



**Établissement des courbes de variation de la densité du bois  
par exploration densitométrique de radiographies  
d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants :  
applications dans les domaines Technologique et  
Physiologique**

Hubert Polge

► **To cite this version:**

Hubert Polge. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants : applications dans les domaines Technologique et Physiologique. *Annales des sciences forestières*, 1966, 23 (1), pp.I-206. <10.1051/forest/19660101>. <hal-00881961>

**HAL Id: hal-00881961**

**<https://hal.science/hal-00881961v1>**

Submitted on 11 May 2020

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

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



HAL Authorization

**Établissement des courbes de variation  
de la densité du bois  
par exploration densitométrique  
de radiographies d'échantillons  
prélevés à la tarière sur des arbres vivants**

**Applications dans les domaines  
Technologique et Physiologique**

PAR

**Hubert POLGE**

Ingenieur en Chef du Génie Rural, des Eaux et des Forêts  
Détaché comme Maître de Recherches  
à l'Institut National de la Recherche Agronomique  
(Centre National de Recherches Forestières)

---



## TABLE DES MATIERES

---

### 1<sup>re</sup> PARTIE — INTRODUCTION

	PAGES
CHAPITRE I. — GÉNÉRALITÉS SUR LA DENSITÉ DU BOIS .....	1
1 — <i>Observations préliminaires</i> .....	1
2 — <i>Etude de la densité globale</i> .....	2
21 — Définitions .....	2
22 — Importance des études sur la densité globale .....	3
221 — Importance directe .....	3
222 — Importance due aux corrélations avec les autres caractéristiques physiques .....	4
223 — Importance due aux corrélations avec les caractéristiques mécaniques .....	5
224 — Autres corrélations .....	5
23 — Méthodes de détermination de la densité globale .....	6
231 — Méthodes avec détermination directe du volume ..	6
232 — Méthodes ne faisant intervenir que des pesées ....	7
233 — Bilan des méthodes de détermination de la densité ..	9
3 — <i>Etude de la texture</i> .....	10
31 — Définitions .....	10
32 — Intérêt des recherches sur la texture du bois .....	12
321 — Au point de vue technologique .....	12
322 — Au point de vue résistance mécanique .....	12
323 — Au point de vue valeur papetière .....	13
33 — Méthodes d'étude de la texture .....	17
331 — Méthode basée sur une coloration du bois de printemps .....	17
332 — Procédé photométrique .....	18
333 — Méthode basée sur les changements de dureté du bois d'été .....	18
334 — Méthode faisant appel à un analyseur de dimensions des éléments cellulaires .....	18
335 — Méthode basée sur l'absorption des rayons $\beta$ .....	19



	PAGES
4 — <i>Etude des variations de la densité</i> .....	20
41 — Intérêt des recherches sur les variations de la densité du bois .....	20
42 — Méthodes d'étude des variations de la densité .....	22
421 — Méthode basée sur l'absorption des rayons $\beta$ .....	22
422 — Méthode basée sur l'utilisation d'un analyseur de texture superficielle .....	23
423 — Méthode basée sur l'utilisation d'un microphotomètre enregistreur .....	24
5 — <i>Principales options retenues pour la mise au point d'une nouvelle méthode d'étude des variations de la densité du bois</i> ....	24
51 — Choix de la méthode .....	24
52 — Choix du matériel d'étude .....	25
CHAPITRE 2. — GÉNÉRALITÉS SUR LES RAYONS X .....	28
1 — <i>Rappel de quelques notions relatives aux rayons X</i> .....	28
11 — Définition et Production .....	28
12 — Propriétés des rayons X .....	30
2 — <i>Utilisation des rayons X en matière de recherches forestières</i> ..	31
21 — Etude des insectes xylophages .....	31
22 — Recherches sur la préservation du bois .....	32
23 — Recherches relatives à la qualité des graines forestières.	33
24 — Microradiographie .....	33
25 — Dénombrement et étude de largeur de cernes .....	34
26 — Détermination de la densité .....	35
261 — Procédé radiographique .....	35
262 — Procédé photométrique .....	36
263 — Procédé jonctométrique .....	38
2 <sup>e</sup> PARTIE — EXPOSÉ DE LA MÉTHODE	
CHAPITRE 1 — BASES THÉORIQUES DE LA MÉTHODE PROPOSÉE .....	41
1 — <i>Absorption des rayons X</i> .....	41
11 — Formules générales de l'absorption .....	41
111 — Absorption linéaire et absorption massique .....	41
112 — Absorption atomique et absorption moléculaire ....	42
113 — Application au calcul du coefficient d'absorption du bois .....	43
12 — Influence de la qualité du rayonnement sur l'absorption.	44

### — III —

	PAGES
2 — <i>Choix entre les différentes méthodes possibles de mesure du rayonnement absorbé</i> .....	46
3 — <i>Action photographique des rayons X</i> .....	47
31 — Rappel de quelques notions de photographie .....	47
32 — Différences dans le mode d'action des rayons X et de la lumière sur les émulsions photosensibles .....	48
33 — Définition de quelques caractéristiques photométriques ..	51
34 — Courbes de noircissement .....	52
341 — Courbes de noircissement d'une émulsion photographique exposée à la lumière .....	52
342 — Courbes de noircissement d'une émulsion radiographique exposée aux rayons X .....	53
343 — Courbes de noircissement d'une émulsion radiographique exposée à la lumière .....	54
34 — Anomalies du noircissement .....	56
351 — Effet Eberhard .....	56
352 — Effet Kostinski .....	56
36 — Effets des divers facteurs de l'exposition .....	57
361 — Effets conjugués de l'intensité du rayonnement et du temps d'exposition .....	57
362 — Influence de la qualité du rayonnement .....	58
 CHAPITRE 2 — APPLICATION AUX ÉTUDES DES VARIATIONS DE LA DENSITÉ DU BOIS .....	 61
1 — <i>Principe fondamental</i> .....	61
2 — <i>Problèmes à résoudre</i> .....	61
21 — Problème du contraste .....	62
211 — Contraste intensité du rayonnement transmis/densité du bois .....	62
212 — Contraste densité optique/logarithme de l'intensité reçue .....	63
213 — Contraste ordonnée des courbes d'enregistrement/densité optique .....	64
22 — Problème de l'uniformité du fond des radiographies ....	65
221 — Uniformité de la dose reçue sur la surface des films.	65
222 — Uniformité du noircissement pour une même dose reçus .....	73
23 — Problème de la linéarité .....	74
231 — Conditions d'obtention de courbes de noircissement linéaires .....	74
232 — Résultats .....	77

	PAGES
CHAPITRE 3. — CONDITIONS PRATIQUES DE RÉALISATION .....	83
1 — <i>Opportunité d'un étalonnage de chaque radiographie</i> .....	83
2 — <i>Etude des effets perturbateurs possibles</i> .....	85
21 — Influence de l'enveloppe radiographique .....	85
22 — Influence du fils du bois .....	86
23 — Influence de la teneur en eau .....	87
3 — <i>Lutte contre les flous de diverses origines</i> .....	87
31 — Flous inévitables .....	87
311 — Flou dû à la largeur de la source .....	87
312 — Flou dû à l'excentricité de l'échantillon .....	88
313 — Flou dû à l'épaisseur du film radiographique .....	88
32 — Flous évitables .....	89
4 — <i>Choix de la distance standard d'irradiation</i> .....	90
5 — <i>Choix de l'appareil émetteur</i> .....	91
51 — Conditions tenant à la faible densité du matériau .....	91
52 — Conditions tenant à la grande distance entre la source et le film .....	92
6 — <i>Caractéristiques d'exposition</i> .....	93
61 — Cas général .....	93
62 — Cas particuliers .....	96
621 — Modifications de la tension accélératrice .....	96
622 — Modifications de l'épaisseur de l'échantillon .....	97
7 — <i>Choix de l'appareil de mesure de la densité optique</i> .....	100
71 — Considérations générales .....	100
72 — Description de l'appareil utilisé .....	100
73 — Caractéristiques d'exploration .....	103
8 — <i>Résultats obtenus</i> .....	103
81 — Caractéristiques générales .....	103
811 — Rapidité .....	103
812 — Précision .....	104
813 — Pouvoir de résolution .....	106
814 — Reproductibilité .....	108
82 — Détermination de routine de la densité et de la texture .....	112

### 3<sup>e</sup> PARTIE. — EXEMPLES D'UTILISATION DES COURBES DE VARIATIONS DE LA DENSITÉ DU BOIS

	PAGES
CHAPITRE 1. — ETUDES QUALITATIVES BASÉES SUR LA FORME DES COURBES DE VARIATIONS DE DENSITÉ .....	113
1 — <i>Le Hêtre</i> .....	113
2 — <i>Le Chêne</i> .....	114
CHAPITRE 2 — ETUDES DE CERTAINES ANOMALIES DE STRUCTURE DU BOIS .....	122
1 — <i>Le bois de compression</i> .....	122
2 — <i>Le bois juvénile</i> .....	125
CHAPITRE 3 — LOCALISATION DANS LE BOIS D'ÉLÉMENTS NE FAISANT PAS PARTIE INTÉGRANTE DE LA MATIÈRE LIGNEUSE .....	133
1 — <i>L'eau</i> .....	133
2 — <i>La résine</i> .....	143
CHAPITRE 4 — ETUDE DU RETRAIT ET DES PHÉNOMÈNES CONNEXES ....	145
1 — <i>Le retrait</i> .....	145
2 — <i>Le collapse et le reconditionnement</i> .....	148
CHAPITRE 5 — COMPARAISON DES PROVENANCES .....	153
CHAPITRE 6 — ESSAIS DE DÉTERMINATION DE CARACTÉRISTIQUES NOUVELLES A PARTIR DES COURBES DE VARIATIONS DE LA DENSITÉ .....	161
1 — <i>Observations préliminaires</i> .....	161
2 — <i>Recherche de critères nouveaux utilisables pour une étude de résistance mécanique</i> .....	162
21 — Problème posé .....	162
22 — Résultats .....	163
3 — <i>Utilisation de caractéristiques nouvelles tirées de courbes de variations de densité pour une étude se rapportant à la physiologie de l'arbre</i> .....	167
31 — Considérations générales .....	167
32 — Observations relatives à la forme des courbes de variations de densité .....	172
33 — Recherche de critères quantitatifs nouveaux d'identification des accroissements annuels .....	174
34 — Analyse statistique .....	175
35 — Corrélations avec les facteurs climatiques .....	184

	PAGES
CONCLUSION .....	189
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	190
RÉSUMÉ .....	194
SUMMARY .....	198
ZUSAMMENFASSUNG .....	202

