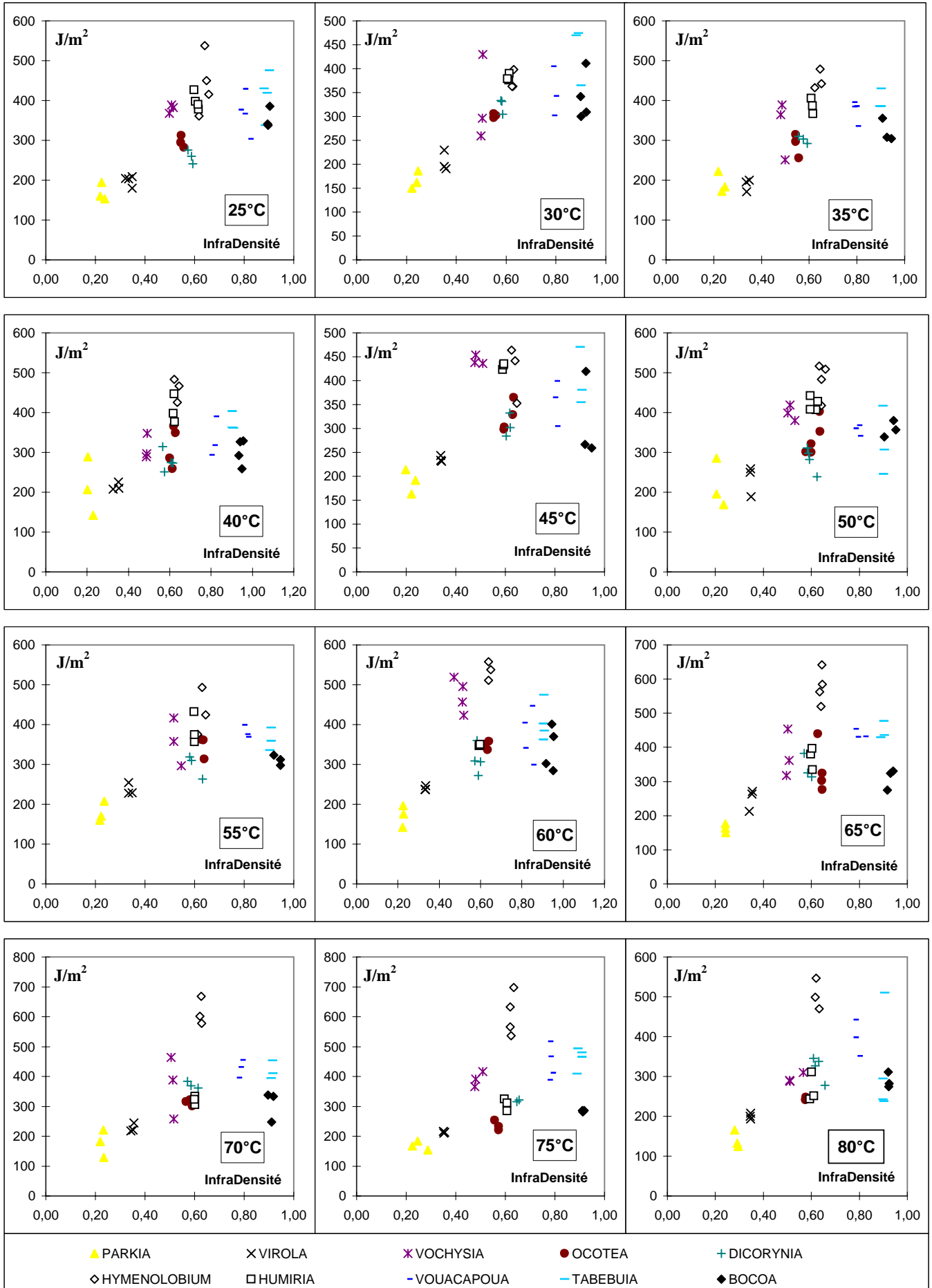
Evolution du module équivalent G_{re} (en MPa) de la courbe *decisaillement* RT en fonction de l'infradensité des dix essences aux différentes températures d'essai.



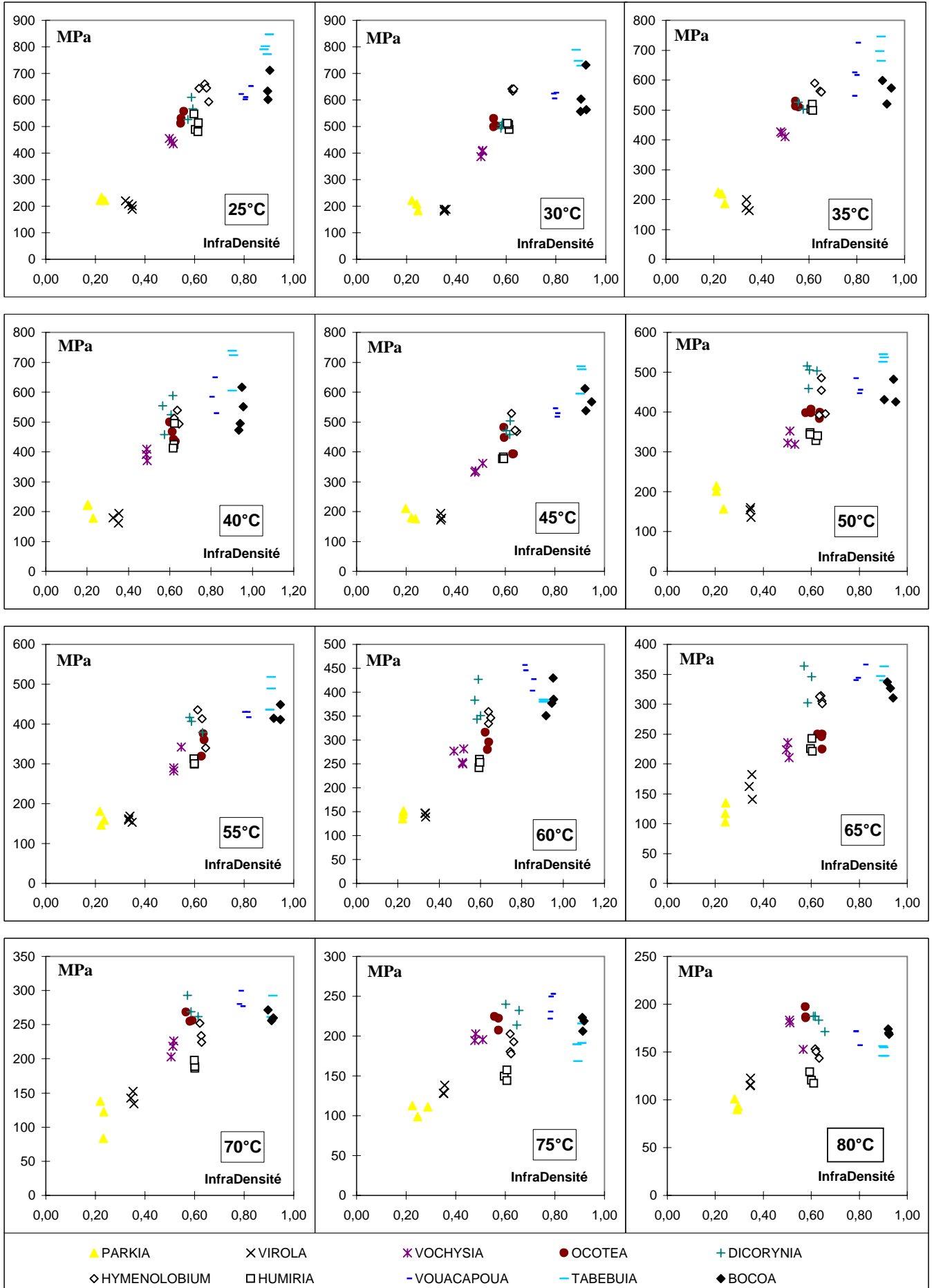
Evolution de la contrainte à la rupture τ_r (en MPa) de la courbe *decisaillement* RT en fonction de l'infradensité des dix essences aux différentes températures d'essai



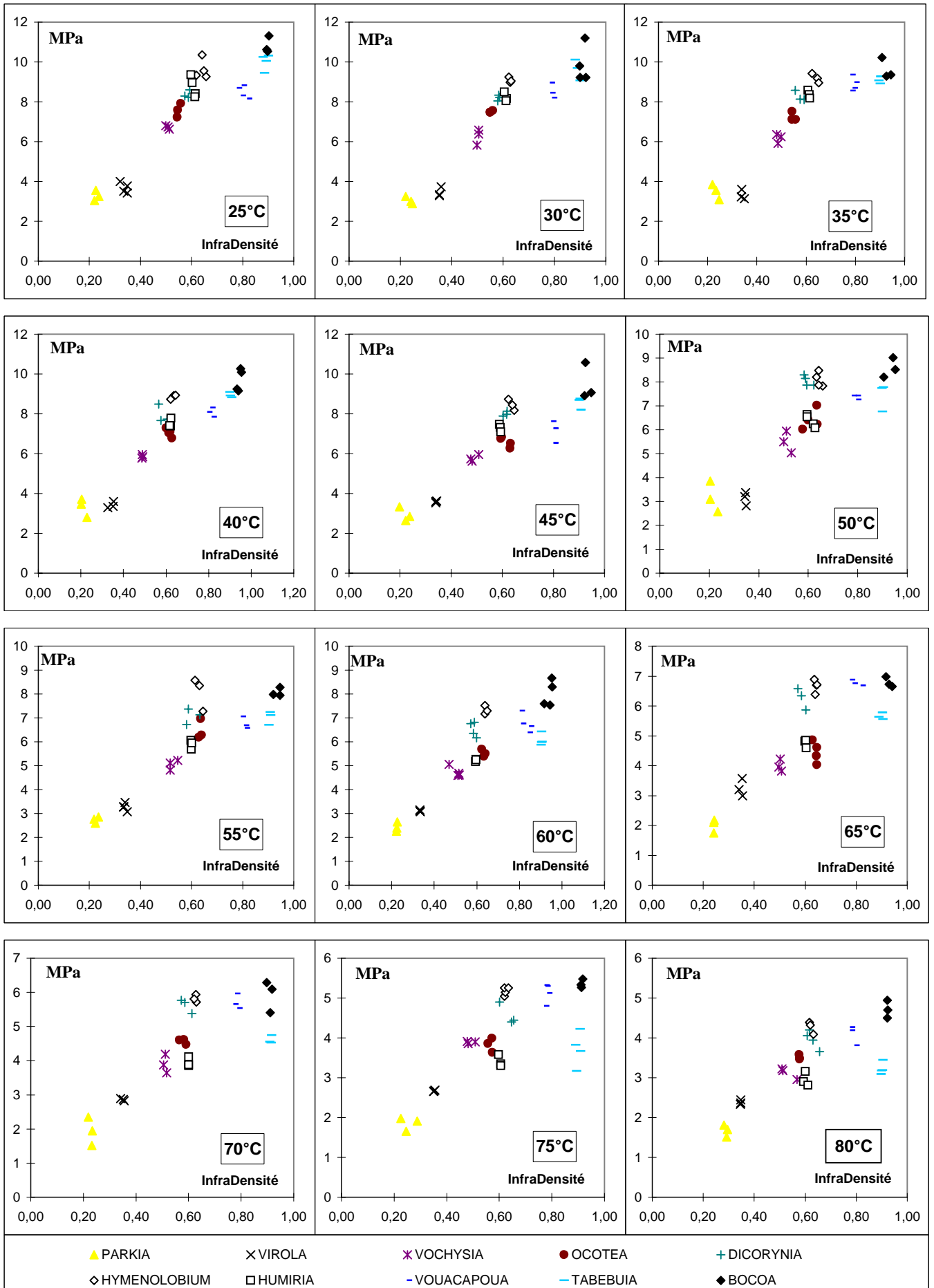
Evolution de l'angle de cisaillement à la rupture γ_r (en°) de la courbe *decisaillement* RT en fonction de l'infradensité des dix essences aux différentes températures d'essai



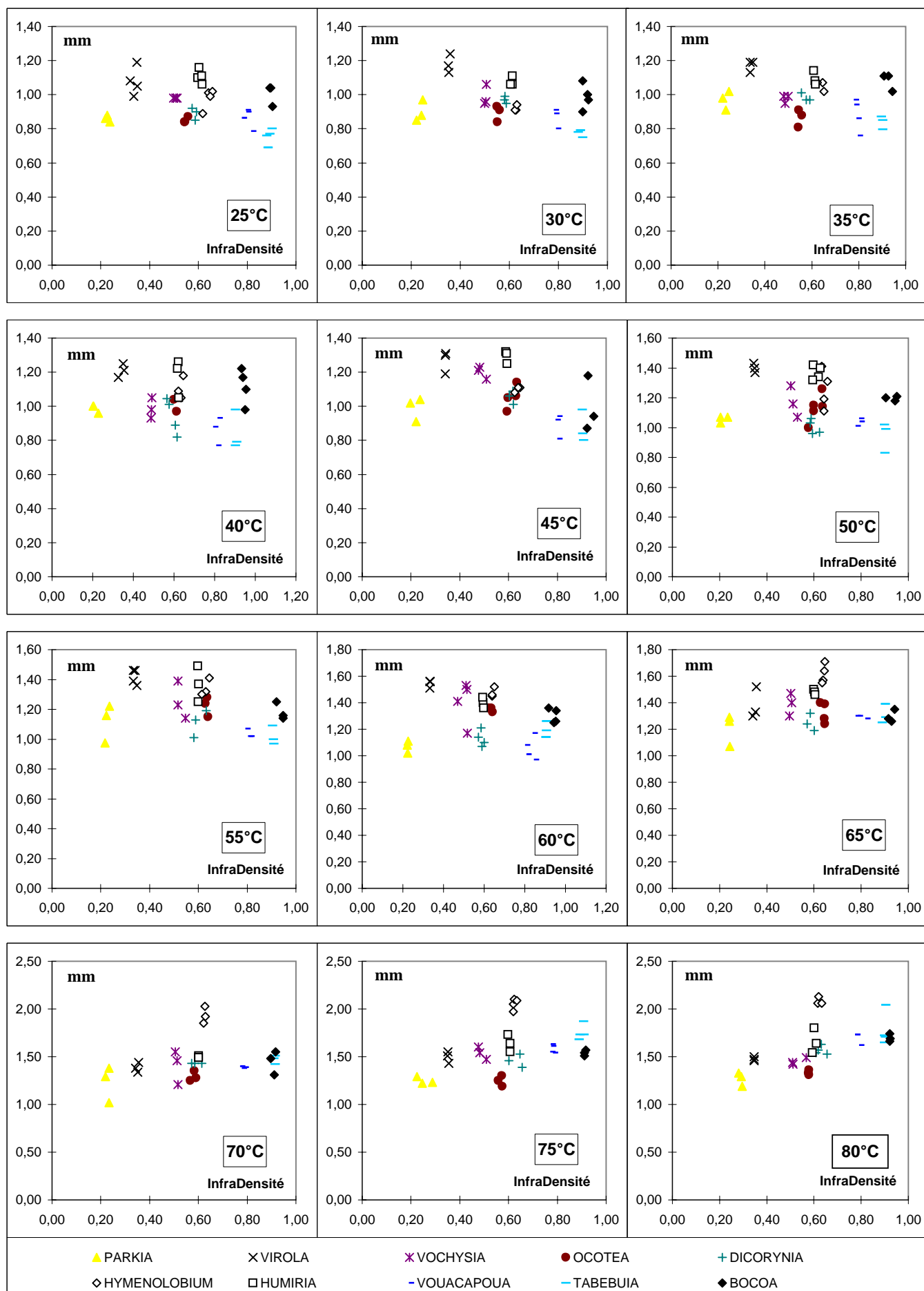
Evolution de l'énergie de rupture : $G_{f,I}$ (en J/m^2) de la courbe de *ténacité* en fonction de l'infradensité des dix essences aux différentes températures d'essai.



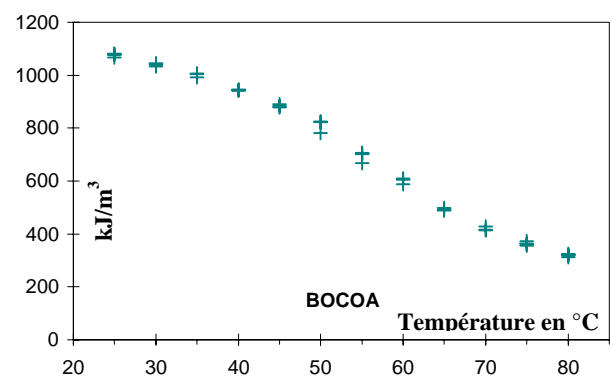
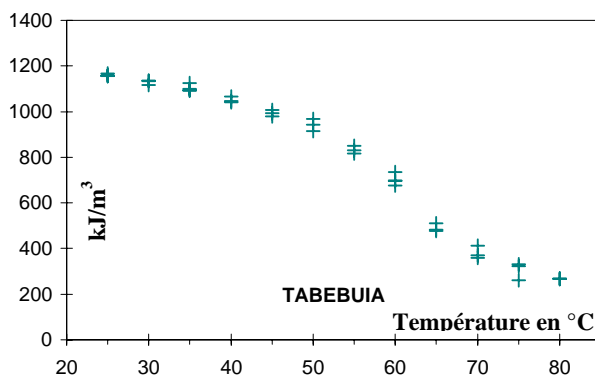
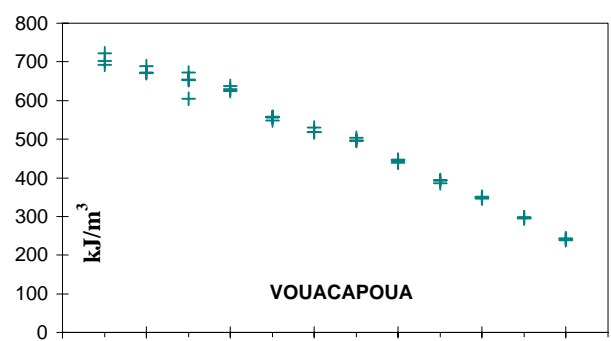
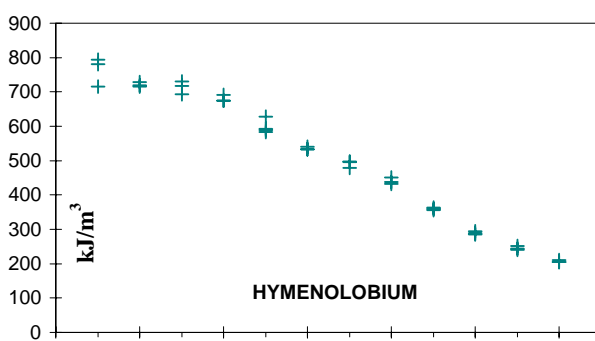
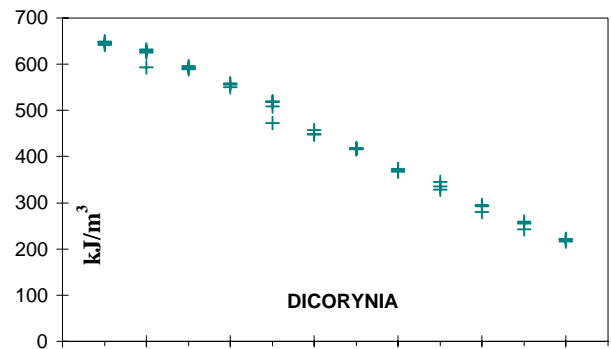
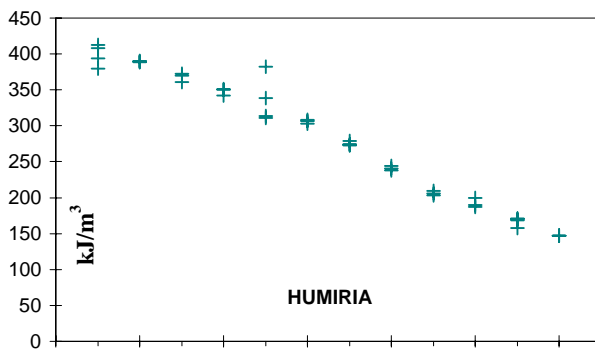
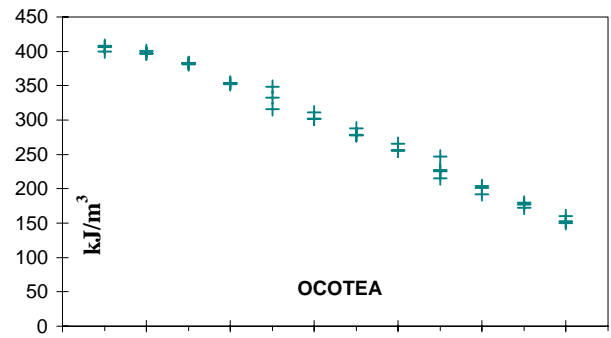
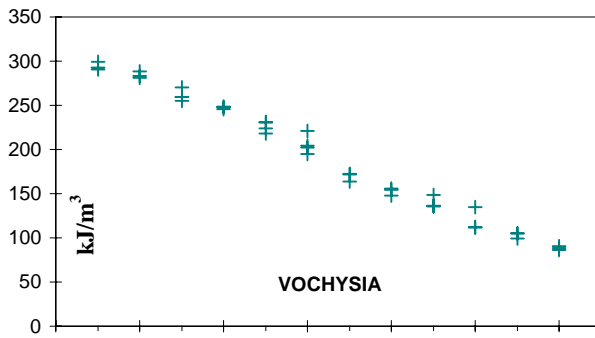
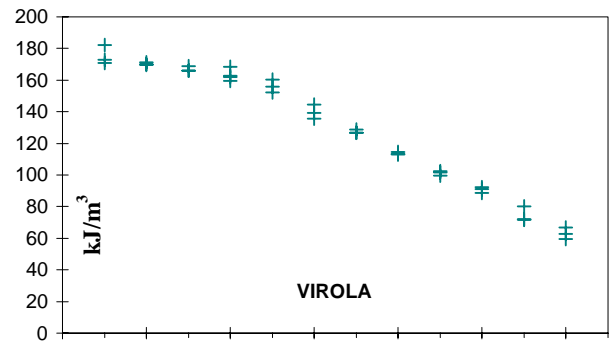
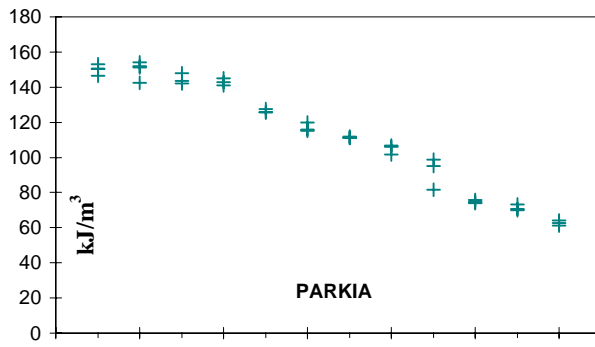
Evolution du module équivalente $P_{E,I}$ (en MPa) de la courbe de *détencité* en fonction de l'infradensité des dix essences aux différentes températures d'essai.



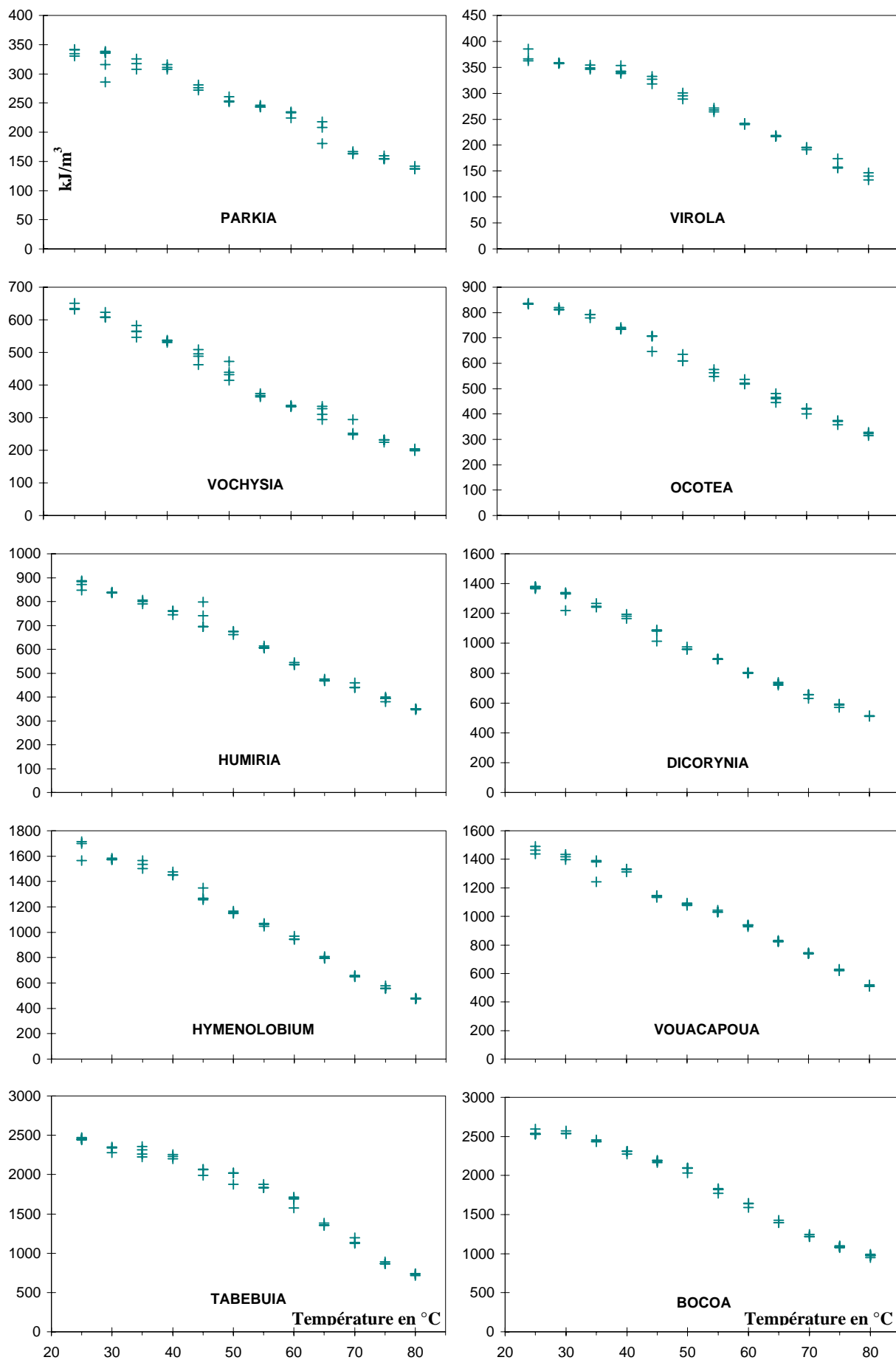
Evolution de la contrainte à la rupture : $\sigma_{r,I}$ (en MPa) de la courbe de *ténacité* en fonction de l'infradensité des dix essences aux différentes températures d'essai



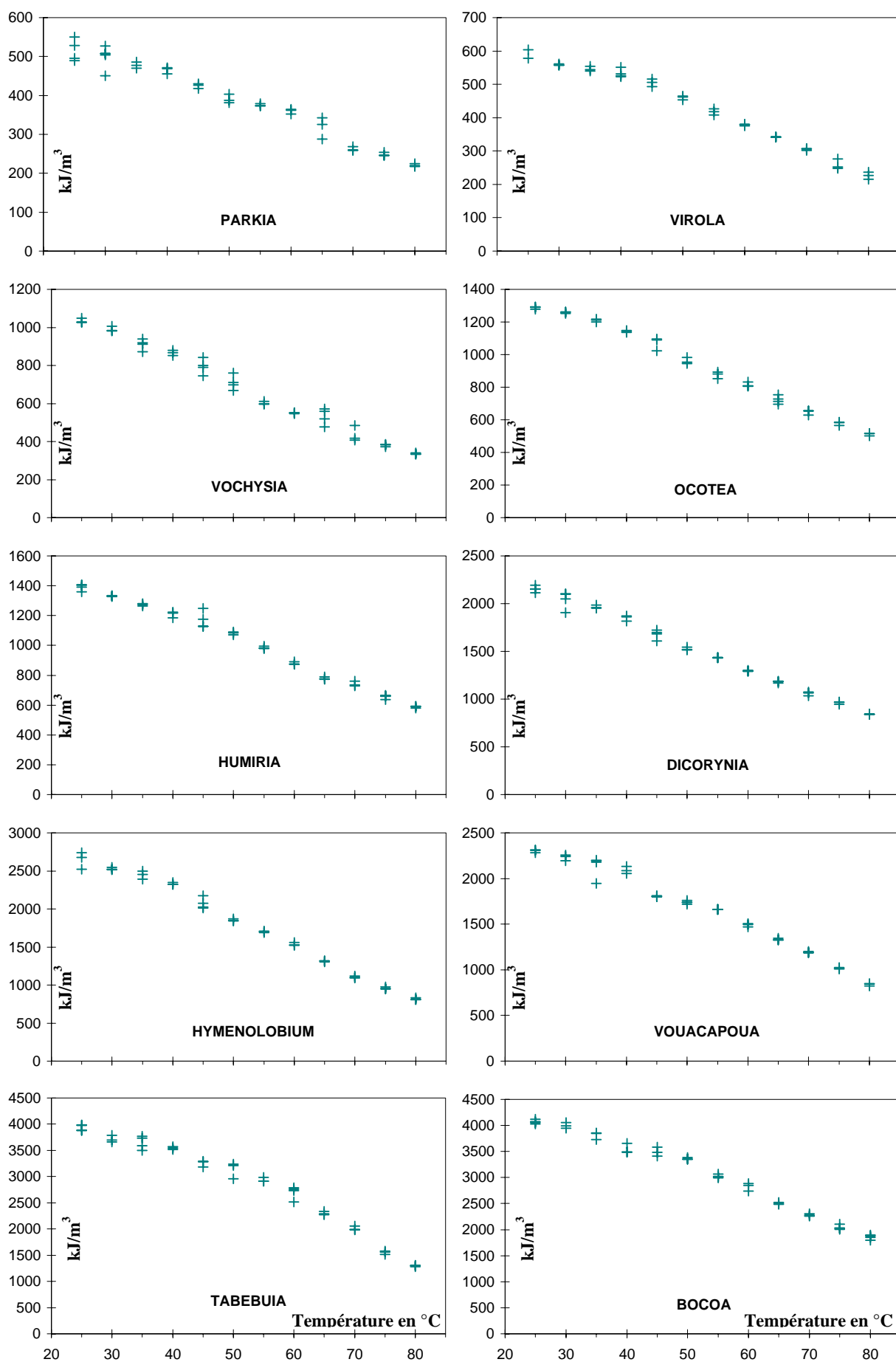
Evolution de la flèche à la rupture $f_{r,I}$ (en mm) de la courbe *déténacité* en fonction de l'infradensité des dix essences aux différentes températures d'essai.



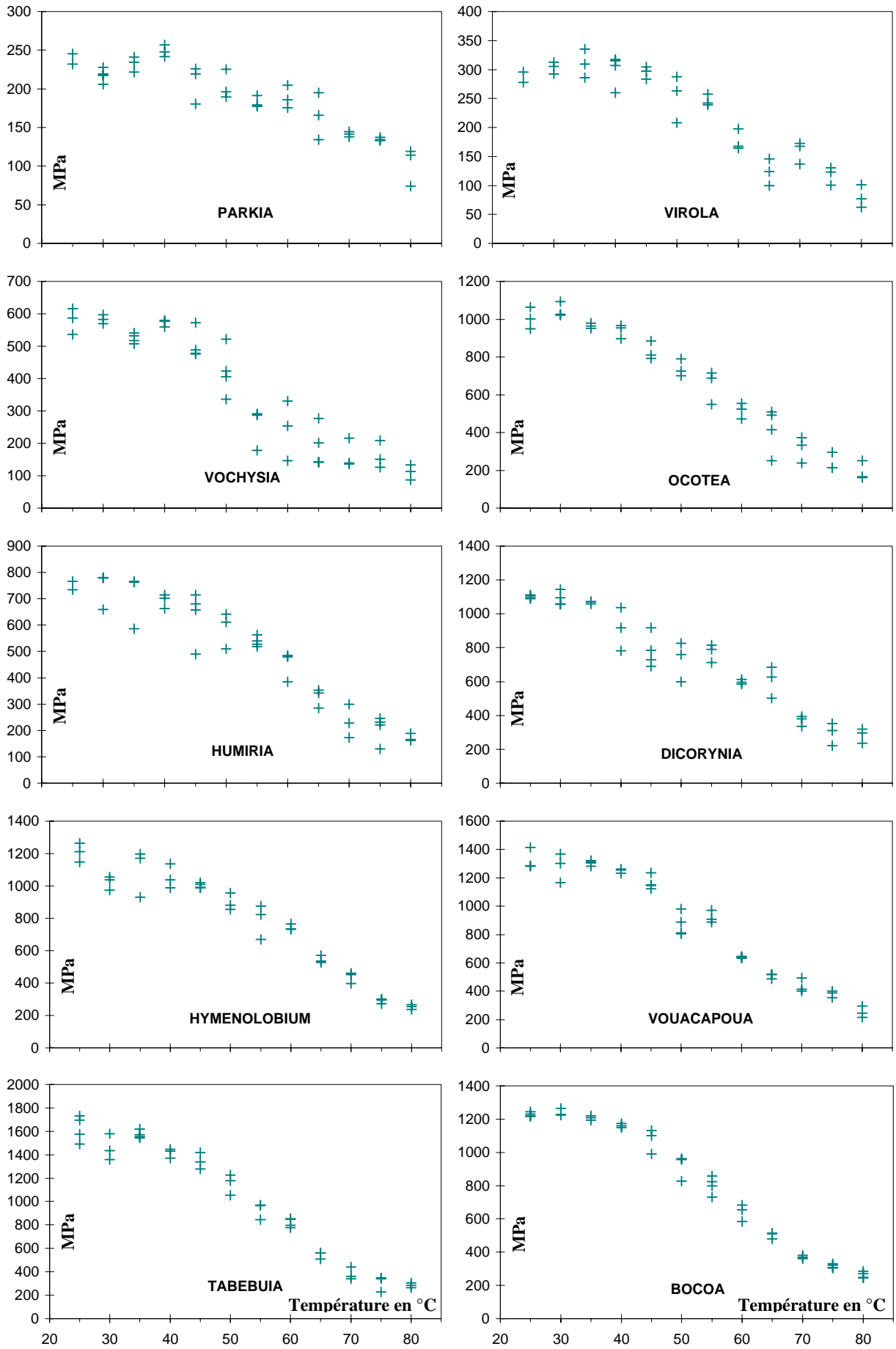
Evolution de l'énergie de compression à 6.67 % de déformation $W_{6.67\%}$ (en kJ/m^3) de la courbe de *compression* radiale en fonction de la température pour chacune des dix espèces.