# LISTE DES FIGURES

N <sup>os</sup>	PAGES
1 Microphotographie de Sapin de Douglas .....	11
2 Caractéristiques papetières en fonction de la texture .....	16
3 Appareillage pour l'étude des variations de densité par absorption de rayons $\beta$ .....	22
4 Spectres continus pour différentes tensions accélératrices .....	30
5 Durcissement du spectre continu par des échantillons de différentes épaisseurs en fonction de la densité du bois .....	37
6 Affaiblissement des raies K du tungstène en fonction de l'épaisseur et de la densité de l'échantillon .....	38
7 Microphotographies à $G \times 200$ de deux groupes microscopiques faites dans un même film exposé, à gauche, à la lumière, à droite, aux rayons X .....	49
8 Courbe de noircissement d'une émulsion photographique exposée à la lumière .....	52
9 Courbe de noircissement d'une émulsion radiographique exposée aux rayons X .....	54
10 Courbe de noircissement d'une émulsion radiographique exposée à la lumière .....	55
11 Variations de l'effet photographique en fonction de la longueur d'onde du rayonnement .....	58
12 Courbes de noircissement pour des rayonnements hétérogènes émis sous différentes tensions accélératrices .....	59
13 Variations de la dose nécessaire pour obtenir un effet photographique donné en fonction du pouvoir de pénétration du rayonnement .....	60
14 Influence de la distance sur la dose reçue .....	66
15 Schéma d'un tube à rayons X et surface focale apparente .....	67
16 Dissymétrie d'émission .....	68

— VII —

Nos	PAGES
17 Courbes isodoses .....	69
18 Dispersion du faisceau dans le plan de symétrie du rayonnement ..	70
19 Absorption par l'air en fonction de l'épaisseur traversée .....	72
20 Equivalence bois - cellophane .....	79
21 Courbes de noircissement .....	80
22 Flous de diverses origines .....	88
23 Flou dû à un prélèvement oblique .....	90
24 Variations du spectre continu suivant la nature de la fenêtre .....	92
25 Variations de la quantité d'électricité transportée par le courant électronique en fonction de la tension accélératrice pour obtenir un effet photographique constant .....	95
26 Variations des caractéristiques de l'exposition en fonction de l'épaisseur des échantillons .....	98
27 Schéma d'un microdensitomètre .....	101
28 Photographie d'un microdensitomètre .....	102
29 Pin maritime: comparaison entre radiographie et coupe microscopique .....	105
30 Etudes de structure fine sur radiographies et courbes densitométriques au grossissement 20 .....	107
31 Etudes de reproductibilité (Douglas) .....	109
32 Détermination de la densité moyenne, de la texture et des densités des divers cernes (Douglas) .....	111
33 a Chêne n° 1-9: profil densitométrique et positif de radiographie ....	115
33 b Chêne n° 1-14: profil densitométrique et positif de radiographie ..	116
33 c Chêne n° 1-27: profil densitométrique et positif de radiographie ..	117
33 d Chêne n° 1-28: profil densitométrique et positif de radiographie ..	118
33 e Chêne n° 2-4: profil densitométrique et positif de radiographie ...	119
34 Pin maritime: comparaison des courbes de variations de densité à l'Est et à l'Ouest .....	123
35 a Positifs de radiographie de bois juvénile d'essences diverses .....	126
35 b Profils densitométriques de bois juvénile d'essences diverses .....	127
35 c Profils densitométriques de bois juvénile d'essences diverses .....	128
35 d Profils densitométriques de bois juvénile d'essences diverses .....	129
35 e Profils densitométriques de bois juvénile d'essences diverses .....	130
36 a Epicéa de Sitka - Localisation de l'eau dans les accroissements annuels .....	134
36 b Epicéa - Localisation de l'eau dans les accroissements annuels ....	136

— VIII —

Nos	PAGES
37 a Douglas 1 - Localisation de l'eau dans les accroissements annuels ..	137
37 b Douglas 2 - Localisation de l'eau dans les accroissements annuels ..	138
38 a Abies grandis 1 - Localisation de l'eau dans les accroissements annuels .....	139
38 b Abies grandis 2 - Localisation de l'eau dans les accroissements annuels .....	140
30 Localisation de la résine .....	142
40 Etude du retrait .....	146
41 Etude du collapsé et du reconditionnement .....	150
42 a Comparaison de provenances de Douglas .....	154
42 b Comparaison de provenances de Douglas .....	155
42 c Comparaison de provenances de Douglas .....	156
42 d Comparaison de provenances de Douglas .....	157
43 Diagrammes de rupture et profils densitométriques pour deux échantillons d'Abies grandis .....	166
44 a Courbes de variations de densité d'Abies grandis .....	168
44 b Courbes de variations de densité d'Abies grandis .....	169
45 a Courbes de variations de densité de Douglas .....	170
45 b Courbes de variations de densité de Douglas .....	171
46 a Etude des corrélations entre facteurs climatiques et caractéristiques relevées sur les courbes de variations de densité .....	186
46 b Etude des corrélations entre facteurs climatiques et caractéristiques relevées sur les courbes de variations de densité .....	187

LISTE DES TABLEAUX

Nos	PAGES
1 Influence de la texture sur les qualités papetières .....	15
2 Irradiation optimale en fonction de l'épaisseur de bois traversée ...	35
3 Relation entre le degré de noircissement et la densité du bois .....	36
4 a Densités équivalentes à 1,2 mm cellophane .....	84
4 b Densités équivalentes à 2,5 mm cellophane .....	85
5 Analyse de variance pour étude du bois de compression chez le Pin maritime .....	124
6 Comparaison de provenances .....	158

	PAGES
7 Valeurs de la variable à expliquer et des diverses variables explicatives .....	163
8 Moyennes par position et par année pour trois variables traditionnelles et trois variables nouvelles - <i>Abies grandis</i> .....	176
9 Moyennes par position et par année pour trois variables traditionnelles et trois variables nouvelles - <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	177
10 Comparaison des moyennes (test de DUNCAN) - <i>Abies grandis</i> ....	178
11 Comparaison des moyennes (test de DUNCAN) - <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	179
12 Analyse de variance - <i>Abies grandis</i> .....	180
13 Analyse de variance - <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	181
14 Extrait de l'analyse de variance pour la différenciation des années chez <i>Abies grandis</i> et <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	182
15 Analyse de variance regroupée pour <i>Abies grandis</i> et <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	183





## PREMIÈRE PARTIE

### INTRODUCTION

---

#### CHAPITRE I

### GENERALITES SUR LA DENSITE DU BOIS

---

#### 1 — Observations préliminaires.

Le bois est une matière industrielle tirée directement d'un végétal vivant : l'arbre ; de cette origine découle un certain nombre de propriétés : hétérogénéité, anisotropie, grande variabilité individuelle, affinité pour l'eau, qui en rendent l'étude assez complexe.

C'est ainsi que la densité, qui, pour la plupart des autres matériaux, correspond à une donnée relativement simple, devient, dans le cas particulier du bois, une caractéristique extrêmement fluctuante, puisqu'elle varie, non seulement d'une essence à l'autre et dans des proportions considérables [de 1 à 10 quand on passe du plus léger : le Balsa (*Ochroma lagopus* Sw.) au plus dense : le Piratinera (*P. Guianensis* Aubl.)], mais encore pour une même essence d'une station à une autre, pour une même station d'un arbre à un autre, pour un même arbre d'une année à l'autre, pour une même année d'une période à une autre à l'intérieur de la saison de végétation. Qui plus est, la densité du bois élaboré par un même arbre à un instant donné diffère suivant la hauteur à l'intérieur du fût, et quelquefois suivant l'orientation.

Enfin, même la densité d'une pièce de bois déterminée ne peut pas être considérée comme une caractéristique immuable puisqu'elle est fonction de son taux d'humidité, qui est lui-même variable suivant la température et l'état hygrométrique de l'air ambiant.

Dans cette première partie, nous montrerons l'importance des études sur la densité du bois et les caractéristiques qui s'y rattachent, et nous ferons le point des méthodes de détermination actuellement utilisées, d'abord pour le calcul de la densité globale et de la texture, puis pour l'analyse des variations de la densité.

## 2 — Etude de la densité globale.

### 21 — Définitions.

Rappelons tout d'abord que le bois est essentiellement constitué, si l'on néglige les rayons ligneux à disposition radiale et les cellules de parenchyme où sont stockées les substances de réserve, par des séries de tubes contigus les uns aux autres et allongés dans le sens axial qui peuvent jouer le rôle de tissu conducteur (vaisseaux à parois minces), de tissu de soutien (fibres à membranes épaisses), ou les deux à la fois (fibres-trachéides des bois résineux). Pondéralement, ce sont les fibres au sens large qui représentent, et de beaucoup, la masse la plus importante et, dans un but de simplification, ce terme désignera dans toute cette étude, aussi bien les fibres vraies des Angiospermes, que les trachéides des Gymnospermes.

Si on laisse de côté l'eau de constitution qui fait partie intégrante de la matière ligneuse, et notamment de la cellulose, l'eau peut se trouver à l'état libre, soit dans les cavités cellulaires, soit dans les membranes qu'elle imprègne; lorsqu'une pièce de bois gorgée d'eau est soumise au séchage, l'eau libre qui se trouve dans les lumens s'échappe la première, et son départ n'entraîne aucun changement de volume du bois; ce n'est que lorsque toute cette eau a disparu que l'humidité des membranes commence à diminuer, entraînant corrélativement un changement de volume du bois appelé retrait; ce changement de volume se produit donc lorsque le point de saturation des fibres est atteint, ce qui correspond, en première analyse, à un taux d'humidité de l'ordre de 30 %; tant que la teneur en eau reste supérieure, le poids des échantillons varie en cours de séchage, mais non le volume; lorsqu'elle descend au-dessous de ce seuil de saturation, poids et volume diminuent tous deux; on peut par suite définir plusieurs densités du bois en se référant à des degrés d'humidité variables.

La notion la plus simple est sans doute celle de *densité anhydre* qui est le rapport du poids au volume lorsque toute l'eau libre s'est évaporée à la suite d'un séchage intégral jusqu'à poids constant, généralement réalisé en étuve à une température normalisée de 102,5°; malheureusement, si le poids anhydre peut être considéré comme une caractéristique invariable pour un échantillon donné, il n'en est pas de même pour le volume qui est susceptible de varier suivant les allures de séchage employées; de plus, la détermination du poids anhydre est souvent délicate en raison de l'absorption extrêmement rapide de l'eau qui se trouve à l'état de vapeur dans l'air ambiant.

On peut également définir des densités à un degré d'humidité déterminé, par exemple *densité à 12 ou 15 %*, mais là encore, la stabilisation du bois à une teneur en eau fixée à l'avance est dif-

facile à obtenir, et des variations de volume peuvent intervenir suivant les modalités du séchage, et suivant notamment que l'on part d'un échantillon saturé ou d'un échantillon anhydre.

Pour toutes ces raisons, une troisième définition de la densité est de plus en plus utilisée, à savoir le rapport du poids anhydre au volume saturé ou *infra-densité*. C'est, on le voit, le résultat d'une hypothétique confrontation entre un poids et un volume évalués à deux degrés d'humidité différents (d'où le nom de densité minimum théorique qui lui est également donné); mais l'*infra-densité* est cependant une caractéristique intéressante à évaluer, car ce poids et ce volume sont parfaitement définis; en outre, le volume d'un arbre sur pied est bien un volume saturé, alors que, pour de nombreuses utilisations, la quantité utile est le poids net de matière sèche, et la densité minimum théorique est en fait le coefficient qui permet de passer de l'un à l'autre.

## 22 — Importance des études sur la densité globale.

### 221 — Importance directe.

La densité du bois est en elle-même un critère qualitatif essentiel car elle conditionne le rendement réel des peuplements forestiers; le bois, en effet, est formé aussi bien de membranes que de cavités cellulaires, et, à un même volume apparent, peuvent correspondre des quantités tout à fait variables de matière ligneuse proprement dite, selon la proportion relative de parois cellulaires et de lumens, c'est-à-dire selon une caractéristique directement liée à la densité.

L'importance de celle-ci est maintenant si bien admise que les achats de bois au poids de matière sèche commencent à se généraliser, aussi bien en France dans certaines usines de panneaux de fibres ou dans les principales papeteries landaises, qu'à l'étranger; dans les pays scandinaves notamment, BRAATHE et OKSTAD (1964) ont mis au point dans ce but, à l'Institut Norvégien des Forêts, une machine destinée à la détermination rapide par sondage de la teneur moyenne en matière sèche d'un chargement de bois de râperie, et aux Etats-Unis, c'est directement en tonnes de matière sèche que YOUNG, STRAND et ALTENBERGER (1964) ont établi leurs tables de production pour les 7 principales essences forestières cultivées dans l'état du Maine.

La densité du bois intervient également de façon directe dans toutes les opérations de débardage ou de transport, ainsi que dans les manipulations en usine, en conditionnant la puissance nécessaire pour déplacer ou pour façonner un même volume apparent.

De même, dans les utilisations pour lesquelles de bonnes caractéristiques mécaniques sont requises (charpente, poteaux de ligne, etc...), la préférence est souvent donnée aux bois qui, pour un

même critère de résistance et pour un même équarrissage, ont un poids moins élevé, justifiant la prise en considération de cotes de qualité où la densité intervient au dénominateur.

Enfin, si la vidange par flottage a aujourd'hui totalement disparu en France, elle présente encore une très grande importance économique, aussi bien dans les pays scandinaves qu'au Canada ou dans certains pays tropicaux; dans ce cas, la densité est un élément capital puisqu'elle intervient comme facteur limitant, le bois de nombreuses espèces étant, à l'état frais tout au moins, plus lourd que l'eau.

222 — *Importance due aux corrélations avec les autres caractéristiques physiques.*

En dehors de son importance directe, la densité présente également un très grand intérêt en raison des relations étroites qui la lient à la plupart des autres critères qualitatifs.

2221 — *Corrélation avec la rétractibilité.*

La rétractibilité est un facteur de qualité essentiel puisqu'elle conditionne à son tour la fissilité et la tendance au gauchissement; or, il existe une relation étroite entre le retrait volumétrique total et la densité: NEWLIN et WILSON (1919) ont établi que, pour 177 espèces américaines, le retrait volumétrique total exprimé en % est égal à 28 fois l'infra-densité; bien que ce résultat ait été fort controversé, des corrélations analogues ont été trouvées pour de nombreuses autres essences, et KELSEY notamment (1956) a trouvé, pour 131 espèces australiennes, un coefficient de corrélation significatif de 0,76 entre ces deux caractéristiques.

2222 — *Corrélation avec la longueur des fibres.*

La longueur des fibres est un élément très important d'appréciation de l'aptitude papetière d'un bois, puisque la résistance à la déchirure en particulier lui est étroitement associée; or, il existe, aussi bien dans les variations individuelles que dans les variations interspécifiques, une tendance à un allongement des fibres lorsque la densité elle-même croît, et ECHOLS (1958) a notamment mis en évidence un coefficient de corrélation très significatif entre la longueur des fibres et la densité du bois de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.).

2223 — *Corrélation avec le rendement en fibres pour les essences papetières.*

Si l'on négligeait les éléments accessoires (vaisseaux, parenchyme) et les substances extractibles (tanins, gomme, résine, substances colorantes, etc...), on pourrait dire qu'il existe une liaison fonction-

nelle entre la densité du bois et le rendement en fibres. Dans la pratique, WANGAARD (1958) a montré que, pour un procédé de cuisson donné, le rendement en fibres par unité de poids sec du bois était pratiquement constant, ce que, de leur côté, MITCHELL et WHEELER (1959) traduisent en disant que « chaque augmentation de 2 kgs dans le poids du bois entraîne une augmentation de 1 kg dans le rendement en pâte pour un même volume » ; pour donner une idée de l'incidence économique des variations de la densité, les mêmes auteurs indiquent qu'un stère de bois à forte densité peut fournir deux fois plus de pâte Kraft que le même volume de bois à faible densité de la même espèce [cas particulier du Slash pine (*Pinus elliottii* Engel.)].

223 — *Importance due aux corrélations avec les caractéristiques mécaniques.*

La densité rendant compte en fait du rapport entre volume des membranes cellulaires et volume total du bois, la plupart des caractéristiques mécaniques, notamment les résistances à la compression et à la flexion, lui sont liées par des relations étroites. De telles relations ont été rapportées pour la plupart des essences américaines par PAUL (1963), qui a de plus montré que, dans le cas particulier du Redwood (*Sequoia sempervirens* Endl.), les droites de régression des modules de rupture en flexion statique à la densité étaient différentes suivant que l'on avait affaire à des peuplements de première ou de deuxième génération, et pour ceux-ci, suivant qu'ils provenaient de plantations à fort ou à faible écartement.

VENET pour sa part (1957) a mis en évidence, pour de nombreuses essences susceptibles d'être utilisées comme bois de mine, un certain parallélisme entre densité et résistance mécanique, toutes deux variant dans le même sens que le nombre de cernes par centimètre de rayon. De même, nous avons pu montrer dans une étude précédente (POLGE, 1963 a) que pour 10 essences exotiques différentes, il existait une corrélation étroite entre la densité et une estimation de la dureté, obtenue en mesurant le couple de torsion nécessaire pour enfoncer une tarière à une profondeur déterminée sur un arbre *in situ*.

Enfin, les rapports intimes entre densité et caractéristiques mécaniques sont maintenant si bien admis que ETHINGTON (1965) a pu proposer une nouvelle méthode d'échantillonnage pour l'étude de celles-ci en employant une stratification par classes de densité, de façon à obtenir une meilleure précision des résultats, tout en réduisant le nombre d'arbres à utiliser pour les essais de résistance.

224 — *Autres corrélations.*

La densité du bois intervient également dans la perméabilité, celle-ci étant d'autant plus élevée que le bois est plus léger, comme

l'a notamment mis en évidence COMSTOCK (1965) sur l'Eastern hemlock (*Tsuga canadensis* L.).

De même, dans l'industrie des contreplaqués, l'efficacité des joints de collage varie en raison inverse de la densité du bois, ainsi que l'a montré en particulier KOCH (1965) avec des placages de Loblolly pine (*Pinus taeda* L.).

La facilité d'usinage elle-même est en rapport avec la densité, les bois légers étant moins aptes au tournage et au mortaisage que les bois denses de la même espèce, ainsi que l'a prouvé CANTIN (1965) pour 10 essences feuillues et 6 essences résineuses des forêts canadiennes.

Enfin, même l'adhérence des peintures varie pour une même essence suivant que le support utilisé est un bois dense ou léger (EDLIN, 1965).

### 23 — Méthodes de détermination de la densité globale.

La détermination du poids des échantillons à étudier ne pose guère de problème, grâce aux balances uniplateau à lecture directe donnant une précision du 1/10<sup>e</sup> de mg, ce qui est largement suffisant, même pour des échantillons de faibles dimensions.

Par contre, la détermination du volume est souvent délicate, en raison de la porosité du bois et de son affinité pour l'eau.

### 231 — Méthodes avec détermination directe du volume.

#### 2311 — Détermination du volume par la méthode stéréométrique.

Cette méthode consiste à façonner des échantillons de forme géométrique simple, et à déterminer par calcul leur volume à partir de dimensions mesurées. Mais il est difficile d'obtenir, du fait des changements de dureté qui se produisent à l'intérieur d'un même échantillon, une forme absolument régulière, et les cotes finales dans les zones de bois d'été sont souvent légèrement supérieures à celles du bois de printemps; de même, il arrive parfois que sur des éprouvettes parallélépipédiques les arêtes soient, après ébarbage, légèrement arrondies; dans chaque cas, les erreurs relatives dans la détermination du volume sont d'autant plus grandes que la taille des échantillons est plus réduite.

#### 2312 — Détermination du volume par déplacement du mercure.

Pour remédier à ces difficultés, et surtout pour déterminer plus aisément la densité d'éprouvettes de bois de forme non géométrique, il est possible d'utiliser un voluménoètre. Dans un modèle spécia-

lement conçu pour la densimétrie du bois (BREUIL, 1922), l'échantillon est placé à l'intérieur d'un cylindre rempli de mercure et terminé par un tube capillaire; un piston mû par une vis micrométrique refoule le liquide jusqu'à un repère fixé sur celui-ci; la même opération est refaite sans échantillon; le volume recherché est proportionnel au nombre de tours dont a progressé la vis entre les deux mesures; la précision est de l'ordre du  $\text{mm}^3$ ; un des inconvénients majeurs de cette méthode est, qu'avec des échantillons très secs ou des bois fortement poreux, le mercure pénètre à l'intérieur des vaisseaux, entraînant une erreur sur le volume qui ne peut être corrigée qu'au prix d'une double pesée.

### 2313 — *Détermination du volume par déplacement d'eau.*

Elle ne peut être faite, à moins de précautions spéciales, que sur des échantillons saturés, et même dans ces conditions, la précision est médiocre, en sorte que la méthode ne convient qu'à la détermination rapide de l'infra-densité sur de gros échantillons.

### 232 — *Méthodes ne faisant intervenir que des pesées.*

Tenant compte du fait que les appareils actuels permettent une plus grande précision dans la détermination du poids que dans celle du volume, plusieurs méthodes ont été mises au point pour rendre possible le calcul de la densité du bois sans mesure directe du volume.