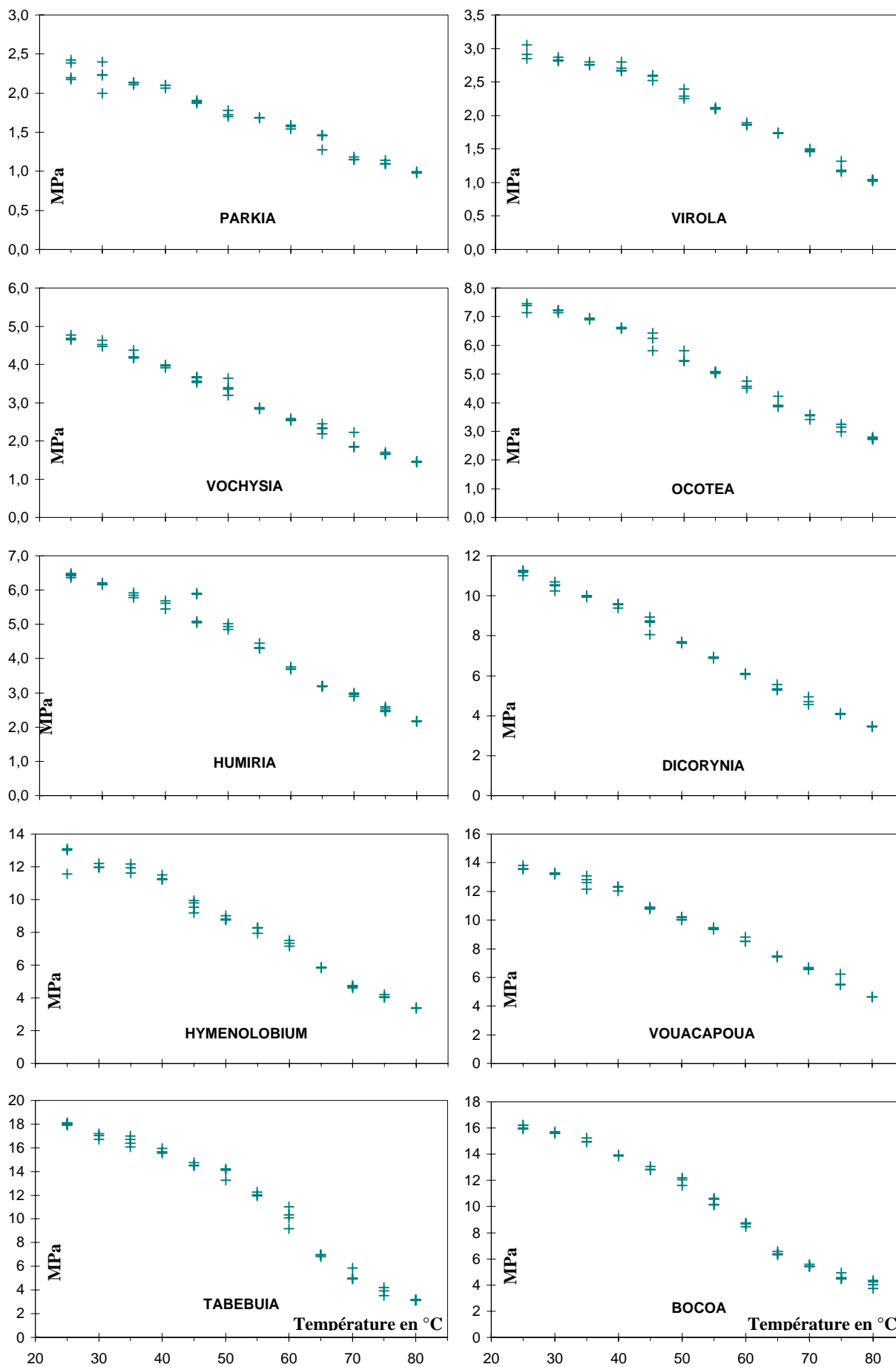
Evolution de l'énergie de compression à 13.3 % de déformation $W_{13.3\%}$ (en kJ/m^3) de la courbe de *compression* radiale en fonction de la température pour chacune des dix espèces.



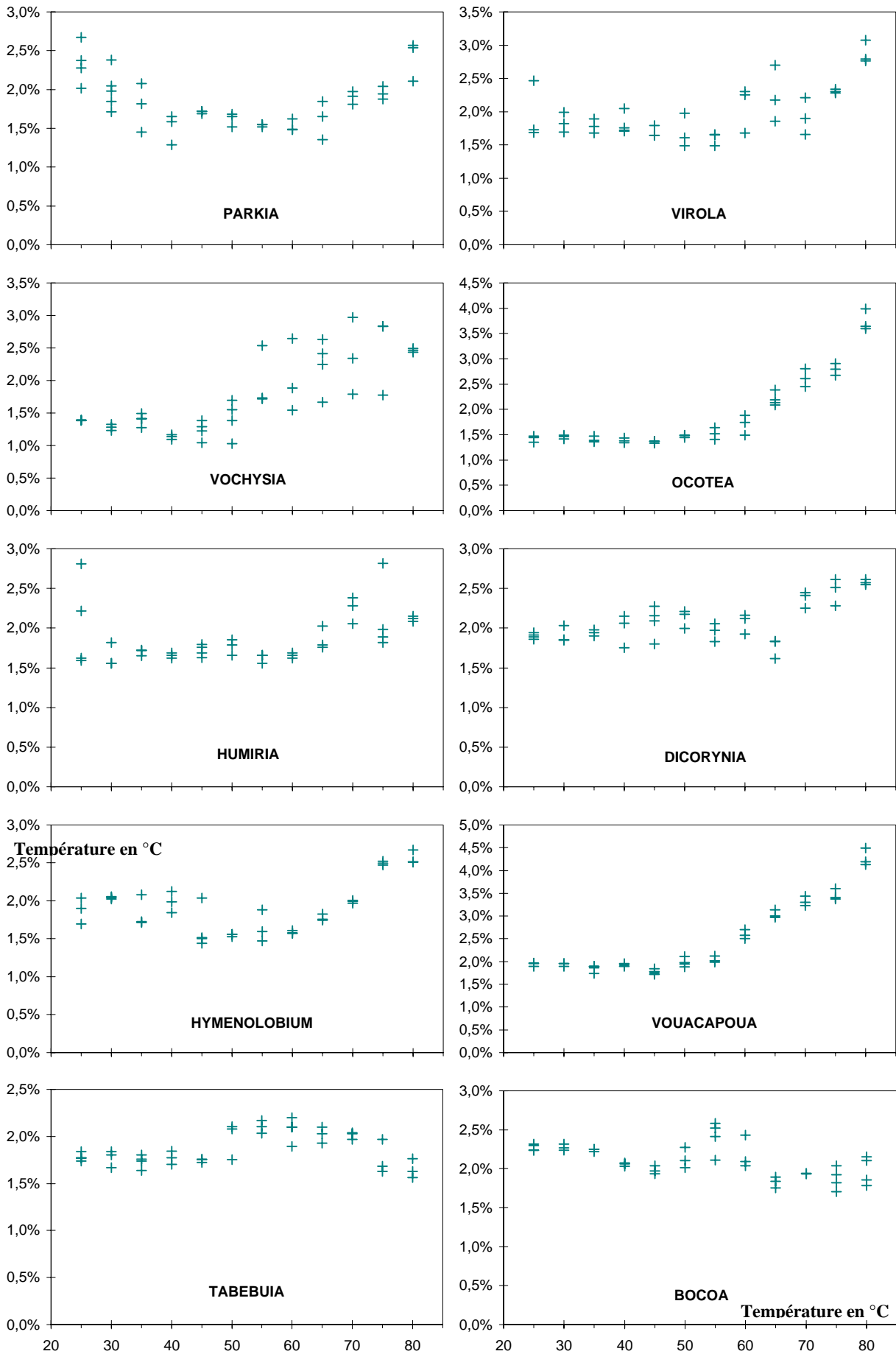
Evolution de l'énergie de compression à 6.67 % de déformation $W_{6.67\%}$ (en kJ/m^3) de la courbe de *compression* radiale en fonction de la température pour chacune des dix espèces.



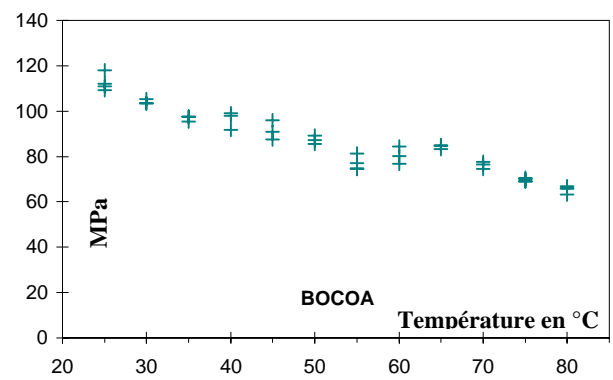
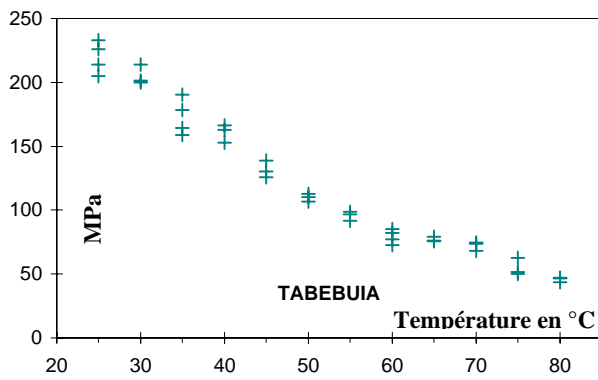
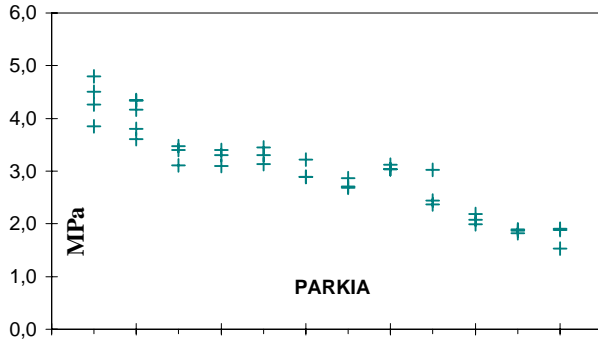
Evolution du module équivalent E_{re} (en MPa) de la courbe de *compression* radiale en fonction de la température pour chacune des dix espèces



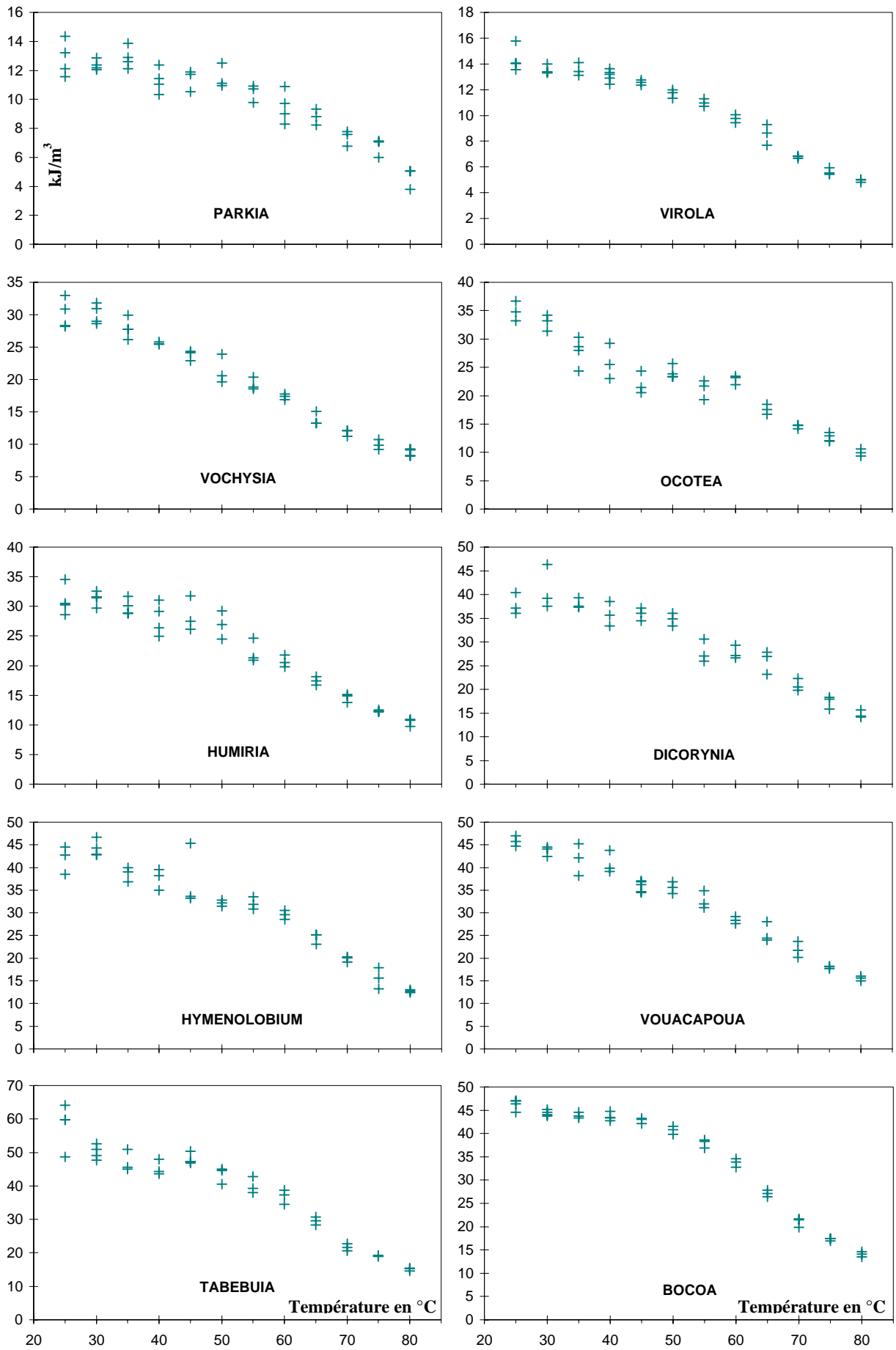
Evolution de la contrainte σ_y (en MPa) au premier coude de la courbe *decompression* radiale en fonction de la température pour chacune des dix espèces



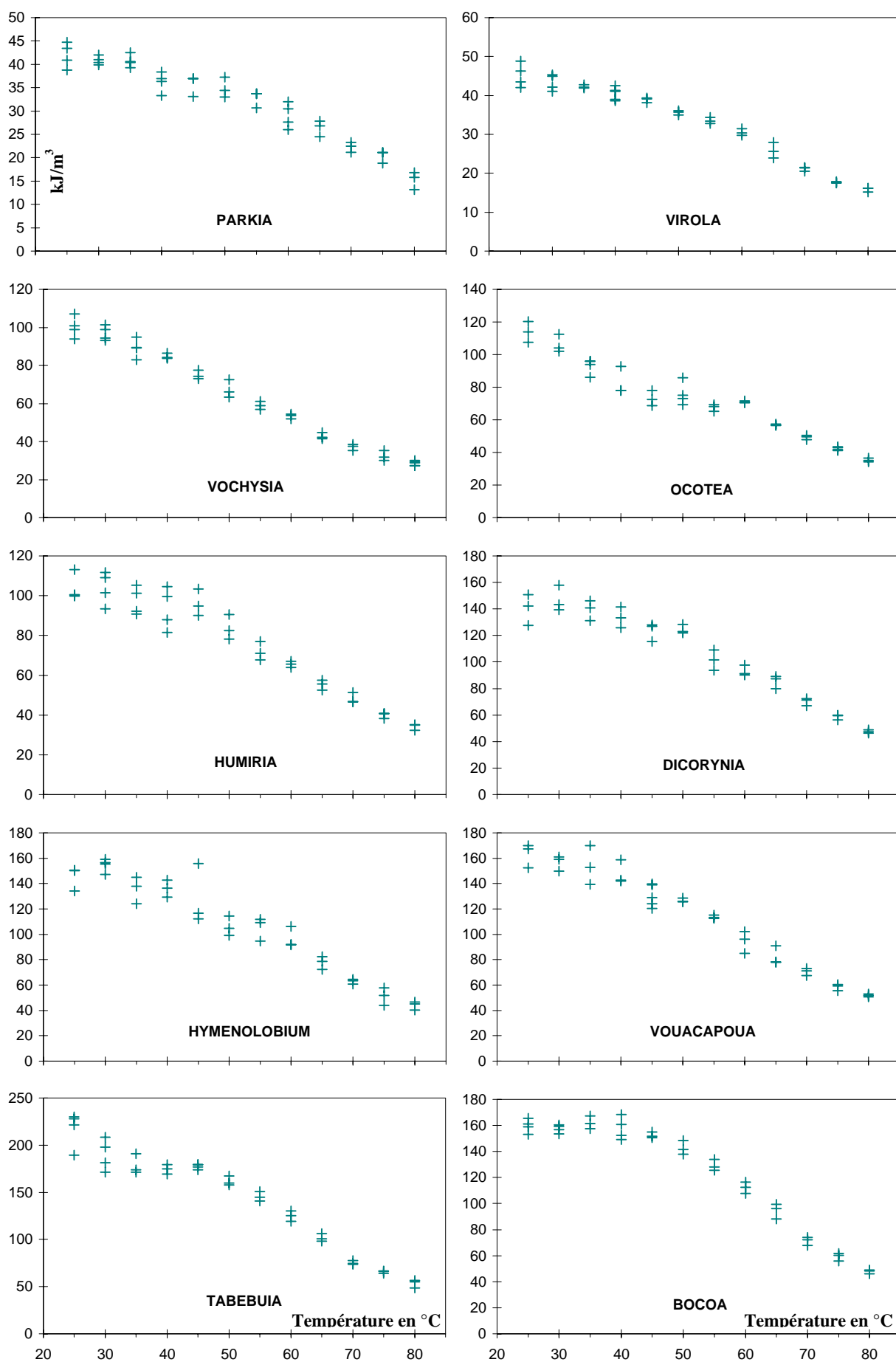
Evolution de la déformation ϵ_y (en %) au premier coude de la courbe *decompression* radiale en fonction de la température pour chacune des dix espèces