### 2321 — *Méthode hydrostatique.*

On applique le principe d'Archimède en calculant la poussée subie par l'échantillon dans un liquide de poids spécifique connu  $\gamma$ ; si  $P$  est le poids de l'éprouvette dans l'air et  $P'$  son poids dans le liquide, le volume est donné par la formule:

$$V = \frac{P - P'}{\gamma}$$

et, par suite, la densité:

$$d = \frac{P}{P - P'} \cdot \gamma$$

### 2322 — *Méthode du picnomètre.*

Elle convient surtout pour les calculs de densité sur des échantillons saturés de faibles dimensions; on procède à trois pesées, la première donne le poids  $P_1$  de l'échantillon saturé, la deuxième, le poids  $P_2$  du picnomètre plein d'eau, la troisième, le poids



P3 du picnomètre renfermant l'échantillon saturé, puis rempli d'eau jusqu'à arasement du tube capillaire; la formule suivante permet de connaître le volume recherché avec une bonne précision, à condition de bien essuyer à chaque fois l'eau qui se trouve à l'extérieur du picnomètre, et d'opérer avec une eau à température constante:

$$V = (P1 + P2) - P3$$

### 2323 — Méthode de la saturation intégrale.

Dans cette méthode découverte par KEYLWERTH (1954), on ne calcule, ni directement, ni indirectement, le volume de l'échantillon. Partant du principe que la matière ligneuse proprement dite, qui forme les membranes des cellules du bois, a une densité à peu près constante et égale à 1,53, comme l'a montré STAMM (1929), il est possible de déterminer l'infra-densité ( $P_o/V_s$ ) à l'aide de la formule suivante dans laquelle  $P_{\max}$  est le poids maximum de l'échantillon après saturation intégrale:

$$\frac{P_o}{V_s} = \frac{1}{\frac{P_{\max}}{P_o} - 0,347}$$

Le volume saturé  $V_s$  est en effet, lorsque l'échantillon est entièrement saturé, égal au volume de la matière ligneuse  $V_{ml}$  augmenté du volume occupé par l'eau, lui-même égal au poids d'eau contenue  $P_{\max} - P_o$ , donc:

$$\frac{P_o}{V_s} = \frac{P_o}{V_{ml} + P_{\max} - P_o}$$

or:

$$V_{ml} = \frac{P_o}{1,53} \quad \text{d'où:} \quad \frac{P_o}{V_s} = \frac{P_o}{P_o \left( \frac{1}{1,53} - 1 \right) + P_{\max}}$$

ce qui permet de retrouver la formule indiquée plus haut. La saturation intégrale peut être obtenue, soit par une longue ébullition (d'une durée minimale de 15 heures dans la méthode originale de KEYLWERTH), soit par une application du vide à la température normale.

Cette méthode est rapide et relativement précise, mais la détermination du poids maximum se fait sur des échantillons que l'on sort de l'eau, et qui doivent donc être délicatement essuyés pour enlever tout le liquide en excédent, mais pas trop afin de ne pas aspirer une partie de l'eau de saturation.

233 — *Bilan des méthodes de détermination de la densité.*

Des améliorations ont été apportées à l'une ou l'autre des méthodes décrites ci-dessus pour en accroître le degré de précision; c'est ainsi notamment que, dans la détermination du volume par déplacement de liquide, il a été fait appel à des liquides n'entraînant pas comme l'eau un gonflement du bois, de façon à pouvoir calculer le volume d'échantillons non saturés.

De même, dans les méthodes hydrostatiques, ou par pycnométrie, on a songé à revêtir préalablement le bois d'une pellicule protectrice destinée à éviter toute absorption d'eau; différents produits ont été essayés, huile et paraffine notamment, mais il semble que les meilleurs résultats aient été ceux obtenus par Kay von WEDEL (1962) avec une solution de celloïdine qui, après évaporation du solvant, laisse sur l'échantillon une pellicule extrêmement mince qui en épouse toutes les sinuosités, qui n'en affecte pratiquement pas le volume, et dont l'incidence sur le poids peut être, soit négligée, soit déterminée par double pesée.

Malgré ces perfectionnements, lorsque l'on compare entre eux les résultats obtenus par différentes méthodes, on n'obtient que d'une façon tout à fait exceptionnelle des valeurs exactement identiques pour un même échantillon.

La méthode stéréométrique aboutit souvent à une surestimation du volume, donc à une sousestimation de la densité; les méthodes par déplacement de mercure ou d'eau, au contraire, font ressortir des densités exagérées; quant aux diverses variantes de la méthode hydrostatique, elles ne donnent pas des résultats homogènes, et von WEDEL (op. cit.) fait mention de différences pouvant atteindre 10 % entre les valeurs extrêmes auxquelles il a abouti.

La seule multiplicité des procédés montre que le problème de la détermination exacte de la densité du bois n'est pas résolu puisqu'aucun d'eux n'a prévalu au point de pouvoir servir de méthode de référence à laquelle les autres pourraient être comparés; il serait, par suite, assez vain d'exiger des méthodes d'analyse de variations de la densité une fidélité et une précision supérieures à celles obtenues pour la détermination de la densité globale.

Il convient enfin de signaler incidemment que les spécialistes de la technologie du bois ont, dans un but de simplification, pris l'habitude de supprimer la virgule dans les valeurs de densité qu'ils donnent; on obtient ainsi des nombres, le plus souvent à 3 chiffres, qui sont donc des grammes par  $\text{dm}^3$  ou des kg par  $\text{m}^3$ . Nous nous sommes fréquemment conformé à cette pratique dans le cadre du présent travail.

### 3 — Etude de la texture.

#### 31 — Définitions.

La texture d'un bois est, d'après la norme française, B 50 002, le rapport de la largeur de la zone de bois d'été à la largeur totale de la couche d'accroissement, le bois d'été étant lui-même défini, pour les essences poussant dans la zone tempérée de l'hémisphère Nord, comme le bois formé à la fin de la saison de végétation et constitué par des tissus denses, compacts et de couleur foncée.

Ces définitions manquant quelque peu de précision, ce qui est assez normal étant donné qu'elles ont été élaborées, non pas à l'intention des chercheurs forestiers, mais à celle des utilisateurs de produits ligneux, on s'en rapporte généralement à des caractéristiques anatomiques pour obtenir une délimitation plus rigoureuse.

Ces définitions anatomiques sont au nombre de deux; la plus couramment utilisée est celle de MORK (1926), suivant laquelle le bois d'été est constitué par l'« ensemble des trachéides pour lesquelles l'épaisseur de la membrane commune entre deux cavités cellulaires, multipliée par deux, est supérieure ou égale à la largeur du lumen, toutes les mesures étant faites dans le sens radial »; cette définition, appliquée tout d'abord par l'auteur à l'*Épicéa* (*Picea abies* L.), a depuis été généralisée à l'ensemble des bois résineux.

L'autre définition de la texture est celle de KLEM (1945), qui fixe la limite entre le bois de printemps et le bois d'été à l'intérieur du cerne « à l'endroit où la dimension radiale des cavités cellulaires est tout juste inférieure à la dimension tangentielle »; DINWOODIE notamment (1963) a utilisé cette définition dans son étude sur les variations internes et entre individus de la longueur des fibres de l'*Épicéa* de Sitka (*Picea sitchensis* Bong.), mais aucune comparaison n'a, semble-t-il, été faite entre les deux définitions qui ne paraissent pas, en première analyse, tout à fait concordantes.

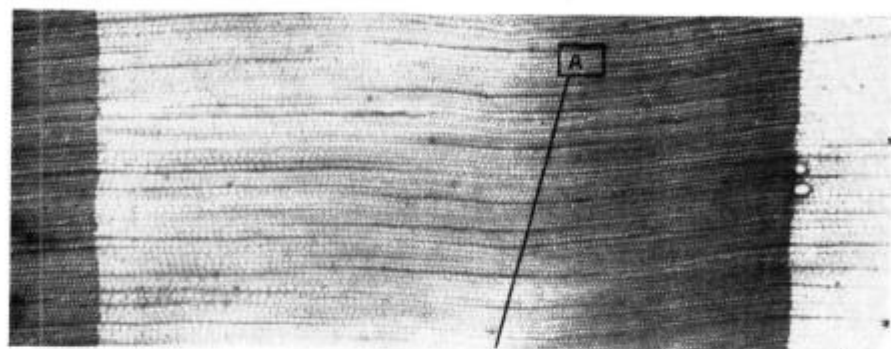
KNIGGE et KOLTZENBURG (1964) ont, pour leur part, légèrement modifié la définition de MORK, de façon à rendre plus précise la délimitation recherchée et à réduire les erreurs relatives de mesure; ils considèrent comme cellules du bois d'été celles pour lesquelles la distance comprise entre la limite interne (côté moelle) de la membrane commune avec la cellule précédente et la limite externe (côté cambium) de la membrane commune avec la cellule suivante, est égale à deux fois le diamètre de la cavité cellulaire.

La figure n° 1 représente un accroissement annuel de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) avec son bois de printemps et son bois d'été, ainsi qu'une microphotographie à fort grossissement de la zone de transition entre l'un et l'autre sur laquelle ont été schématisés les critères servant de base aux diverses définitions de la

FIG. 1.

Microphotographie de Sapin de Douglas

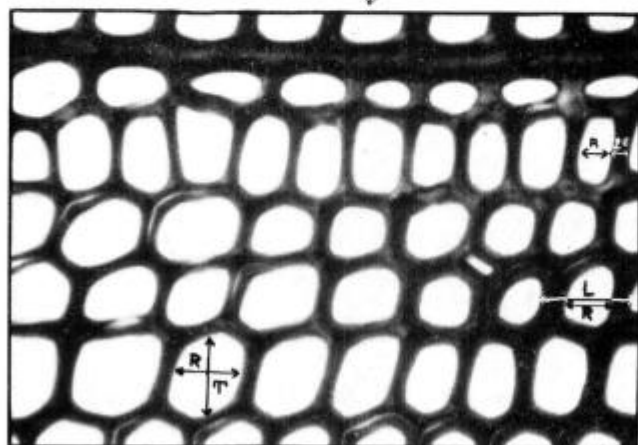
← 1 accroissement annuel à G  $\times$  30 →



Bois de printemps

Bois d'été

Agrandissement de A à G  $\times$  420



Définitions du bois d'été:

$$\text{MORR } R \leq 2 \times 2e - \text{KNIGGE } L \geq 2R - \text{KLEM } T \geq R$$

texture. On peut y voir accessoirement que, même en utilisant une méthode anatomique, la délimitation recherchée est loin d'être rigoureuse, puisqu'elle varie d'une file de cellules à l'autre, et puisque des cellules présentant les caractéristiques du bois initial se trouvent intercalées entre d'autres qui appartiennent manifestement au bois final.

### 32 — *Intérêt des recherches sur la texture du bois.*

#### 321 — *Au point de vue technologique.*

Le pourcentage de bois d'été a une incidence directe sur la valeur technologique du bois de la plupart des essences forestières, mais son importance est particulièrement évidente dans le cas de certains feuillus, dont les prix de vente varient parfois du simple au décuple suivant que l'on a affaire à des bois à forte ou à faible texture.

L'exemple le plus classique est fourni par le Chêne rouvre (*Quercus sessiliflora* Salisb.), dont il est bien connu que les bois de très haute valeur technologique (bois de merrain ou bois de tranchage) sont des bois à faible densité et faible dureté, caractérisés par une proportion peu élevée de bois final, ce qui, l'épaisseur du bois initial étant elle-même à peu près constante, correspond à une faible texture; mais il convient d'observer que la simple définition anatomique de la texture rend assez mal compte du phénomène, puisqu'il existe des Chênes à bois final large (Chênes de Bourgogne ou Chênes Champêtres) appartenant à une espèce très voisine au point de vue anatomique (*Quercus pedunculata* Ehrh.), qui, grâce à une densité et une dureté peu élevées de ce bois final, sont cependant d'une qualité technologique satisfaisante; bien que le Hêtre (*Fagus sylvatica* L.), contrairement au Chêne, soit une essence à pores diffus, l'influence de la texture sur sa valeur technologique est assez semblable, en ce sens que les meilleurs Hêtres de déroulage sont des Hêtres présentant de nombreux et gros vaisseaux sur la majeure partie de la zone d'accroissement annuelle, c'est-à-dire ayant une proportion de bois final à densité élevée relativement faible.

#### 322 — *Au point de vue résistance mécanique.*

La texture rendant compte en quelque sorte de la proportion de matière ligneuse proprement dite par rapport aux vides des cavités cellulaires, il est bien évident qu'une corrélation étroite doit exister entre elle et les diverses caractéristiques mécaniques; l'importance de la proportion de bois final est si bien admise que l'on commence à la prendre en considération maintenant à l'échelle de l'industrie; aux U.S.A., par exemple, les règles du « Rulebook » relatives au classement commercial du bois de Douglas prescrivent de n'utiliser, pour tous usages faisant intervenir les qualités mécaniques

du bois, que des Douglas ayant plus de six cernes au pouce et moins de  $\frac{2}{3}$  de bois initial, ou plus de cinq cernes au pouce et moins de 50 % de bois initial.

En fait, le problème est, pour certaines essences tout au moins, beaucoup moins simple, comme l'a montré CLARKE (1933) qui a trouvé, pour le Frêne (*Fraxinus excelsior* L.), une résistance en compression axiale plus élevée pour les arbres à bois d'été étroit formé de fibres à parois épaisses que pour les arbres de même densité moyenne, mais à bois d'été plus large formé de fibres à parois minces. Cette observation, comme celles rapportées au paragraphe précédent au sujet de la valeur technologique du Chêne ou du Hêtre, montre qu'il y a intérêt à préciser davantage la notion de texture, de façon à tenir compte, non seulement des largeurs respectives du bois d'été et du bois de printemps, mais aussi des variations de densité de l'un et l'autre.

### 323 — *Au point de vue valeur papetière.*

Nous nous étendrons quelque peu sur ce point en raison de l'importance croissante des débouchés papetiers et des recherches actuellement en cours dans le monde entier, pour déterminer les caractéristiques de structure que doit présenter un bois afin d'assurer une production de fibres aussi élevée que possible en quantité et en qualité.

De plus, les courbes de variations de la densité donnent directement, ainsi qu'on le verra plus loin, la valeur de la texture, tout en fournissant de surcroît de nombreux renseignements supplémentaires, et toutes les observations faites ci-dessous sur l'intérêt de la texture pour les études de qualité papetière leur sont à fortiori applicables.

### 3231 — *Influence de la texture sur le rendement en pâte.*

Elle découle directement de l'épaisseur supérieure des membranes du bois d'été qui confère à celui-ci une densité moyenne plus élevée que celle du bois de printemps (l'écart entre les deux varie de 70 % pour l'Epicéa de Sitka à environ 200 % pour le Douglas); le rendement en fibres qui, comme on l'a vu, est très fortement tributaire de la densité, augmente donc avec la texture, et lui serait même lié par une relation linéaire si les densités propres du bois d'été et du bois de printemps étaient indépendantes de leurs largeurs respectives, ce qui ne semble pas être le cas.

### 3232 — *Influence sur la longueur des fibres.*

La longueur des trachéides n'est pas uniforme à l'intérieur d'un même accroissement annuel comme l'ont montré notamment DIN-

WOODIE (op. cit.) pour l'Epicéa de Sitka, et NICHOLLS et DADSWELL (1962) pour le pin de Monterey (*Pinus radiata* D. Don); dans les cas normaux, c'est-à-dire en dehors du bois juvénile et en l'absence de faux cernes ou de bois de compression, elle diminue dans le bois de printemps, passe par un minimum, puis augmente dans le bois d'été, et la longueur maximale, qui se situe à la fin de ce dernier, est supérieure de 12 à 20 % à celle relevée au début du bois de printemps.

### 3233 — Influence sur les qualités papetières en général.

Elle est certaine mais complexe, car bois initial et bois final fournissent des pâtes de qualités papetières différentes, et en grande partie complémentaires, en sorte que la supériorité des unes par rapport aux autres ne peut s'apprécier qu'en fonction de l'utilisation qui en est faite; ce problème a été particulièrement étudié par WATSON et DADSWELL (1962) qui ont réussi à fabriquer des feuilles de papier à partir de pâtes de diverses espèces des genres *Pinus* ou *Eucalyptus* renfermant des proportions de bois final qui variaient de 0 à 100 %. Leurs recherches ont tout d'abord permis de confirmer que le rendement en poids à l'unité de volume (produit de la densité par le rapport du poids de fibres au poids de bois utilisé) est beaucoup plus élevé pour le bois final que pour le bois initial (0,323 g/cm<sup>3</sup> contre 0,165 dans le cas de *Pinus taeda*).

Elles ont montré de plus que les cellules du bois de printemps à parois minces peu résistantes subissent en cours de fabrication un aplatissement dans le sens transversal, qui fait que les liaisons entre fibres sont intimes et les surfaces en contact importantes, d'où une bonne résistance à l'éclatement, au pliage et à la traction, mais, par contre, une faible résistance à la déchirure. Les fibres du bois d'été, au contraire, du fait de la solidité plus grande de leurs membranes, gardent une section transversale assez voisine de leur section primitive, et les papiers qu'elles donnent sont, par suite des papiers bouffants, à texture ouverte, mais dotés d'une résistance à la déchirure élevée.

Fibres de bois de printemps et de bois d'été diffèrent en outre sensiblement dans leur comportement lors du raffinage, les premières nécessitant un séjour moins prolongé dans les raffineurs pour atteindre un degré donné de liberté entre fibres, ayant moins tendance à se séparer en fibrilles, et produisant de plus une moindre proportion de débris.

Les diverses observations de WATSON et DADSWELL au sujet de l'influence de la texture sur les qualités papetières se trouvent résumées dans le tableau n° 1 ci-dessous :

Les mêmes auteurs ont montré qu'il existe une certaine proportionnalité, directe ou inverse, entre le pourcentage de bois d'été et

les diverses caractéristiques mécaniques du papier, qui se trouvent améliorées, ou au contraire dégradées, lorsque la texture augmente; de telles relations linéaires apparaissent assez clairement pour le Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) sur le graphique faisant l'objet

TABLEAU n° 1

Influence de la texture sur les qualités papetières.

		Pâtes faites de 100 % de bois initial et avec un raffinage			Pâtes faites de 100 % de bois final et avec un raffinage		
		Nul	Modéré	Poussé	Nul	Modéré	Poussé
PINUS TAEDA	- Coefficient de résistance à la déchirure...	246	116	89	183	268	144
	- Longueur de rupture (en km) .....	5,5	8,7	9,7	2,1	6,0	7,2
	- Coefficient de tenue au pliage .....	4.629	5.020	1.640	8	1.063	634
	- Indice d'éclatement ...	58	84	88	10	50	58
PINUS RADIATA	- Coefficient de résistance à la déchirure...	179	100	92	164	150	112
	- Longueur de rupture (en km) .....	5,8	9,0	10,1	3,7	7,2	9,5
	- Coefficient de tenue au pliage .....	2.220	1.887	1.429	68	762	1.216
	- Indice d'éclatement ...	42	75	77	23	54	67

de la figure 2, mais sont moins nettes pour le feuillu étudié, l'Eucalyptus; on voit que pour le premier, indice d'éclatement et résistance à la déchirure varient en sens inverse, alors que pour le second, l'indice d'éclatement croît de façon très notable avec la proportion de bois initial, tandis que la résistance à la déchirure reste à peu près constante, et aurait même tendance à augmenter elle aussi légèrement.

EDLIN (op. cit.) a montré pour sa part que, pour un même poids superficiel, un papier à fort pourcentage de bois d'été comportait moins de fibres et moins de liaisons entre fibres qu'un papier plus riche en trachéides de printemps, mais ce même poids superficiel est obtenu à partir d'un volume de bois sur pied inférieur.

Il est possible de déterminer une valeur optimale de la texture permettant d'obtenir à la fois une bonne liaison entre fibres et une résistance à la déchirure élevée, mais ce pourcentage idéal de bois d'été varie d'une espèce à l'autre; WATSON et DADSWELL ont montré que, pour *Pinus taeda* et *Pinus pinaster*, cet optimum est atteint pour des proportions de bois d'été variant entre 20 et 50 % en poids, proportions qui sont quelquefois dépassées dans la nature;



pour *Pinus radiata*, au contraire, la présence de fibres à membranes épaisses n'améliore guère la résistance à la déchirure, tout en affectant de façon sensible les autres caractéristiques mécaniques; pour

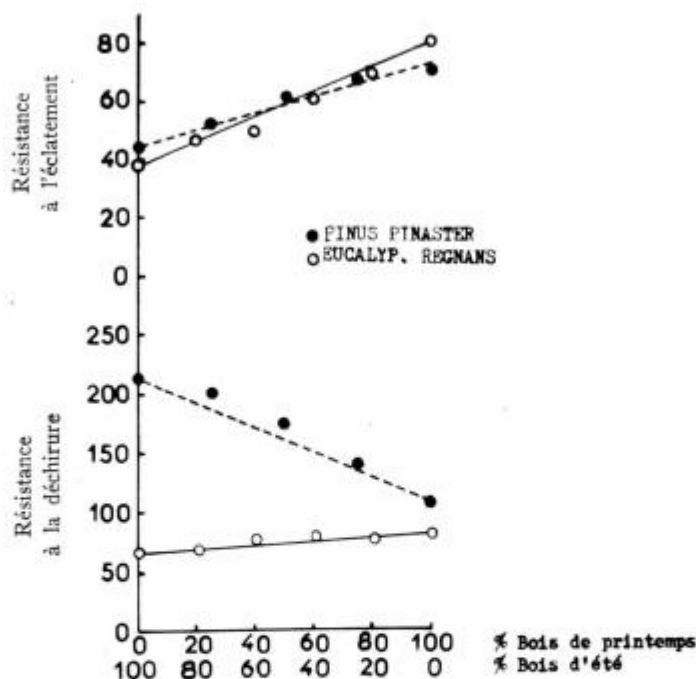


FIG. 2.