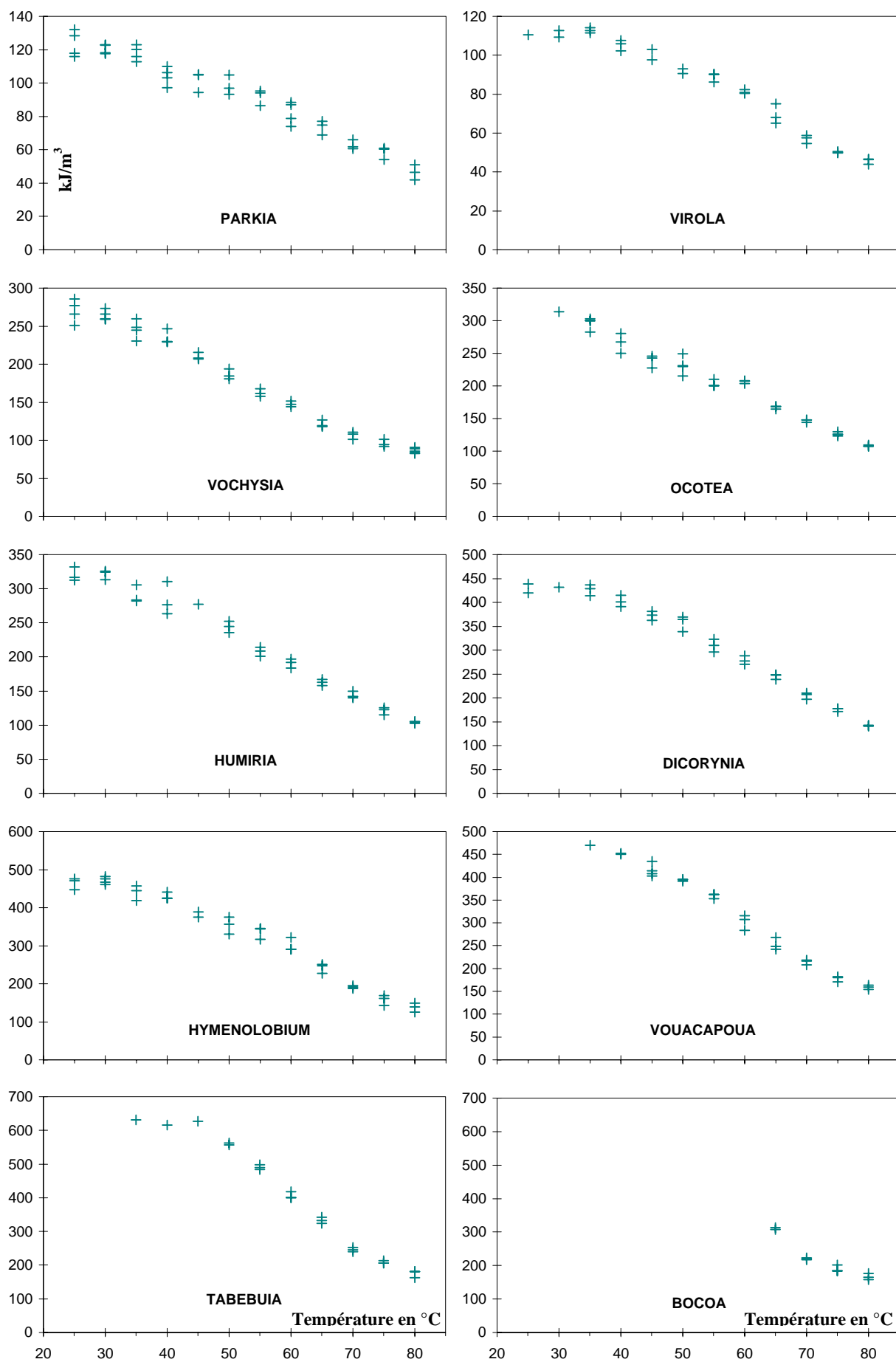
Evolution de la de la pente du plateau de flambement F (en MPa) de la courbe de *compression* radiale en fonction de la température pour les trois espèces concernées:



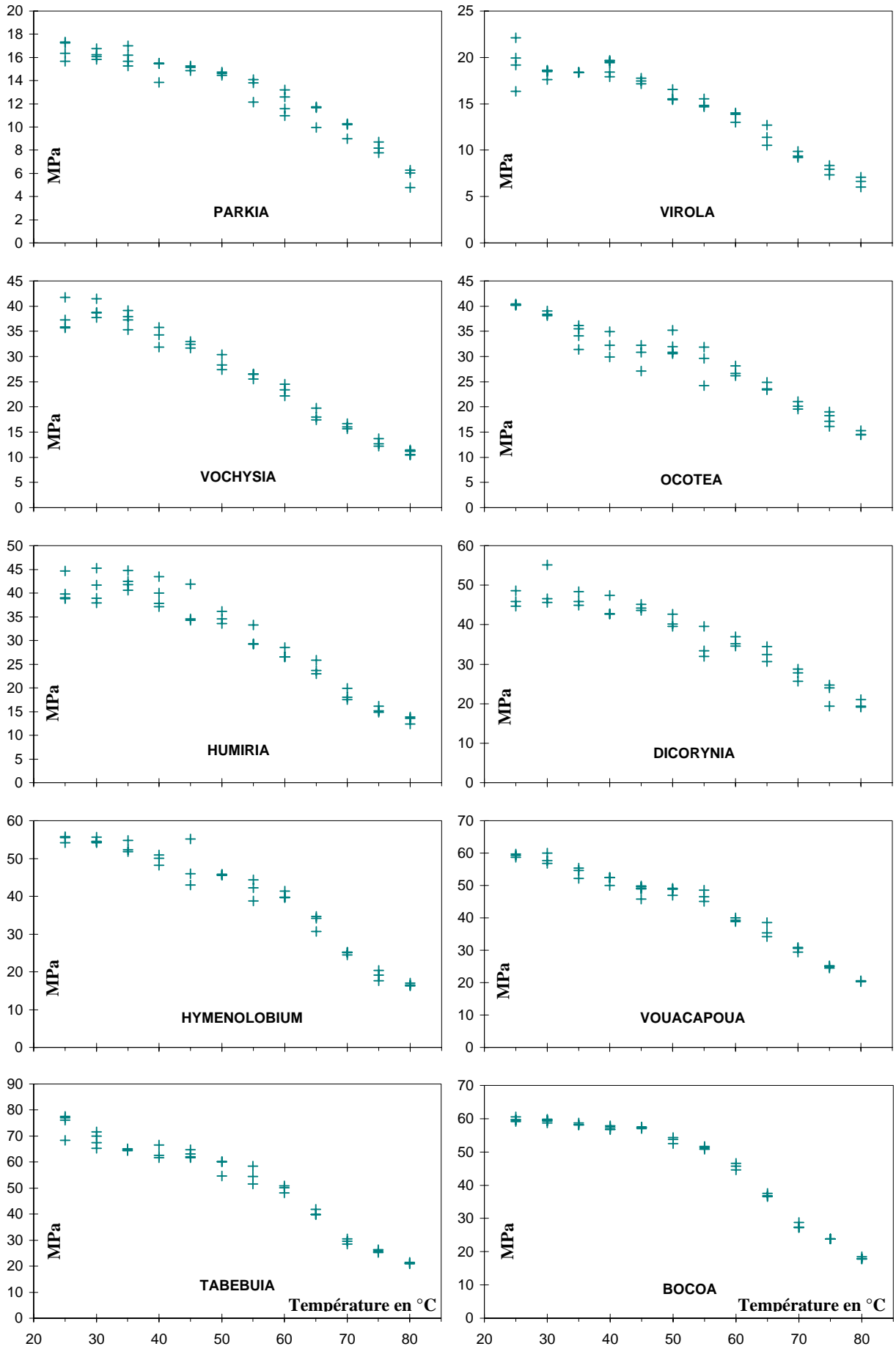
Evolution de l'énergie *decouplage* pour un angle de cisaillement de 2.3° : $W_{2.3^\circ}$ (en kJ/m^3) en fonction de la température pour chacune des dix espèces.



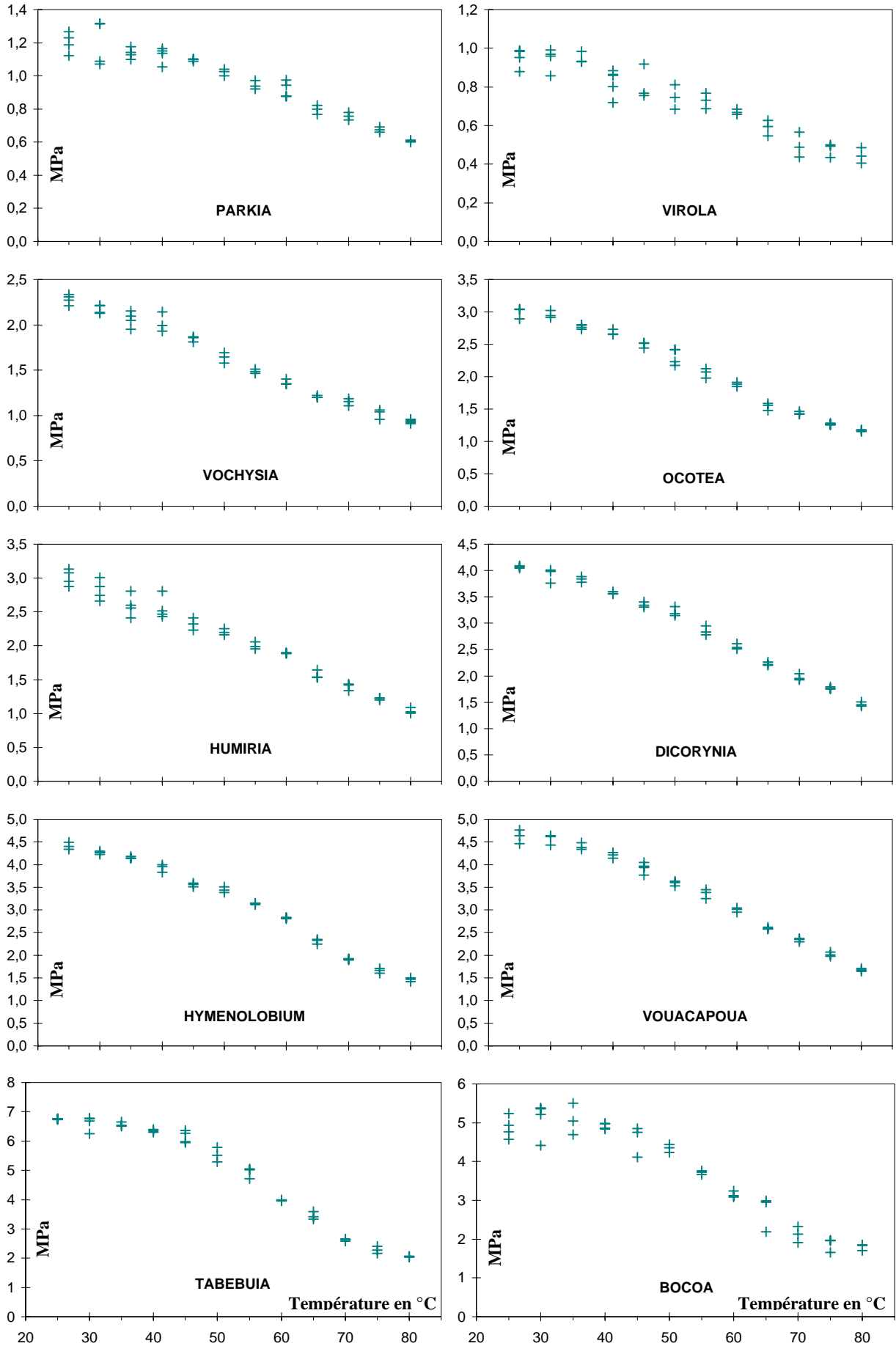
Evolution de l'énergie *decisaillement* pour un angle de cisaillement de 2.3° :W_{2.3°} (en kJ/m³) en fonction de la température pour chacune des dix espèces.



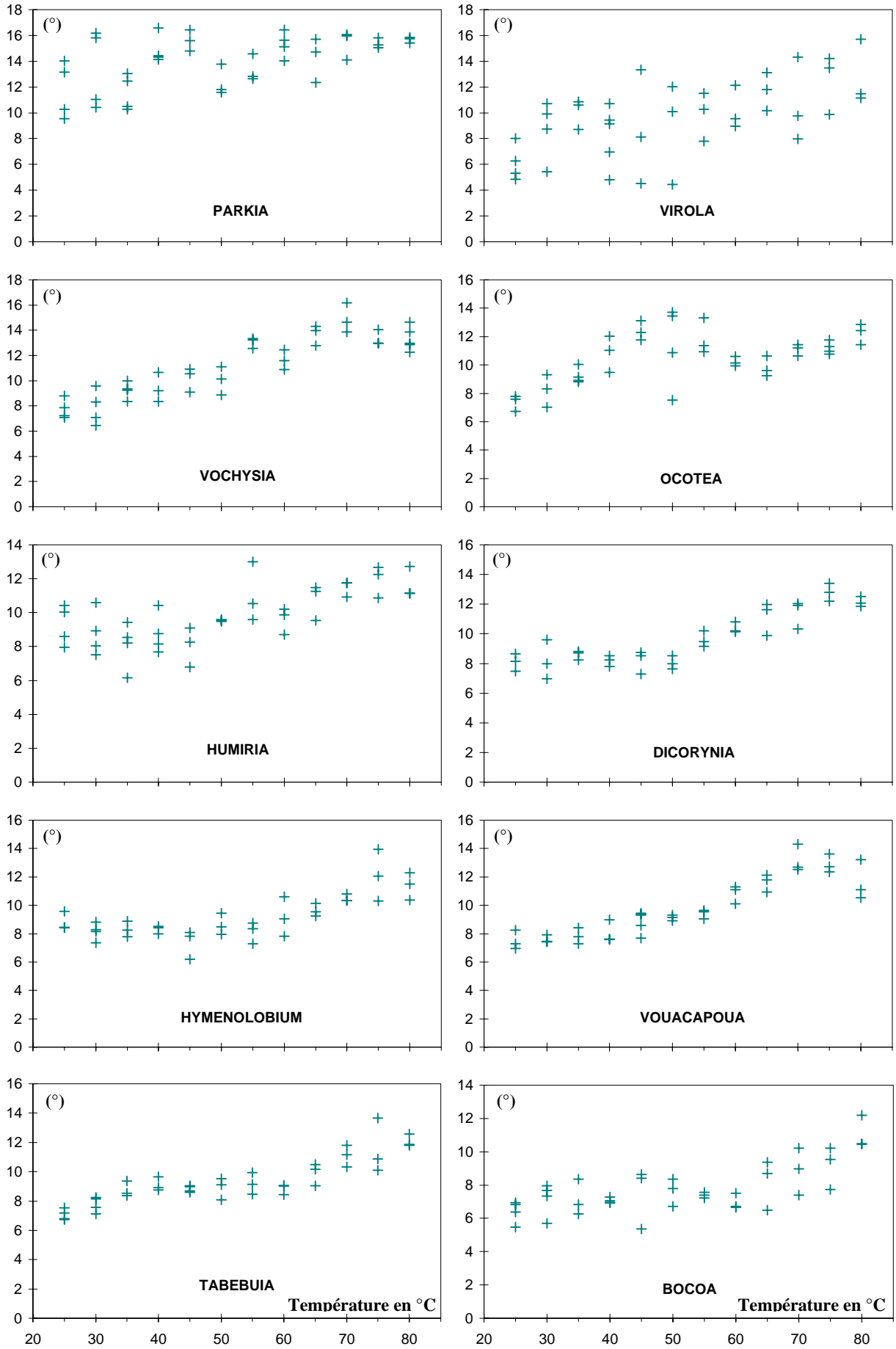
Evolution de l'énergie *decisaillement* pour un angle de cisaillement de 9.1 :W_{9.1°} (en kJ/m³) en fonction de la température pour chacune des dix espèces (valeur prise en compte si la rupture n'a pas eu lieu).