Caractéristiques papetières en fonction de la texture.

(d'après WATSON et DADSWELL.)

cette essence, la proportion optimale de bois final est de 25 % en poids; le pourcentage moyen normal étant très sensiblement inférieur à celui-ci, il y a donc tout intérêt à essayer, par voie de sélection ou d'hybridation, d'augmenter la texture jusqu'au seuil sus-indiqué, puisqu'un tel accroissement de la proportion de bois final entraîne corrélativement une augmentation très sensible du rendement en fibres.

Enfin, dans les pâtes de bois feuillus, les fibres à parois épaisses formées en fin de saison de végétation n'apportent aucune amélioration notable aux propriétés mécaniques du papier, mais, avec un raffinage prolongé, on peut aboutir avec elles à des caractéristiques très voisines de celles des fibres à parois minces. Il y a donc, pour

ces essences, un compromis à rechercher entre le désir d'avoir un bon rendement en fibres et la crainte de devoir engager des dépenses excessives pour leur raffinage.

### 33 — *Méthodes d'étude de la texture.*

Nous rangerons dans cette catégorie, aussi bien les méthodes donnant directement la valeur de la texture (et ne donnant que ce seul renseignement), que celles où l'on obtient le pourcentage de bois d'été, de façon indirecte, à partir de la détermination point par point de certaines caractéristiques elles-mêmes liées à la densité. Ces dernières, en effet, ne peuvent être considérées comme permettant d'étudier de façon précise les variations de la densité du bois (comme celles qui font l'objet du paragraphe 4), car les points de mesure sont, par la force des choses, relativement éloignés les uns des autres, et certains points remarquables des courbes de variations de densité, comme la densité maximale annuelle ou la densité minimale annuelle par exemple, peuvent très bien ne correspondre à aucun des points de mesure et, par suite, ne pas être mis en évidence.

### 331 — *Méthode basée sur une coloration du bois de printemps.*

Il est possible, pour certaines espèces comme le Douglas ou certains Pins, de distinguer, sans aucune préparation, le bois d'été à sa couleur plus foncée; une telle délimitation, qui peut être facilitée par un lissage de l'échantillon, n'est cependant guère précise, et ne peut, de plus, s'appliquer à la plupart des essences forestières.

Fort heureusement, on peut colorer artificiellement le bois de printemps en se basant sur le fait que ses membranes cellulaires minces absorbent plus facilement les solvants que celles du bois final; le problème essentiel qui se pose est de choisir un solvant tel qu'il pénètre suffisamment dans les parois des fibres du bois de printemps, et dans celles-là seulement; si l'on utilise un solvant de viscosité trop élevée (comme la glycérine), tout le bois de printemps n'est pas coloré, et on a une surestimation de la texture; avec l'alcool absolu, au contraire, même les membranes épaisses du bois final sont imprégnées, et l'on aboutit à une sous-évaluation; ce problème a été particulièrement étudié par ÅKE WIKSTEN (1954) qui, pour le Pin sylvestre et l'Epicéa commun, recommande une solution de 0,15 g de vert malachite et 0,15 g de bleu de méthylène dans 25 cm<sup>3</sup> d'alcool à 25°; mais la précision de la méthode dépend finalement de l'épaisseur propre des membranes de bois de printemps qui peut varier d'une façon assez sensible d'un individu à l'autre. Après lissage et coloration, l'évaluation de la largeur du

bois d'été se fait facilement en utilisant le microscope, le chariot et le dispositif imprimant de la machine d'EKLUND (1950).

332 — *Procédé photométrique.*

MÜLLER-STOLL (1947) a mis au point une méthode de détermination de la texture par analyse de la transparence d'une coupe microscopique; en employant un dispositif classique de mesure photométrique, on obtient, pour différentes zones réparties radialement à l'intérieur d'un accroissement annuel, des valeurs de l'intensité lumineuse transmise qui sont fonction de la densité du bois au point correspondant. Mais, il ne semble pas que cette fonction soit linéaire et, de plus, le procédé suppose que les coupes microscopiques utilisées aient une épaisseur rigoureusement constante, condition qui n'est pas toujours réalisée.

333 — *Méthode basée sur les changements de dureté du bois d'été.*

En raison de la corrélation étroite qui existe entre la densité et la dureté du bois, il est possible de connaître de façon approximative la répartition entre bois initial et bois final à l'intérieur d'un accroissement annuel en procédant à la détermination de la microdureté, par mesure, soit de la charge nécessaire pour enfoncer une aiguille à une profondeur déterminée à l'intérieur du bois, comme l'a proposé BÜSGEN (1904), soit de la profondeur d'enfoncement d'une aiguille sous une charge constante, comme l'a réalisé MAYER WEGELIN avec son Hårtetaster (1950); dans cette dernière méthode, l'échantillon utilisé est une simple rondelle de bois brute de sciage, et la détermination de la microdureté se fait tous les 0,25 mm, les déplacements de l'aiguille étant mesurés à 0,01 mm près. L'inconvénient du procédé tient aux interférences qui peuvent se produire entre les trous successifs, et aux risques de déviation de l'aiguille au contact des zones de plus grande dureté; enfin, il est nécessaire que les échantillons aient un taux d'humidité rigoureusement constant, car la dureté varie de façon très importante avec la teneur en eau.

334 — *Méthode faisant appel à un analyseur de dimensions des éléments cellulaires.*

KNIGGE et KOLTZENBURG (op. cit.) se sont attachés à obtenir une délimitation précise entre bois de printemps et bois d'été en se servant d'un analyseur de dimensions, dans lequel une tache lumineuse de diamètre connu permet de déterminer de façon exacte la fibre limite pour laquelle la variante de la définition de MORK qu'ils ont adoptée (voir paragraphe 31) se trouve vérifiée.

L'appareil est normalement prévu pour être utilisé sur une microphotographie, mais on peut également employer, avec une précision moindre il est vrai, un négatif obtenu par simple projection de la coupe microscopique, ou même une photographie fortement agrandie prise directement sur un échantillon de bois préalablement lissé et éclairé en lumière incidente; l'étude de KNIGGE et KOLTZENBURG montre que, pour certaines essences, comme le Sapin pectiné (*Abies alba* Miller.), la limite du bois d'été varie de façon importante d'une file radiale de cellules à une autre (l'écart pouvant atteindre jusqu'à 15 % de la largeur totale du cerne), en sorte que, pour un seul accroissement annuel, 12 déterminations au moins doivent être faites pour obtenir une moyenne valable.

### 335 — Méthode basée sur l'absorption des rayons $\beta$ .

Le principe de cette méthode décrite pour la première fois par CAMERON, BERRY et PHILLIPS (1959) est le suivant: un faisceau mince de rayons  $\beta$  est dirigé sur l'échantillon à analyser; les électrons de haut niveau énergétique dont il est formé perdent alors une partie de leur énergie par interaction avec les électrons périphériques des atomes constitutifs du matériau, dont le nombre dépend essentiellement de la quantité de matière ligneuse traversée; l'absorption du rayonnement  $\beta$  se faisant, à épaisseur constante, suivant une loi exponentielle en fonction de la densité de l'éprouvette d'essai dans la zone d'impact, le logarithme du nombre d'électrons ayant traversé l'échantillon est inversement proportionnel à la densité recherchée.

Au point de vue pratique, CAMERON utilisait une source de 1 millicurie de strontium 90, et le flux de rayons  $\beta$  émis était collimaté de façon à obtenir un faisceau de 0,5 mm de largeur dans le sens radial de l'échantillon sur 3 mm de longueur dans le sens tangentiel. L'éprouvette d'essai, constituée par un échantillon parallélépipédique de section  $8 \times 8$  mm, se déplaçait radialement sous l'effet d'une tige-poussoir fileté au pas d'un demi mm; la détermination du nombre de particules émergentes était faite tous les 0,5 mm à l'aide d'un compteur à scintillation couplé avec un amplificateur électronique, de façon que le temps de comptage n'excède pas une minute pour chaque point.

PHILLIPS (1960) a développé cette méthode, et a montré qu'elle permettait d'obtenir graphiquement la limite du bois d'été et du bois de printemps à partir du moment où l'on connaissait la densité du bois au point correspondant; il a également vérifié que les densités moyennes trouvées par ce procédé étaient très voisines des chiffres correspondants obtenus par les techniques habituelles de détermination de la densité globale, puisque l'erreur relative

moyenne sur 15 échantillons ne dépassait pas 3,2 % par rapport aux valeurs standard trouvées par la méthode de la saturation intégrale.

Ce procédé, qui marquait un progrès sensible par rapport aux méthodes précédemment utilisées, présentait l'inconvénient d'être assez lent, nécessitant l'établissement point par point, sur papier semi-logarithmique, des courbes représentatives des variations de la densité avant de pouvoir passer à la détermination du pourcentage de bois d'été; en outre, le pouvoir de résolution était, d'après PHILLIPS, relativement médiocre en raison de la largeur du faisceau de rayons  $\beta$  utilisé et des risques de diffusion du rayonnement dans l'épaisseur de l'échantillon.

#### 4 — Etude des variations de la densité.

##### 41 — *Intérêt des recherches sur les variations de la densité du bois.*

La texture du bois, bien qu'étant en relation étroite avec la densité, ne suffit cependant pas à elle seule à rendre compte des variations de celle-ci; c'est ainsi, par exemple, que pour différents peuplements d'épicéas de Suède, NYLINDER et HAGGLUND (1954) mentionnent que les variations de texture n'expliquent que 42 % de celles de la densité; il en est de même pour le Slash pine au Sud des Etats-Unis, où la part de la variabilité expliquée n'est que de 60 %.

La raison de cet état de choses doit bien entendu être recherchée dans le fait que la texture n'indique que le pourcentage relatif des fibres à paroi mince et large lumen d'une part, et des fibres à paroi épaisse et faible lumen d'autre part, distinguées les unes des autres d'une façon statique, sans que soit prise en considération la valeur absolue de l'épaisseur des membranes ou du diamètre des lumens.

Des exemples tendant à montrer l'insuffisance de la notion de texture ont été donnés pour le Chêne et le Frêne aux paragraphes 321 et 322. Un autre, particulièrement frappant, peut être trouvé dans une étude de PAUL et MARTS (1954) consacrée aux modifications du pourcentage de bois d'été consécutives à une irrigation artificielle du Longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.); une microphotographie figurant dans ce document montre clairement que, si la texture et la largeur des cernes sont considérablement plus élevées pour les années durant lesquelles l'arbre en cause a été irrigué, par contre, la densité propre du bois d'été a diminué, au point que les fibres formées en fin de saison de végétation, qu'il est impossible de discerner sur le cliché pour les années sans irrigation, deviennent parfaitement visibles après celle-ci grâce à une augmentation considérable du diamètre de leur lumen.

De même, la seule prise en compte de la densité globale d'un accroissement annuel ou de son pourcentage de bois d'été risque de masquer des phénomènes qui, du point de vue physiologique, peuvent présenter une certaine importance. C'est ainsi que SMITH (1956), étudiant sur des Douglas à larges accroissements annuels les variations de la densité et de la texture de la moelle vers l'écorce, a pu montrer que, si la densité et le pourcentage de bois d'été augmentaient lorsqu'on se rapprochait de celle-ci, l'évolution des densités propres du bois initial et du bois final était très différente, puisque celle du bois final allait aussi en augmentant, alors que celle du bois initial était, au contraire, pratiquement constante.

ZAHNER, LOTAN et BAUGHMAN (1964) de leur côté, étudiant l'effet de la sécheresse artificielle sur la texture du Pin rouge (*Pinus resinosa* Ait.), ont été amenés à distinguer les fibres aplaties radialement des fibres de bois d'été suivant la définition de MORK pour rendre compte parfaitement du phénomène, en observant notamment que le nombre de cellules de bois d'été était plus élevé dans les arbres irrigués, en s'en tenant à la définition de MORK, et, au contraire, dans ceux soumis à une sécheresse artificielle, en ne retenant que les cellules aplaties radialement.

L'adoption d'un critère universel basé sur les dimensions relatives des membranes et des lumens pour définir le passage du bois initial au bois final est d'ailleurs fortement critiquable, du seul fait qu'elle conduit à négliger la densité propre de l'un et de l'autre. FRY et CHALK (1957) ont parfaitement mis en évidence ce phénomène dans une étude consacrée à *Pinus patula* (Sch. et Cham.) dans les peuplements du Kenya; ces auteurs ont montré que, grâce à l'épaisseur relativement élevée de ses membranes, le bois de printemps de cette espèce a une densité comparable à celle du bois d'été de la plupart des essences résineuses européennes; une telle observation est extrêmement importante, non seulement au point de vue technologique, en raison du faible contraste de densité qui sépare bois initial et bois final, mais également au point de vue physiologique, l'épaisseur anormalement élevée des membranes au début de la saison de végétation pouvant s'expliquer dans une certaine mesure par un moindre renouvellement de la couronne vivante au printemps, et par de meilleures conditions de lumière et de température qui favorisent la photosynthèse, alors que l'humidité du sol lors du départ de la végétation est insuffisante pour permettre la formation de cellules de gros diamètre.

On peut donc dire avec HILDEBRANDT (1960) que la prise en considération du seul pourcentage de bois d'été est un pis-aller puisqu'on ne tient pas compte, en fait, de l'épaisseur des membranes cellulaires. De là découle l'intérêt des études portant sur les variations de la densité du bois.

## 42 — Méthodes d'étude des variations de la densité.

421 — Méthode basée sur l'absorption des rayons  $\beta$ .

Elle a été mise au point par PHILLIPS, ADAMS et HEARMON (1962) dans le but de porter remède aux difficultés que le premier avait rencontrées dans la détermination de la texture sur échantillons macroscopiques, en utilisant également l'absorption différentielle du rayonnement  $\beta$  par la matière (voir paragraphe 335 ci-dessus).

Le principal inconvénient observé lors de cette première tentative était, on l'a vu, le manque de précision dû à la largeur du faisceau employé qui, elle-même, se justifiait par la nécessité d'éviter des temps de comptage trop longs. PHILLIPS et al. se sont par suite résignés à prendre comme échantillons des coupes microscopiques de  $1/10^e$  de mm d'épaisseur; corrélativement, ils ont pu réduire

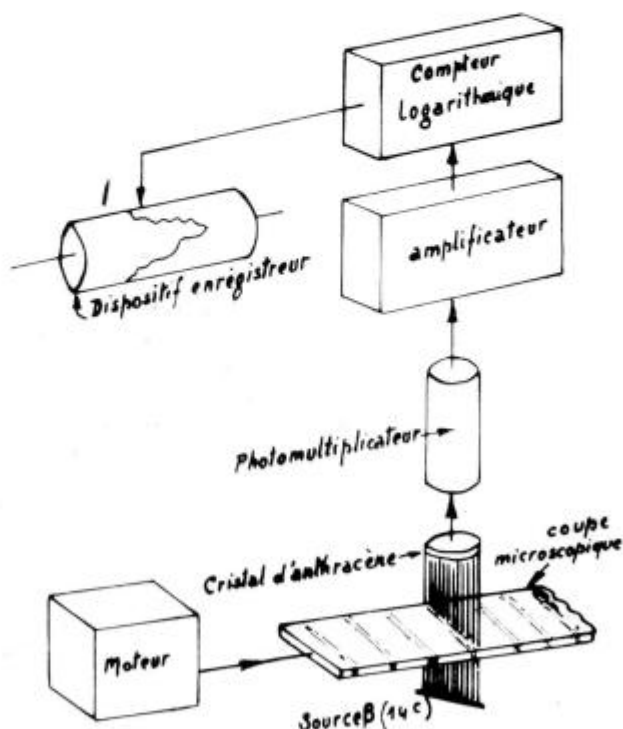


FIG. 3.

Appareillage pour l'étude des variations de densité par absorption des rayons  $\beta$ .

(d'après PHILLIPS et al.)

la largeur de la fente de collimation à 0,3 mm, tout en utilisant des rayons moins pénétrants, issus d'une source de carbone 14; l'échantillon étant beaucoup moins absorbant, le comptage des électrons l'ayant traversé ne doit plus maintenant se faire obligatoirement point par point, mais peut être l'objet d'un enregistrement continu, à une vitesse d'exploration qui est fixée à 2,5 cm à l'heure. La figure 3 représente un schéma de l'installation conçue à Princes Risborough pour la mise en œuvre de cette méthode.

Pour obtenir des coupes de bonne qualité, et surtout d'épaisseur rigoureusement uniforme (vérifiée sous microscope), les échantillons sont débités par tranches de 5 cernes, ce qui, en contrepartie, pose des problèmes de raccordement dès lors que l'on désire avoir un enregistrement intégral des variations radiales de densité sur des arbres âgés.

D'autres méthodes basées sur l'absorptiométrie  $\beta$  ont été élaborées dans plusieurs pays, et notamment en Allemagne par SANDERMANN, SCHWEERS et HOHEISEL (1963) qui obtiennent un enregistrement des variations de la densité, par une méthode continue, en utilisant des échantillons non microscopiques d'épaisseur variant entre 1 et 3 mm; la source employée est une source de 10 millicuries de strontium et yttrium 90 dont le faisceau  $\beta$  est collimaté pour explorer une surface de 0,5 mm de largeur sur 2 mm de longueur; malgré l'importance de la bande explorée qui nuit au pouvoir de résolution, la vitesse d'enregistrement est, comme dans le cas précédent, très faible: 20 mm à l'heure; de plus, SANDERMANN et al., n'utilisant pas un compteur logarithmique, doivent, pour obtenir des valeurs absolues de la densité, faire un premier enregistrement sur papier semi-logarithmique, et reporter les courbes point par point sur des papiers à graduation linéaire.

422 — *Méthode basée sur l'utilisation d'un analyseur de texture superficielle.*

Dans cette technique, à laquelle MARIAN et STUMBO (1960) ont attaché leurs noms, un stylet de dimension et de forme appropriées pénètre plus ou moins, suivant leur diamètre, dans les cavités cellulaires, et les variations de cette profondeur d'enfoncement sont enregistrées après amplification par un procédé électromécanique. L'appareil utilisé permet une analyse extrêmement fine, mais aussi très minutieuse, puisque l'échantillon doit être parfaitement lissé au préalable; en outre, du fait d'une certaine élasticité des membranes, le stylet peut s'enfoncer plus profondément dans des cellules à paroi mince que dans des cellules à paroi épaisse de même diamètre intérieur. Ceci expliquerait que la concordance entre les densités mesurées par cette méthode et celles obtenues par gravimétrie, par exemple, ne paraisse pas parfaite.



423 — *Méthode basée sur l'utilisation d'un microphotomètre enregistreur.*

Cette méthode, qui s'apparente à celle de MÜLLER STOLL, et qui a été mise au point par GREEN et WORRAL (1964), consiste à faire passer à une vitesse constante devant un objectif de microscope une coupe mince de l'échantillon à analyser; un flux lumineux traverse le spécimen, puis l'objectif et l'oculaire du microscope, et, après avoir été convenablement collimaté, est reçu sur un photomultiplicateur connecté avec un photomètre enregistreur. La vitesse d'exploration est encore assez réduite: 1 mm par minute.

La précision est bonne et le pouvoir de résolution élevé, mais il est indispensable d'utiliser des coupes microscopiques parfaitement colorées de façon que les membranes, aussi minces soient-elles, arrêtent totalement le faisceau lumineux incident; pour obtenir une coloration aussi uniforme que possible, les auteurs du procédé ont limité la taille des échantillons à 1 cm dans les directions radiale et tangentielle, ce qui entraîne la réalisation d'un grand nombre de coupes pour l'exploration des variations de densité sur des arbres de fort diamètre.

Le point des courbes d'enregistrement pris comme marquant le début du bois final est celui où le pourcentage de lumière transmis est égal à la moyenne arithmétique entre le pourcentage maximum et le pourcentage minimum de l'année considérée, en sorte que la texture varie avec la densité propre du bois initial et du bois final.

5 — **Principales options retenues pour la mise au point d'une nouvelle méthode d'étude des variations de la densité du bois.**

51 — *Choix de la méthode.*

L'analyse des variations de la densité du bois par voie gravimétrique ne paraît pas possible en l'état actuel des techniques, car elle exigerait des mesures de poids et de volume qui ne sauraient être que discontinues, alors que la densité elle-même varie d'une façon incessante d'un point à l'autre des échantillons.

L'étude et surtout l'enregistrement des variations de densité ne peuvent donc se faire que par l'intermédiaire d'un effet lui-même lié à la densité; dans cet esprit, on est naturellement amené à envisager l'utilisation de l'absorption différentielle, soit des rayonnements électro-magnétiques, rayons X ou rayons  $\gamma$ , soit des particules chargées, et notamment des électrons constitutifs du rayonnement  $\beta$ , qui sont, les uns et les autres, absorbés, à épaisseur d'échantillon constante, suivant une loi exponentielle en fonction de la densité.