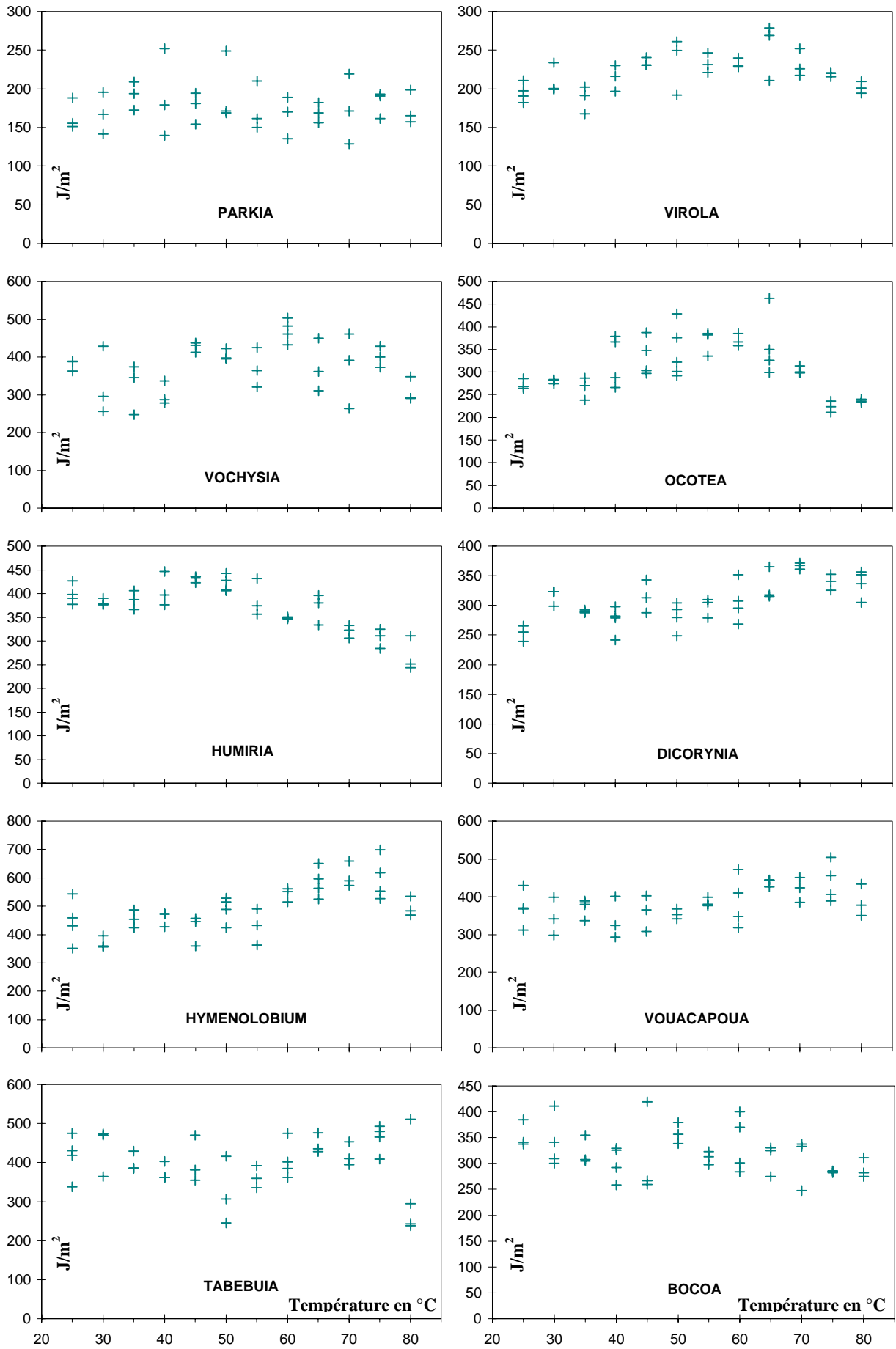
Evolution du module équivalent G_{re} (en MPa) de la courbe de cisaillement RT en fonction de la température pour chacune des dix espèces



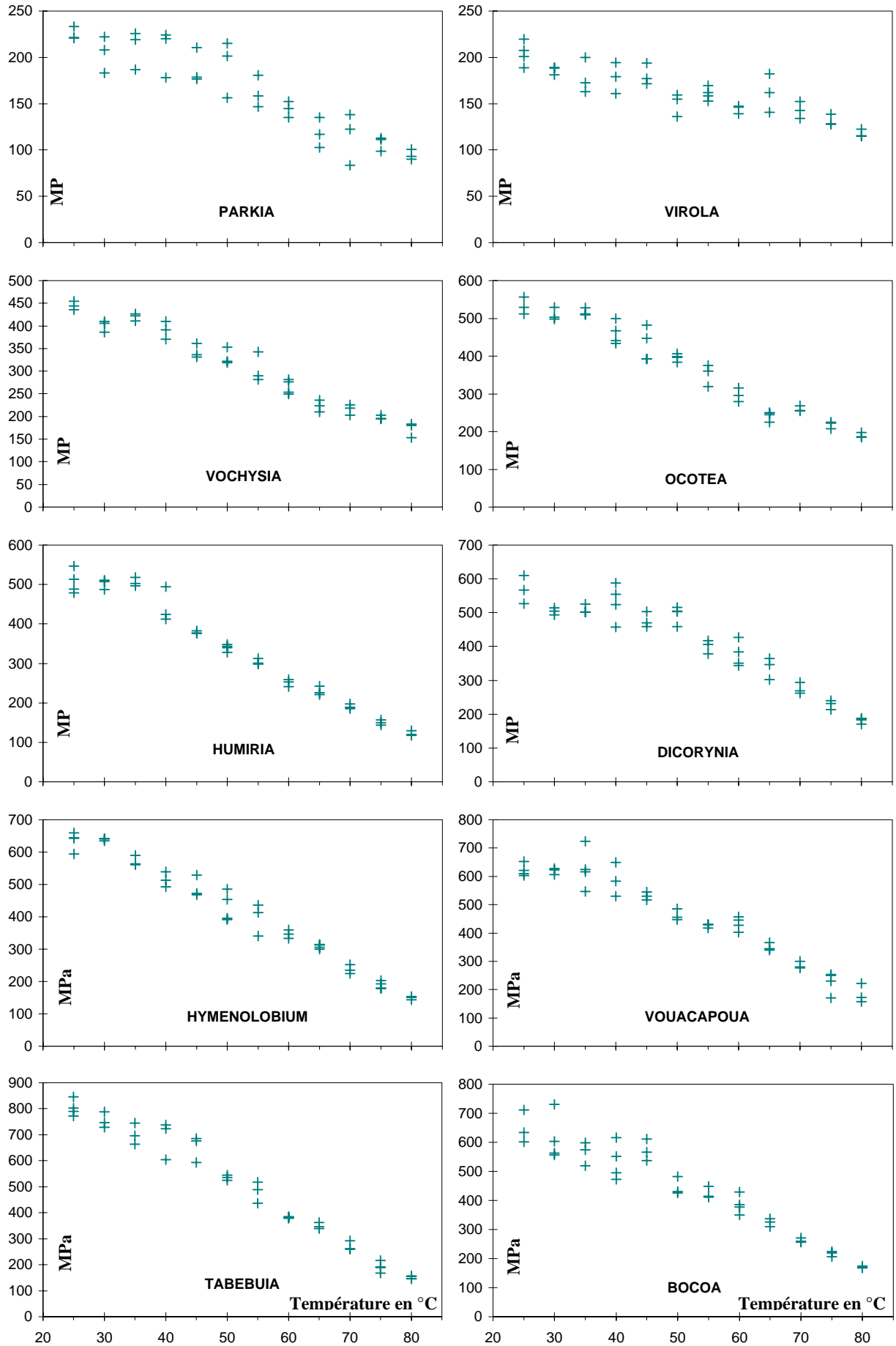
Evolution de la contrainte à la rupture : τ_r (en MPa) de la courbe de *cisaillement* RT en fonction de la température pour chacune des dix espèces



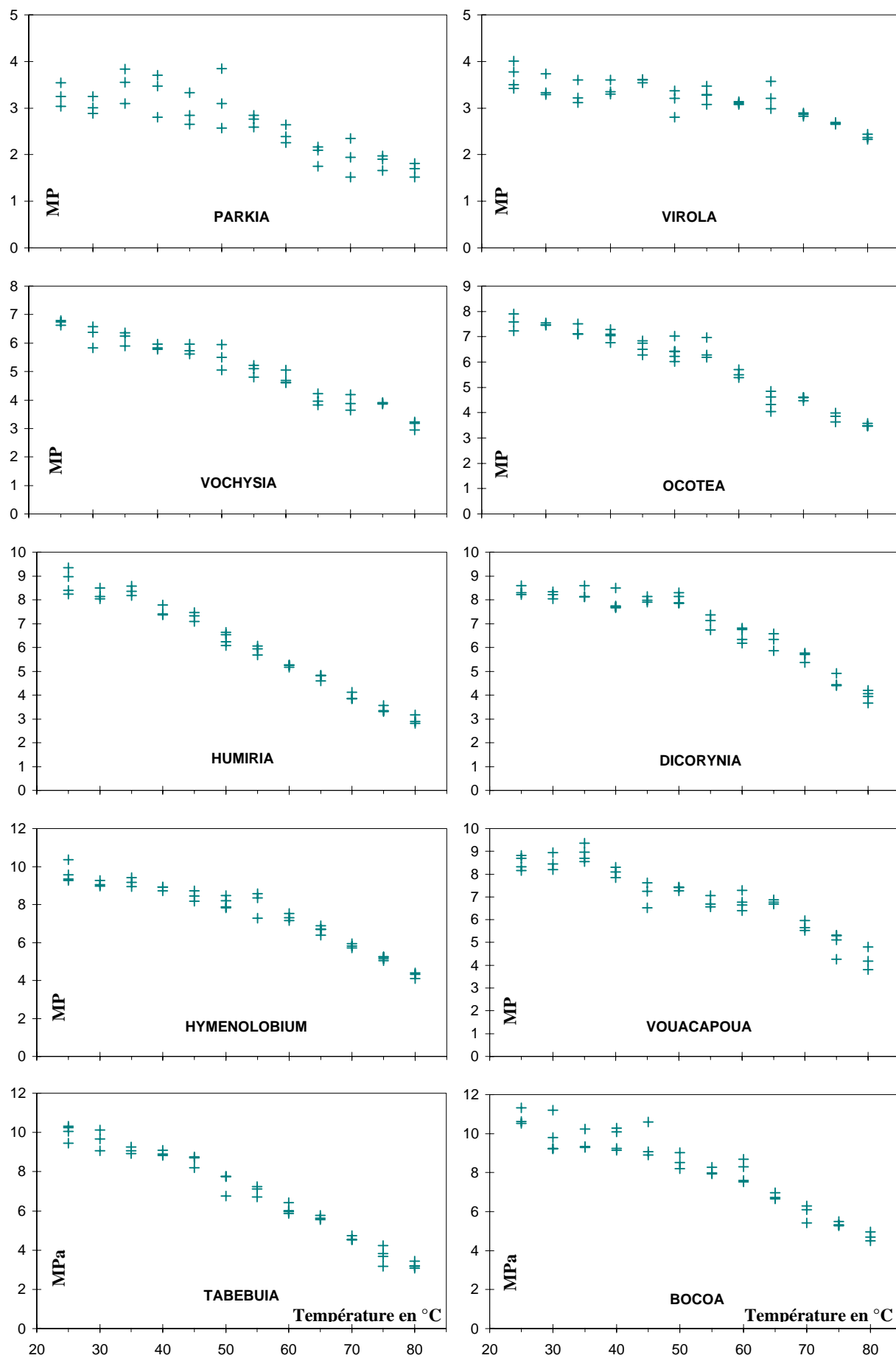
Evolution de l'angle de cisaillement à la rupture γ_r (en °) de la courbe de *cisaillement* RT en fonction de la température pour chacune des dix espèces



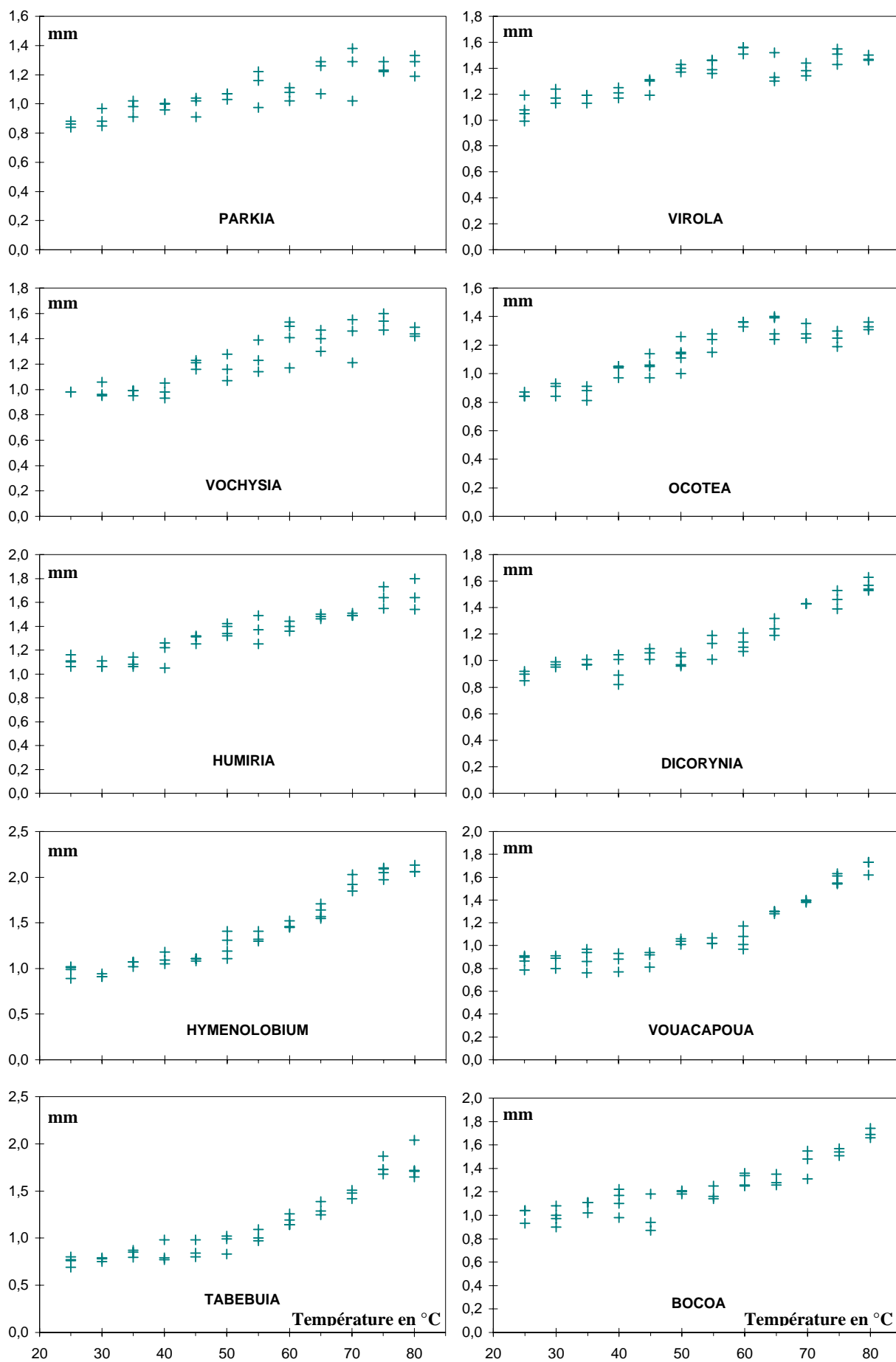
Evolution de l'énergie de rupture :G_{f,I} (en J/m²) de la courbe de *ténacité* en fonction de la température pour chacune des dix espèces.



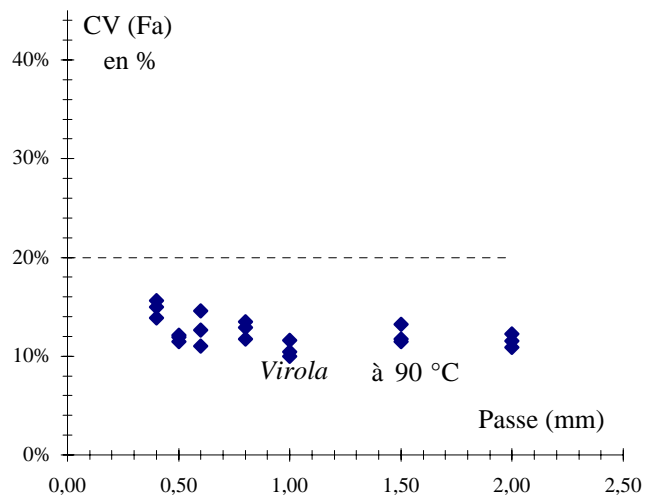
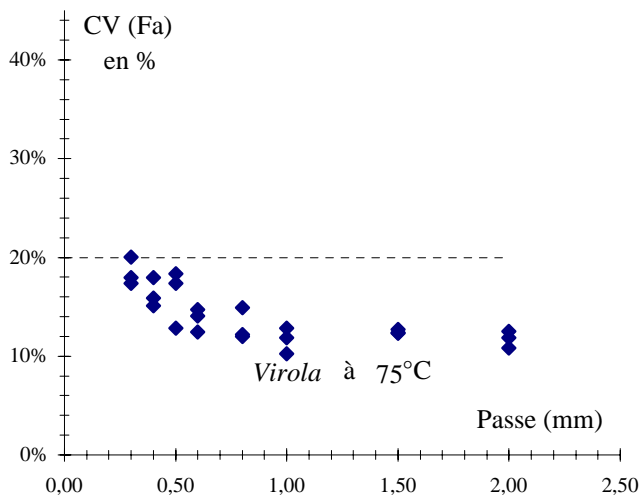
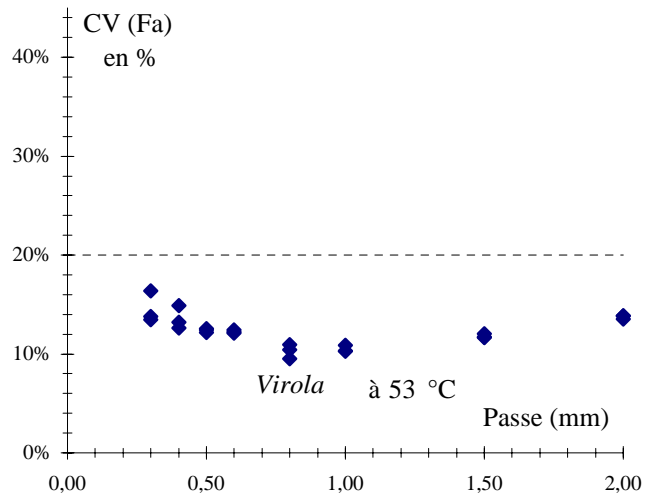
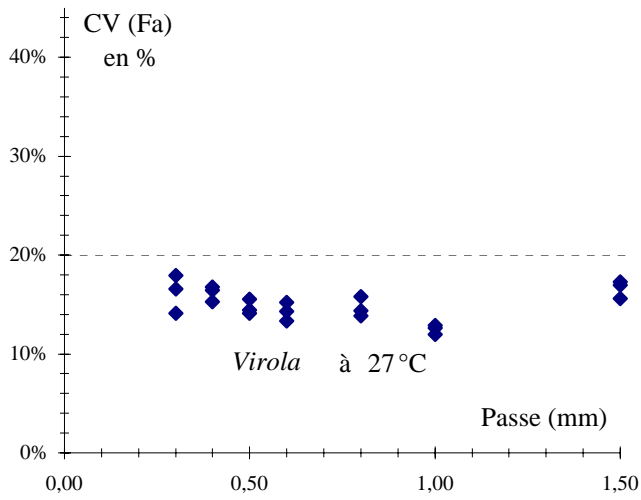
Evolution du module équivalente $P_{f,I}$ (en MPa) de la courbe de *ténacité* en fonction de la température pour chacune des dix espèces



Evolution de la contrainte à la rupture : $\sigma_{r,I}$ (en MPa) de la courbe de *ténacité* en fonction de la température pour chacune des dix espèces

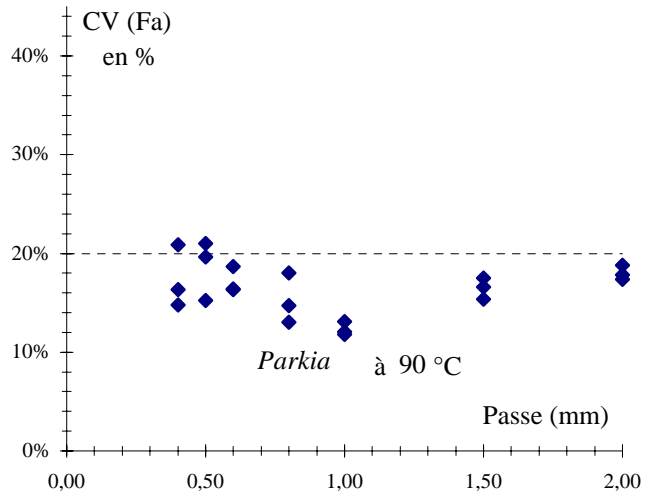
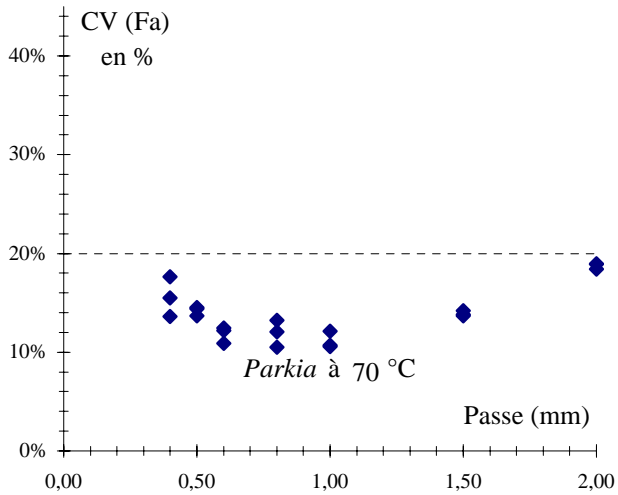
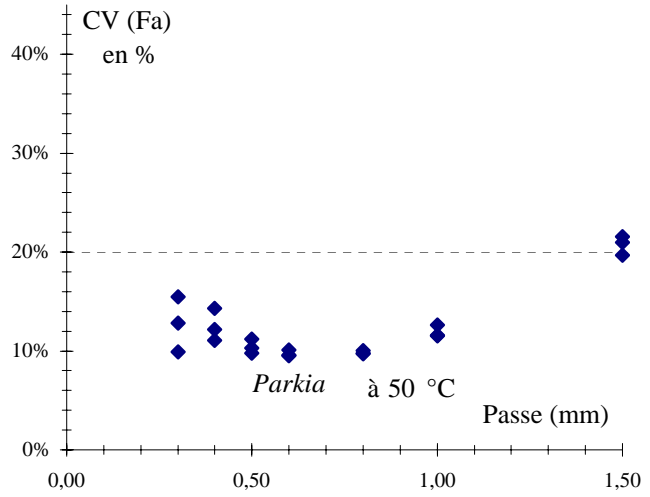
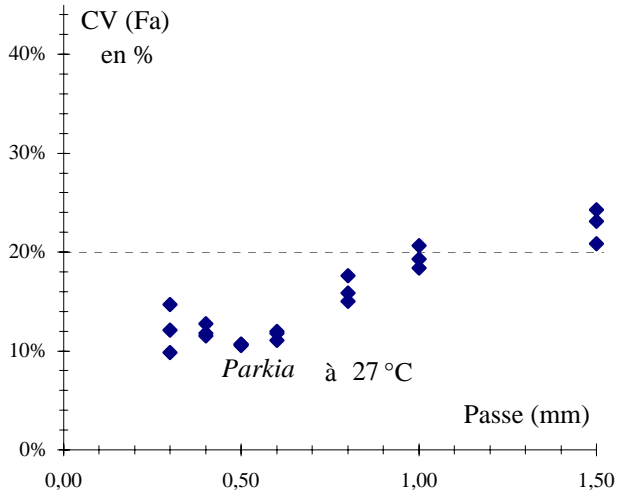


Evolution de la flèche à la rupture : $f_{r,I}$ (en mm) de la courbe *deténacité* en fonction de la température pour chacune des dix espèces

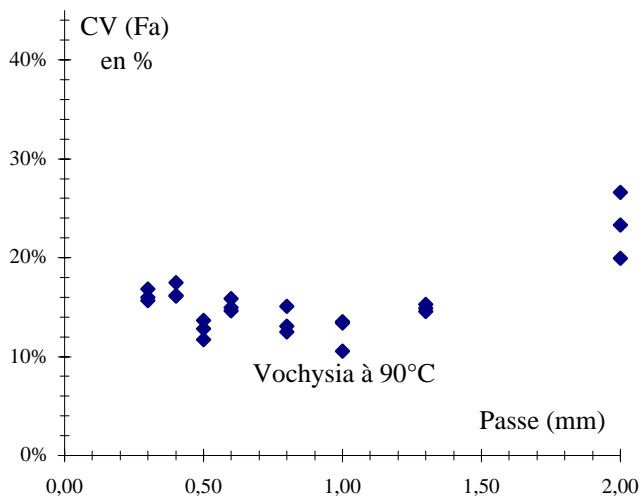
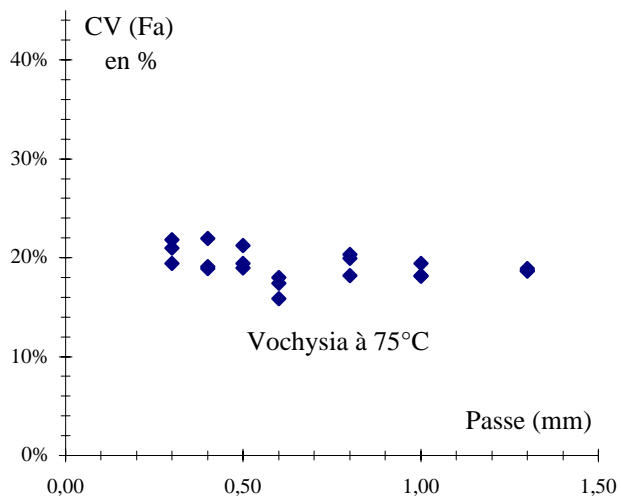
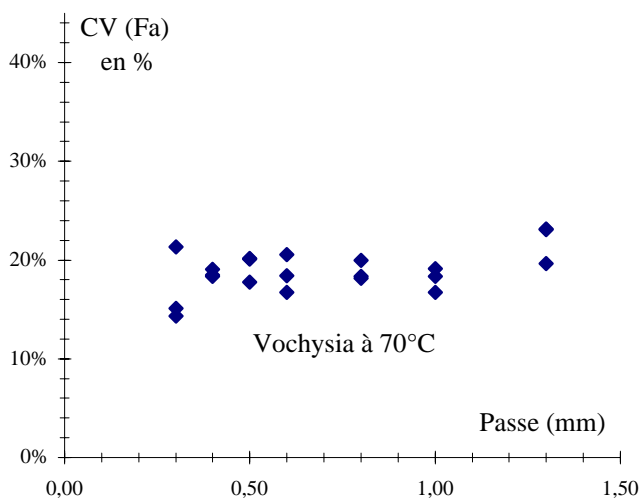
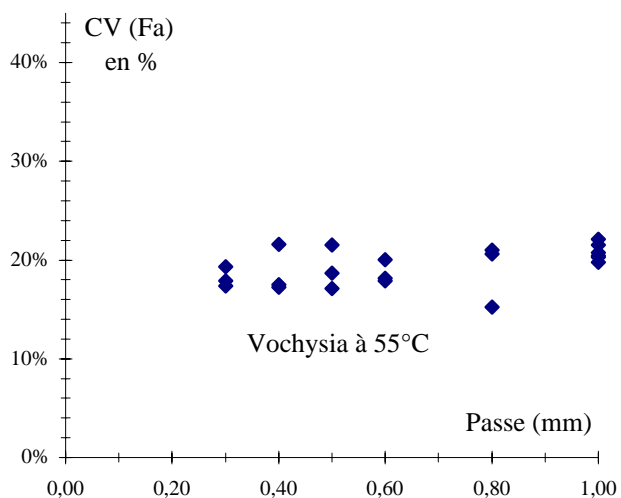
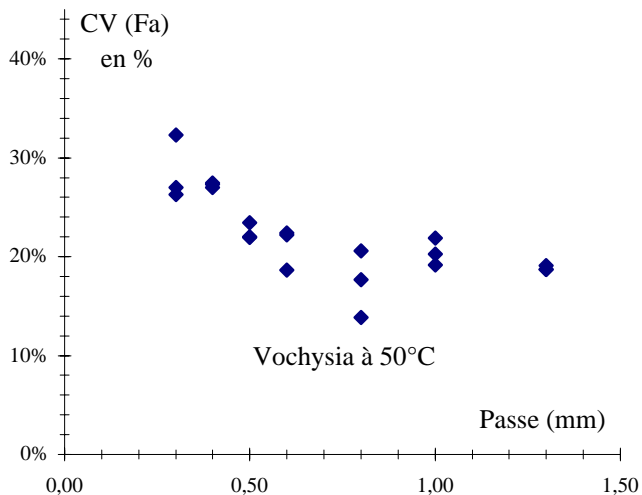
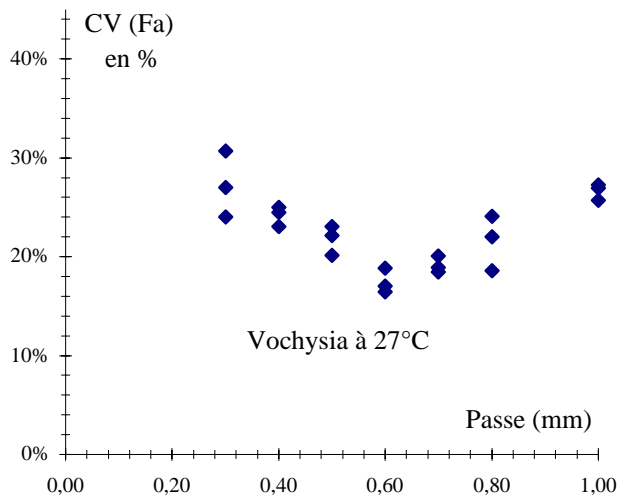


Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai

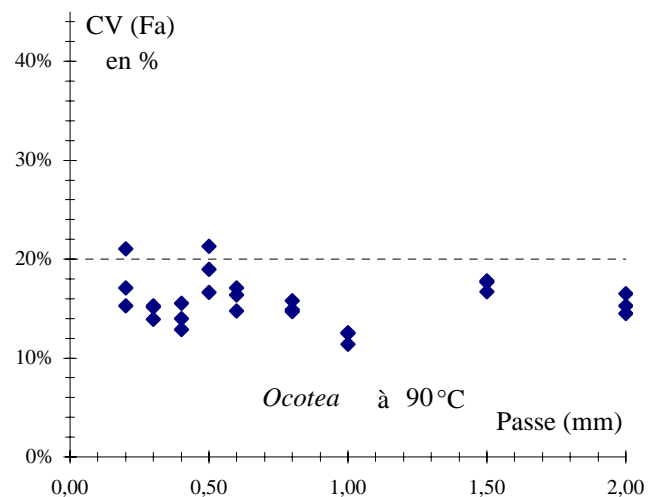
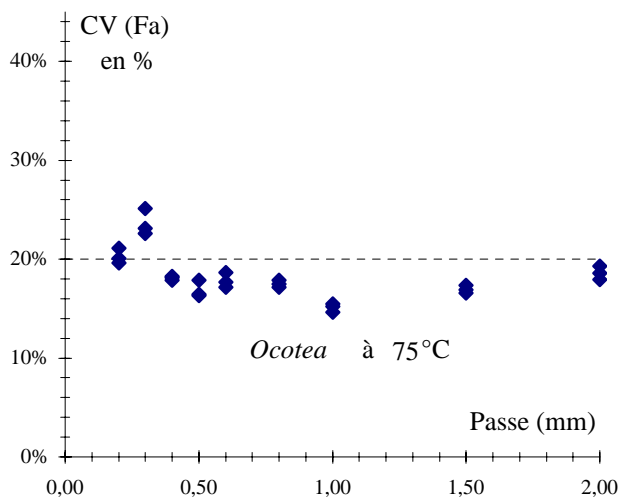
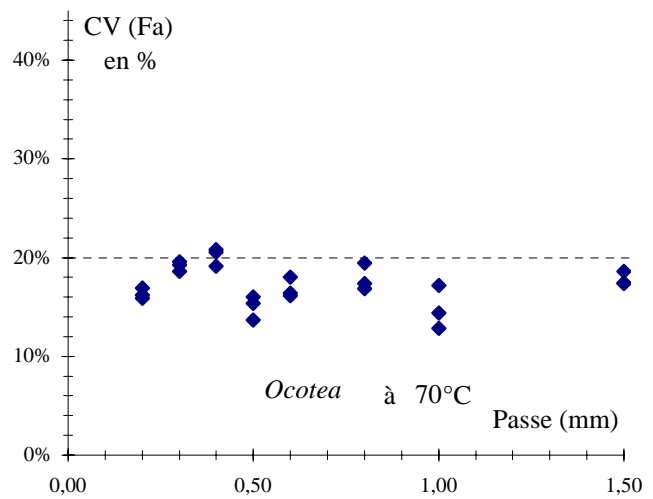
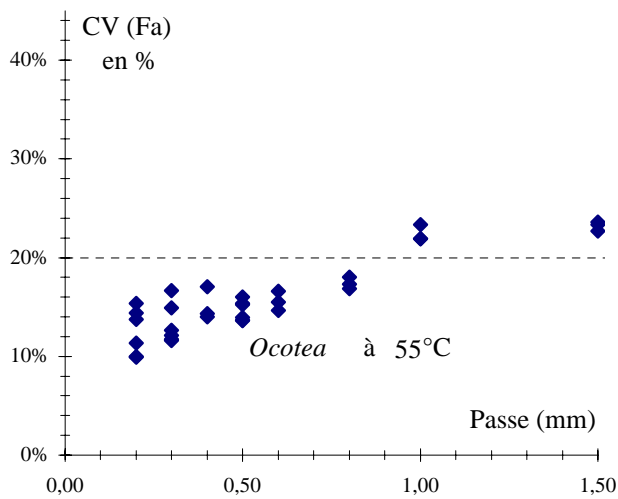
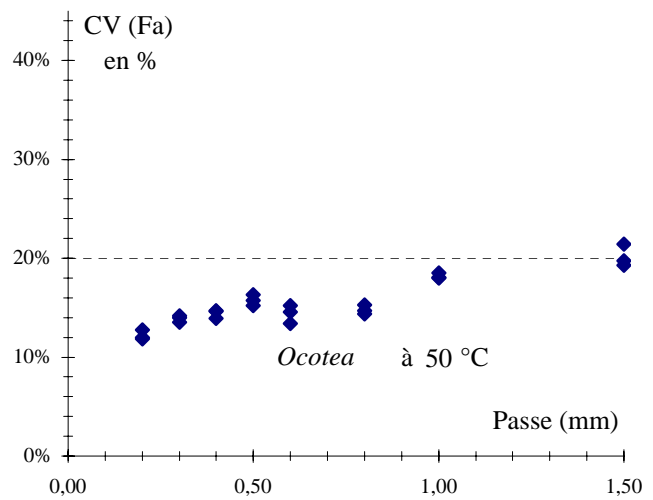
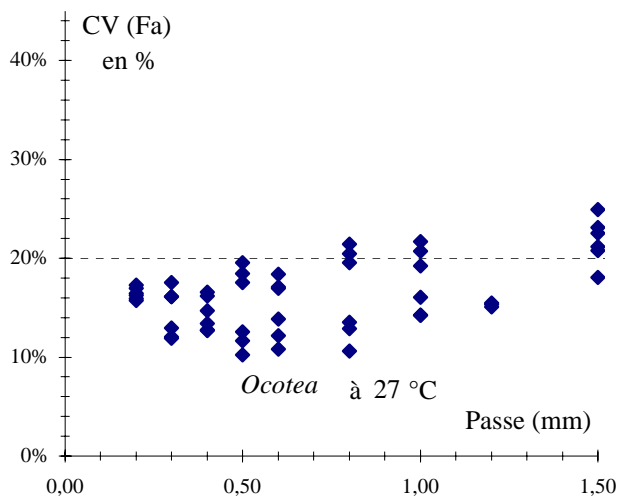
ANNEXE III



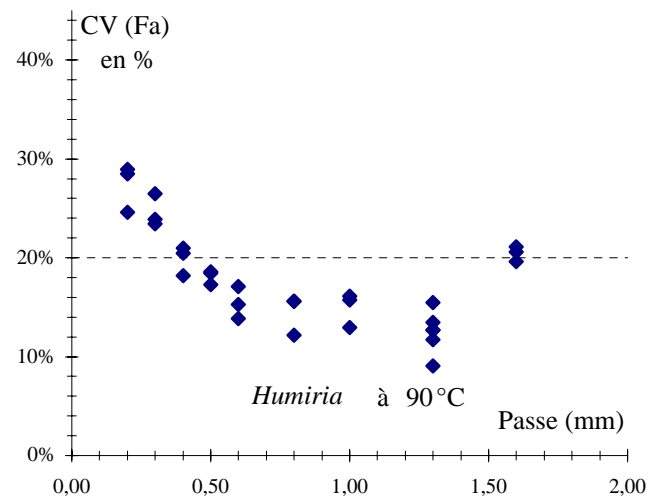
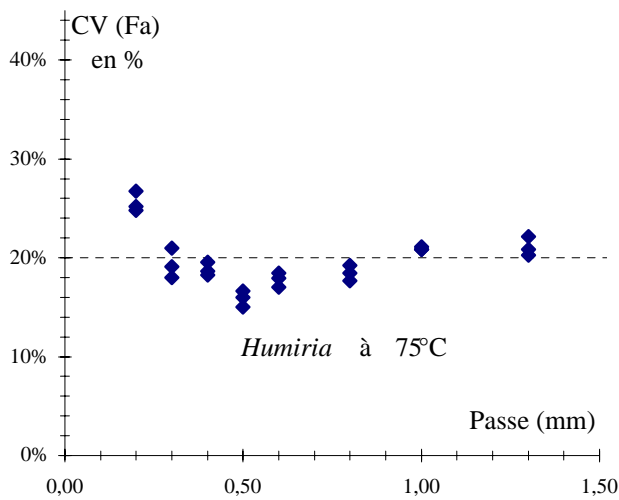
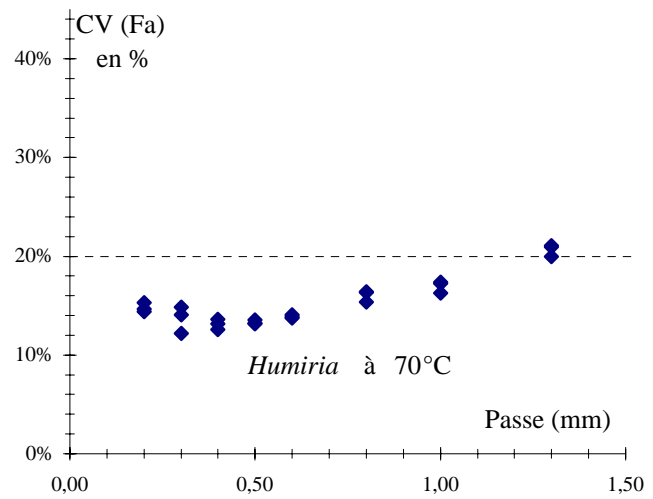
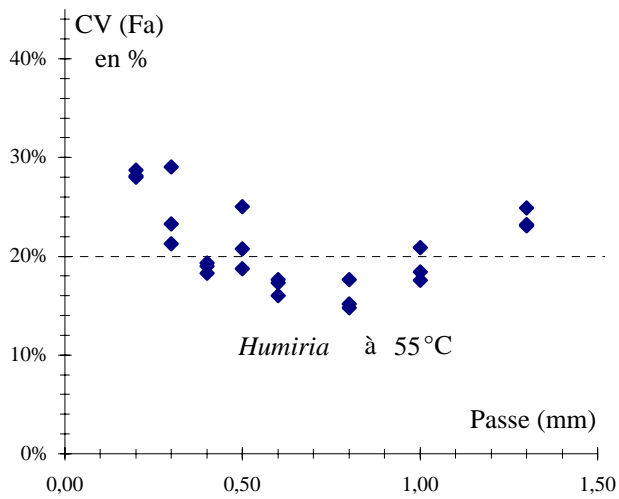
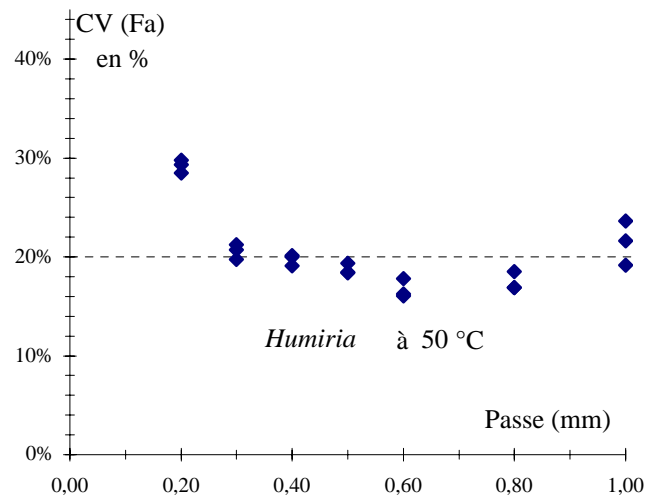
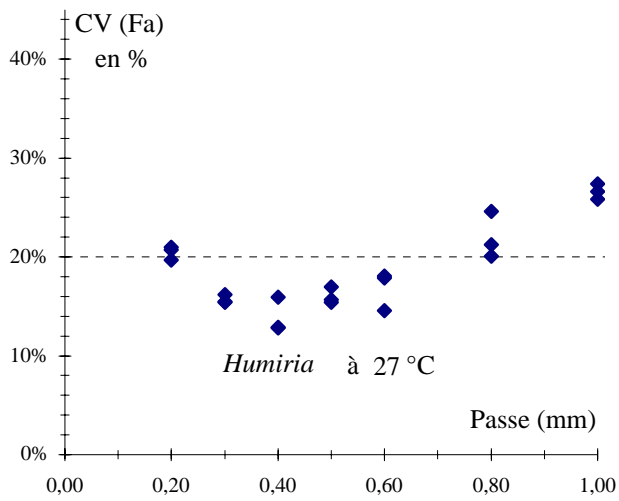
Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai



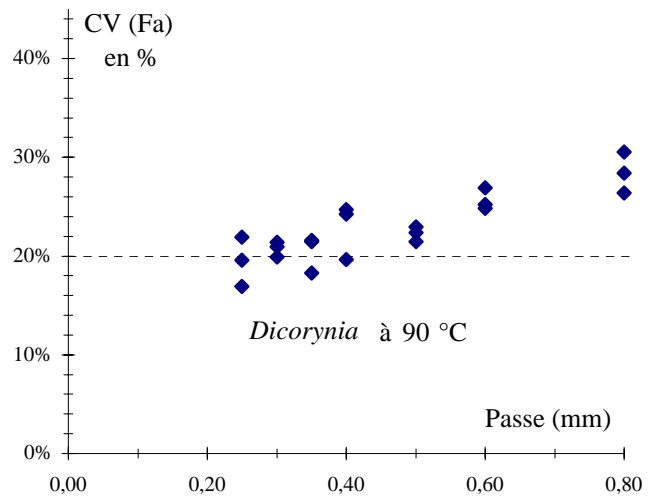
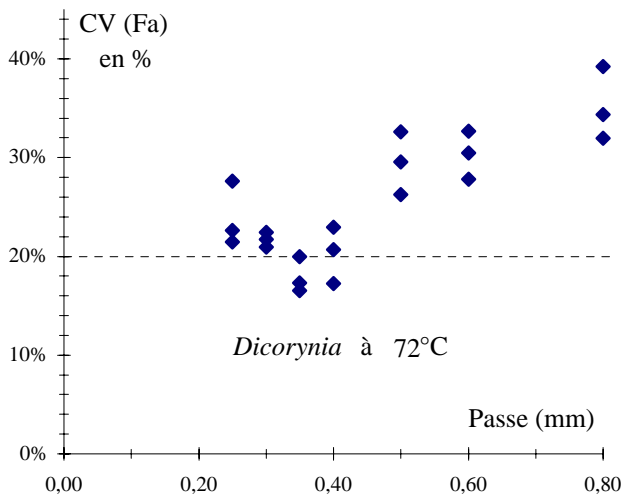
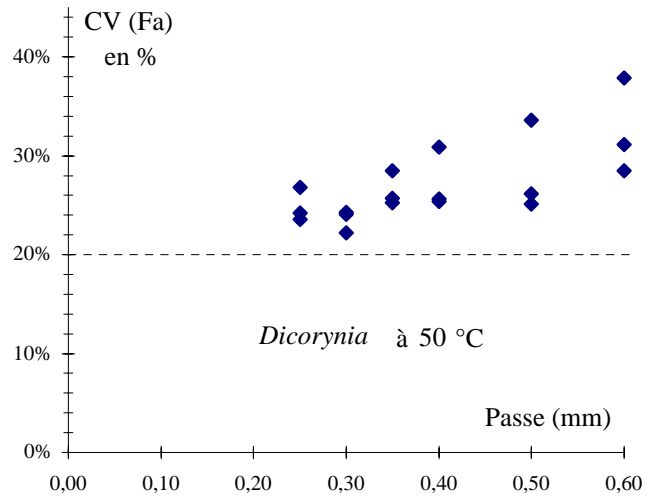
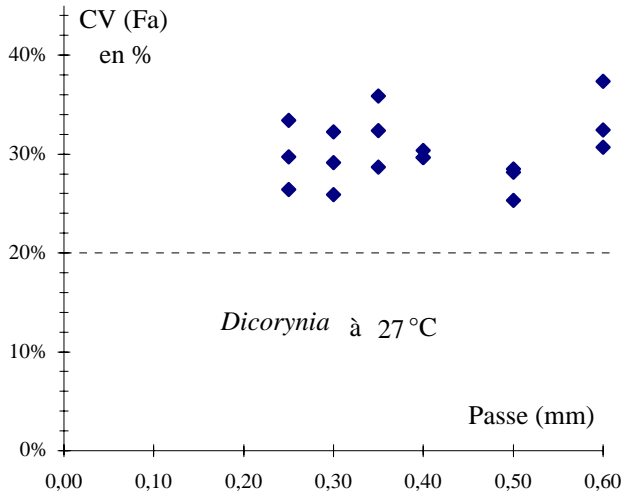
Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai



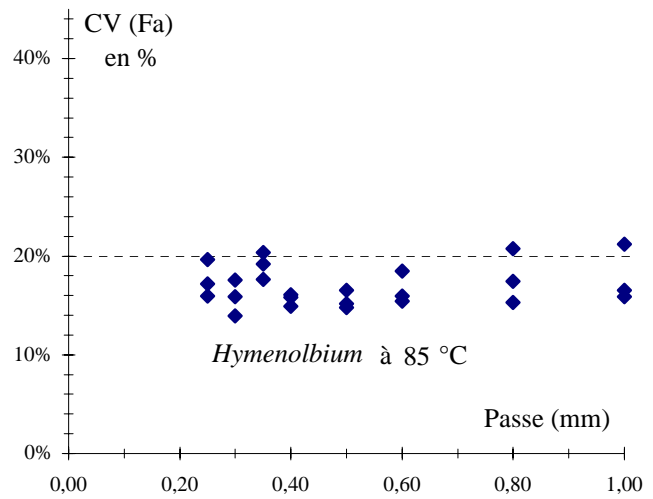
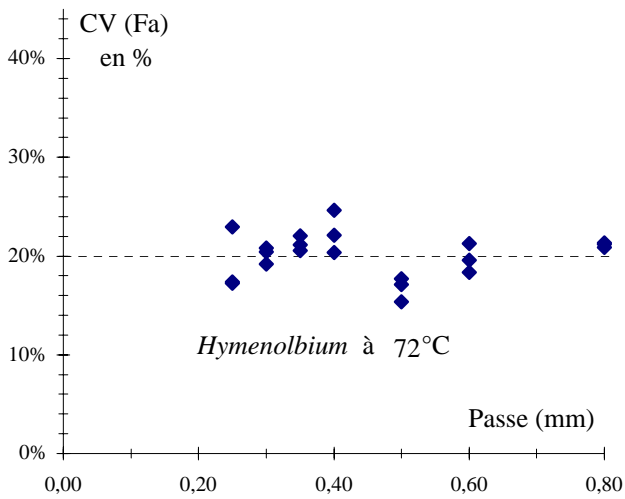
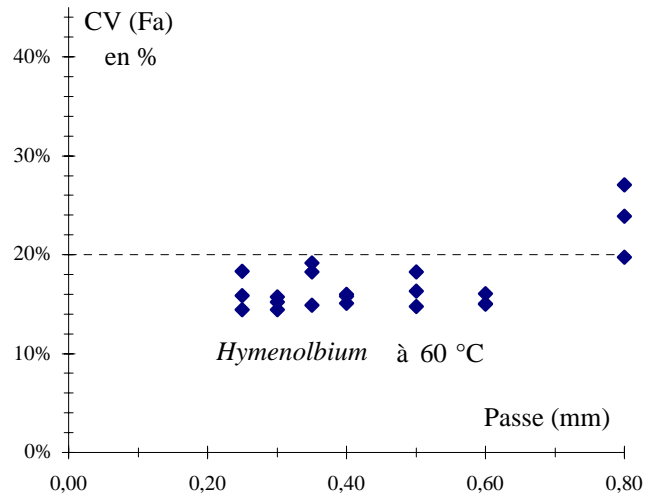
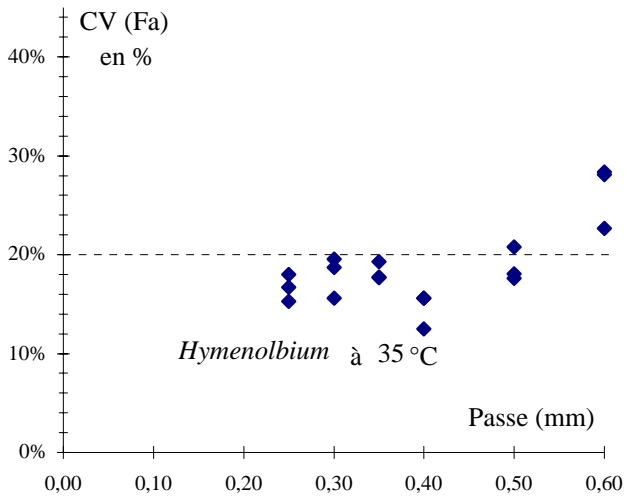
Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai



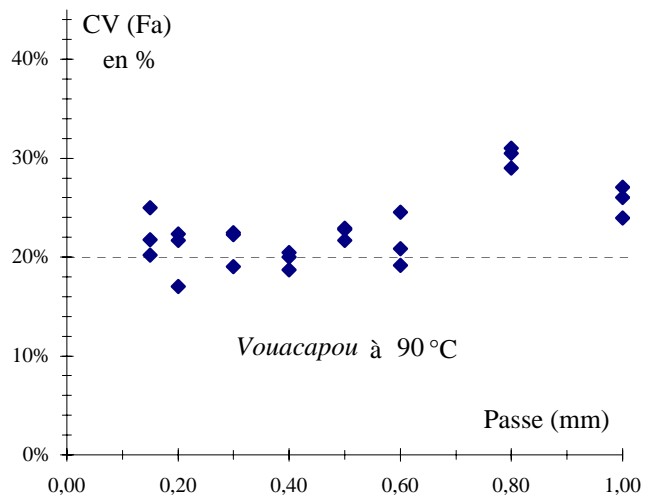
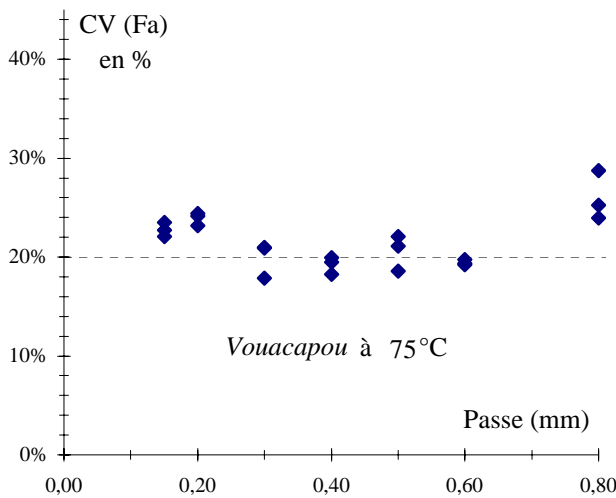
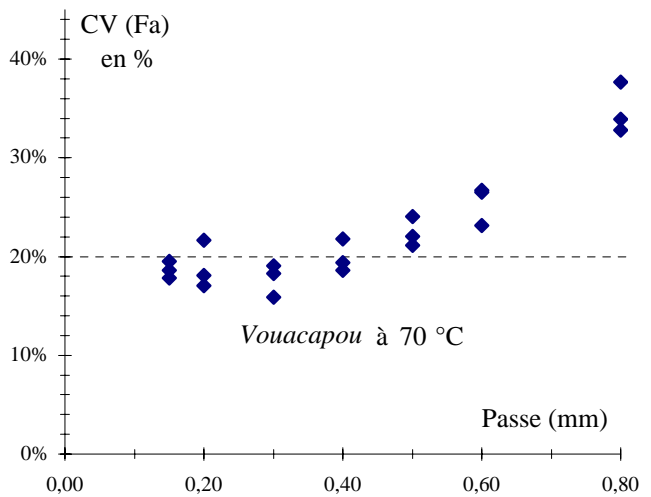
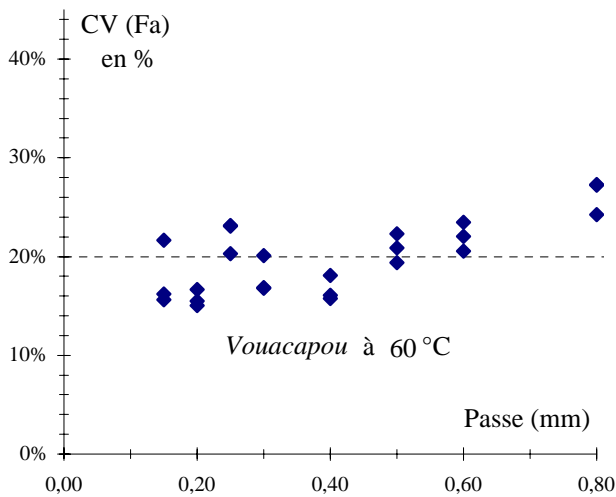
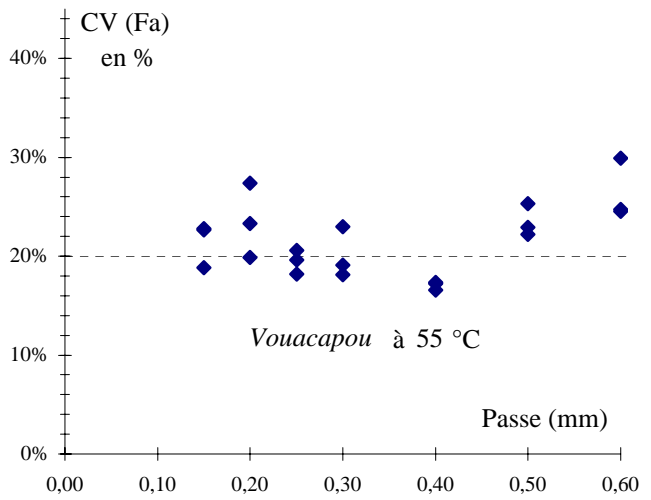
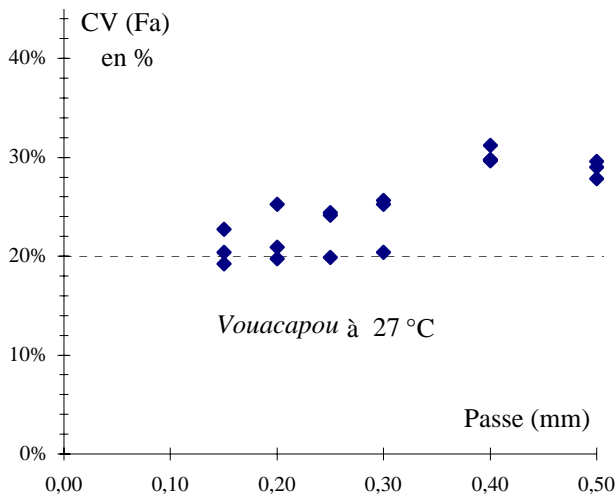
Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai



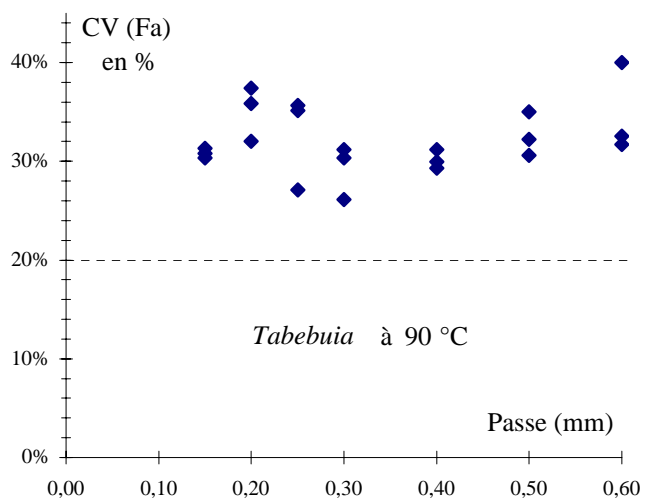
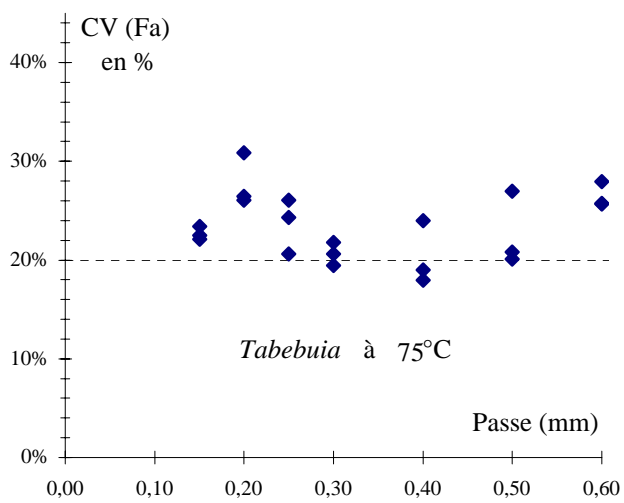
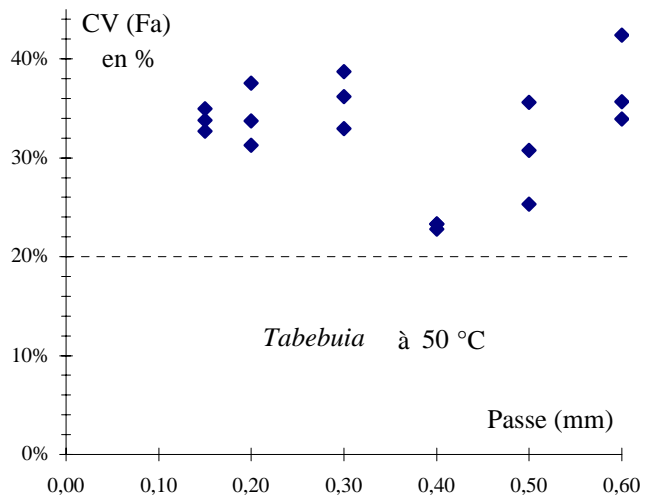
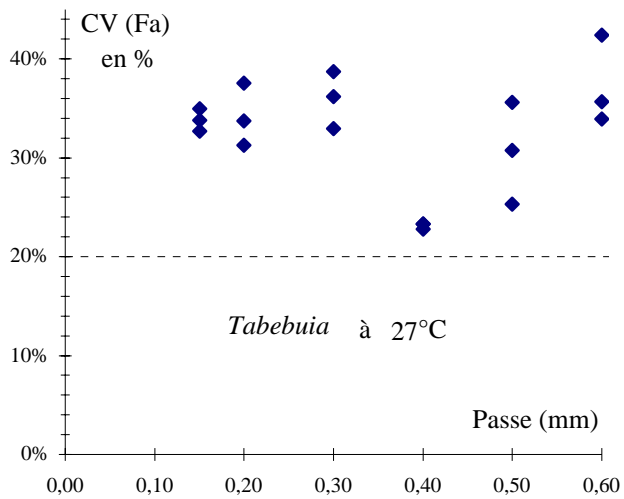
Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai



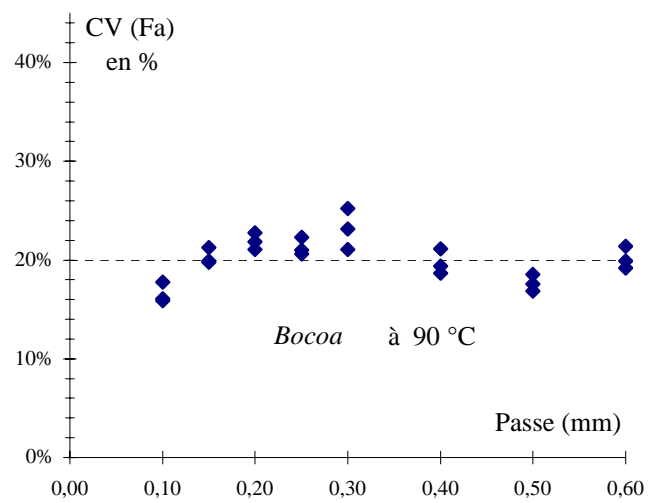
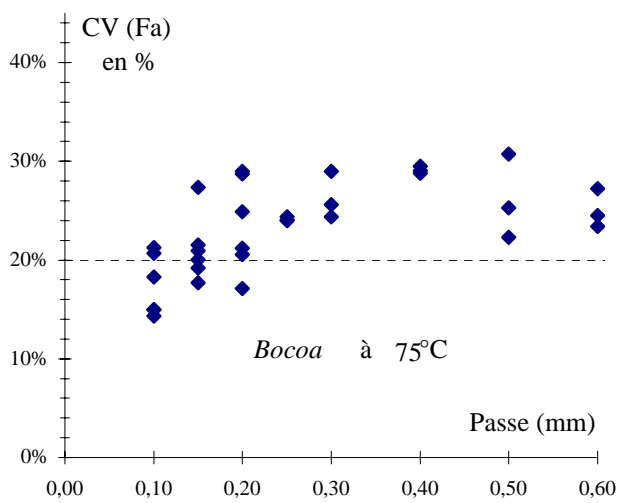
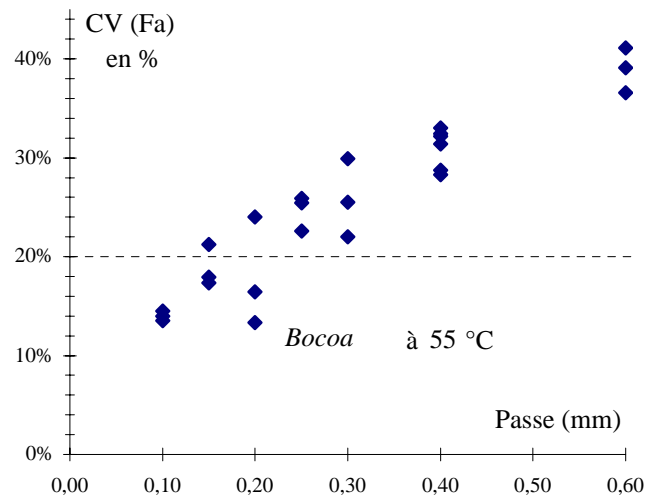
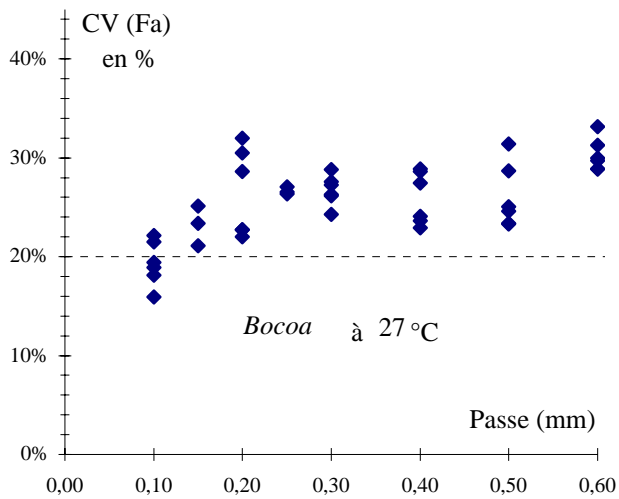
Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai



Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai



Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai



Evolution des coefficients de variation de Fa en fonction de la passe d'usinage aux différentes températures d'essai

Résumé

Afin d'analyser le comportement mécanique du bois vert dans trois types de sollicitations a priori proches des principaux phénomènes régissant le processus de coupe du bois par déroulage ou par tranchage, 3 types d'essais mécaniques dans les directions orthogonales aux fibres ont été menés sur 10 essences guyanaises de densité variant de 0.27 à 1.18 à 12 températures d'essais croissant de 25 et 80°C. L'influence de la densité et de la température sont très fortes et souvent couplées, elles peuvent être assez bien prédites, par contre l'analyse du comportement spécifique de chaque essence est plus délicat et devrait être plus approfondi.

Parallèlement sur ces mêmes essences, des essais de déroulage sans barre de pression et des essais d'enfoncement de la barre de pression, sur la même plage de température, ont permis :

- d'étudier l'influence de la température sur la fissuration ou le flambement du copeau,
- de valider la pertinence de différents descripteurs mécaniques pour expliquer les efforts de coupe,
- de mettre en avant certains ratios entre descripteurs mécaniques comme prédicteurs de l'aptitude au déroulage des bois homogènes.

Mots clés : Bois tropicaux - Propriétés mécaniques - Etuvage - Densité - Déroulage - Efforts de coupe - Variabilité interspécifique.

Title : Temperature effect on the mechanical behaviour of green wood : application to the veneer cutting study of French Guyana species

Summary

In order to analyse the mechanical behaviour of green wood loaded in 3 different ways close to veneer cutting process, 3 kinds of mechanical tests in the directions orthogonal to the grain were performed on 10 guyanese species with specific gravity ranging from 0.27 to 1.18 at 12 temperatures growing from 25 to 80°C. Both temperature and specific gravity influences were very strong, often coupled together and predictable. However the specific behaviour of each specie should be studied thoroughly.

The same species have been involved in peeling trials without pressure bar and bar penetration test using the same temperature. These experiments allow to :

- investigate the temperature effect on chip split...
- assess the mechanical criteria for explaining the cutting forces,
- define several mechanical criteria ratios for predicting the peeling ability of homogeneous woods

Keys words : Tropical woods - Mechanical Proprieties - heating - Density - Veneer cutting - Cutting force - Interspecific Variability.