Mais les rayons  $\gamma$ , dont les fréquences sont très élevées, sont beaucoup trop pénétrants pour permettre une analyse fine d'un matériau d'aussi faible densité que le bois; de plus, ainsi que l'ont montré notamment STANKO BADUN (1959), puis BECKER et BURMESTER (1962), ils exercent sur la matière ligneuse une action durable en modifiant, d'une façon variable suivant les essences et les doses utilisées, des caractéristiques aussi importantes que les résistances en compression ou en flexion statique, le travail au choc et même l'affinité pour l'eau; une méthode basée sur l'absorptiométrie  $\gamma$ , tout en étant non destructive, rendrait donc difficile l'utilisation ultérieure des mêmes échantillons pour des études de qualités physiques ou mécaniques.

Quant aux procédés faisant appel à l'absorption des rayons  $\beta$ , ils ont déjà été étudiés de façon approfondie dans de nombreux pays, et il semble peu probable qu'ils puissent désormais faire l'objet d'améliorations notables; or, on a vu dans l'analyse bibliographique précédente qu'ils nécessitent le recours à des échantillons d'épaisseur microscopique, si l'on veut obtenir une précision de mesure satisfaisante, et que, même lorsque cette condition est remplie, la vitesse d'enregistrement qu'ils permettent est relativement lente.

Ce sont ces inconvénients, aujourd'hui parfaitement admis, qui nous ont incité à explorer les possibilités d'utilisation des rayons X pour l'étude des variations de densité du bois.

## 52 — *Choix du matériel d'étude.*

La variabilité du matériau bois est telle que toute étude ayant pour but de faire apparaître des différences de propriétés physiques ou mécaniques entre essences, entre provenances, entre stations ou entre traitements, doit être basée sur l'analyse d'un nombre élevé d'échantillons, de façon à permettre une interprétation statistique des résultats, et à déterminer si les différences observées sont, ou non, significatives.

Un tel but ne peut guère être atteint en utilisant des éprouvettes obtenues par sciage, en raison des délais et de la somme de travail que représente leur préparation depuis le moment où l'on sélectionne sur le terrain les arbres à étudier.

Pour disposer d'un échantillonnage suffisant, on est donc amené à envisager l'utilisation de tests non destructifs, et dans cette optique, on pense tout naturellement à employer comme matériel d'étude les échantillons prélevés à la tarière de Pressler sur des arbres vivants, et désignés généralement sous le nom de « carottes de sondage ». Ces échantillons étaient à l'origine destinés essentiellement à analyser la vitesse de croissance des arbres, et à calculer, en fonction de celle-ci, la production des peuplements forestiers; mais la possibilité qu'ils offrent de réaliser rapidement cer-

taines recherches à caractère technologique a déjà été signalée (POLGE, 1962) et, pour les mêmes raisons, c'est aux carottes de sondage que l'on est tenté de recourir pour l'étude des variations de la densité du bois; un tel matériel présente l'avantage, étant prélevé radialement, de permettre de suivre ces variations durant toute la vie de l'arbre sur une seule éprouvette prise à hauteur d'homme, les changements qui interviennent en fonction de la hauteur pouvant, en cas de besoin, être analysés en procédant à plusieurs sondages à différents niveaux.

Un autre avantage très important de tels échantillons est qu'ils sont automatiquement calibrés au diamètre de la tarière utilisée, et que, par suite, ils ont une épaisseur constante suivant un plan diamétral; ils n'ont donc à subir aucune préparation supplémentaire, découpage, lissage ou coloration, en vue des études d'absorption aux rayons X.

Un procédé basé sur l'absorption différentielle des rayons X par une « carotte » prélevée à la tarière sur un arbre vivant est ainsi doublement non destructif.

— L'arbre étudié n'a pas à être abattu, sa croissance n'est pratiquement pas ralentie par la petite opération chirurgicale qu'il subit, et d'autres prélèvements analogues peuvent être exécutés, si nécessaire, pour vérification ou informations complémentaires.

— L'échantillon lui-même n'est pas détruit, ni ses caractéristiques affectées par l'exposition à un rayonnement d'énergie relativement faible; il demeure donc lui aussi disponible pour tout contrôle éventuel, et peut ensuite être utilisé pour d'autres déterminations (densité globale ou partielle par les méthodes traditionnelles, rétractibilité, caractéristiques papetières, etc...).

Il existe toute une gamme de tarières de diamètres différents dont les plus courants sont ceux de 3 mm, 5 mm et 11 mm; les échantillons de 11 mm de diamètre présentent l'inconvénient d'occasionner aux arbres un traumatisme important. A l'autre extrémité de la gamme, le choix de tarières de 3 mm de diamètre aurait au contraire l'avantage de réduire au minimum le dommage causé, mais, en contrepartie, la faible taille des carottes obtenues rend leur manipulation délicate; de plus, un infime déplacement latéral de part et d'autre d'un plan diamétral entraîne une variation rapide de l'épaisseur; en outre, il existe des essences à bois relativement friable pour lesquelles de petits arrachements de matière ligneuse peuvent se produire lors du prélèvement, surtout lorsque la tarière utilisée est insuffisamment affûtée; ces petits arrachements se traduisent par des modifications d'épaisseur, qui sont généralement minimes, mais dont l'incidence relative sur l'absorption augmente lorsque le diamètre de l'échantillon diminue. Enfin, ainsi qu'on le verra plus loin, le temps d'exposition nécessaire pour obtenir une image d'opacité et de contraste donnés est, à intensité constante, d'autant

plus grand que l'épaisseur est plus faible; de ce seul point de vue, et bien que cela puisse sembler de prime abord assez paradoxal, il y a donc tout intérêt à ne pas utiliser des échantillons de trop faible diamètre.

Pour toutes ces raisons, nous pensons que les échantillons prélevés à la tarière de Pressler de 5 mm sont les plus appropriés pour l'étude des variations de densité du bois basée sur les différences d'absorption du rayonnement X.

---

## CHAPITRE II

### GENERALITES SUR LES RAYONS X

---

#### 1 — Rappel de quelques notions relatives aux rayons X.

##### 11 — Définition et Production.

Les rayons X sont formés par des ondes électro-magnétiques transversales qui, comme la lumière, se propagent en ligne droite dans l'espace à la vitesse de  $3 \times 10^{10}$  cm/seconde; leur longueur d'onde peut varier à l'intérieur d'une gamme très étendue, de 0,0001 à 1 000 Å, mais les plus couramment utilisés le sont dans des limites beaucoup plus étroites, de 0,001 Å à 2,5 Å.

Le rayonnement X est émis lorsque des électrons animés d'une vitesse élevée sont brutalement arrêtés par un obstacle matériel.

Les générateurs les plus usuels sont constitués par des tubes à vide qui comprennent, d'un côté, une cathode dont le filament porté à incandescence émet des électrons par effet thermionique, de l'autre, une anode qui elle-même renferme une cible, ou anti-cathode, sur laquelle vient frapper le flux électronique projeté sur elle, à grande vitesse, sous l'effet d'un champ électrique de sens constant.

L'intensité du rayonnement dans un tel tube est fonction du nombre d'électrons émis, qui, à son tour, dépend de la température absolue du filament, donc finalement de l'intensité du courant électrique qui passe dans celui-ci; on l'apprécie généralement en mesurant l'intensité en milliampères du flux électronique lui-même.

On considère par ailleurs qu'un faisceau RX est formé d'un ensemble de photons, corpuscules de masse nulle au repos dont l'énergie est liée à la fréquence par la relation  $E = h \nu$ , dans laquelle  $h$  est la constante de Planck ( $6,62 \times 10^{-27}$  erg.s), ou encore, si l'on appelle  $c$  la vitesse de propagation du rayonnement ( $3 \times 10^{10}$  cm/s):  $e = hc/\lambda$ , dans laquelle  $\lambda$  est la longueur d'onde du rayonnement.

Or, la fréquence est elle-même fonction de la vitesse des électrons venant frapper l'anti-cathode, donc de l'intensité du champ accélérateur, et, par suite, de la différence de potentiel appliquée

aux bornes du tube, en sorte que le pouvoir de pénétration des rayons X est finalement gouverné par la tension accélératrice.

Pour un tube donné, dans lequel on ne modifie ni les matériaux constitutifs de l'anti-cathode, ni ceux de la fenêtre filtrante, les kilovolts accélérateurs et les milliampères du flux d'électrons suffisent donc à caractériser qualitativement et quantitativement l'émission.

La puissance transportée par un faisceau RX ne peut que très difficilement être appréciée par détermination de l'énergie calorifique correspondante, car le rendement du système est très faible (quelques dix millièmes). On ne peut donc qu'en obtenir une valeur indirecte en mesurant certains phénomènes physiques ou biologiques qui lui sont liés, par exemple l'ionisation de l'air, qui est utilisée pour la définition du röntgen (quantité de rayonnement qui produit une quantité d'électricité de 1 ués de chaque signe pour 0,00123 g d'air, c'est-à-dire pour 1 cm<sup>3</sup> d'air sec dans les conditions normales de température et de pression).

En fait, on peut estimer quantitativement un faisceau RX de deux façons : en se plaçant du point de vue de l'émetteur, on définit l'intensité du rayonnement, c'est-à-dire l'énergie transportée par unité de temps à travers une surface de section unité perpendiculaire au faisceau exprimée en erg/cm<sup>2</sup>/s, et du point de vue de l'objet irradié, on apprécie la dose reçue, c'est-à-dire une énergie par unité de poids exprimée en erg/g.

Une caractéristique très importante d'un faisceau de rayons X est sa composition spectrale : le rayonnement émis par un tube sous une tension donnée, à moins d'être filtré convenablement, ou de passer par un monochromateur, n'est pas constitué de radiations d'une longueur d'onde unique bien déterminée, mais comprend, au contraire, toute une gamme de longueurs d'onde largement étalée : c'est un rayonnement hétérogène ou polychromatique qui, lorsqu'on l'analyse, fournit un spectre continu auquel s'ajoutent éventuellement les raies caractéristiques de l'anti-cathode.

Ce spectre débute brusquement du côté des fréquences élevées à une longueur d'onde minimale ( $\lambda_0$ ) qui, selon la loi de DUANE, ne dépend que de la tension accélératrice :

$$\lambda_0 = \frac{hc}{Ve \cdot 10^{-8}}$$

dans laquelle  $h$  et  $c$  ont les mêmes définitions que ci-dessus,  $V$  est la tension utilisée (supposée continue), et  $e$  la charge de l'électron.

$\lambda_0$ , exprimé en Å prend donc la valeur arrondie suivante :

$$\lambda_0 = \frac{12\,400}{V}$$

De plus, la longueur d'onde dont l'intensité est maximale est liée à la précédente par une relation simple:  $\lambda_m = 1,5 \lambda_0$ ; on obtient ainsi pour les différentes tensions accélératrices des spectres continus analogues à ceux faisant l'objet de la figure n° 4.

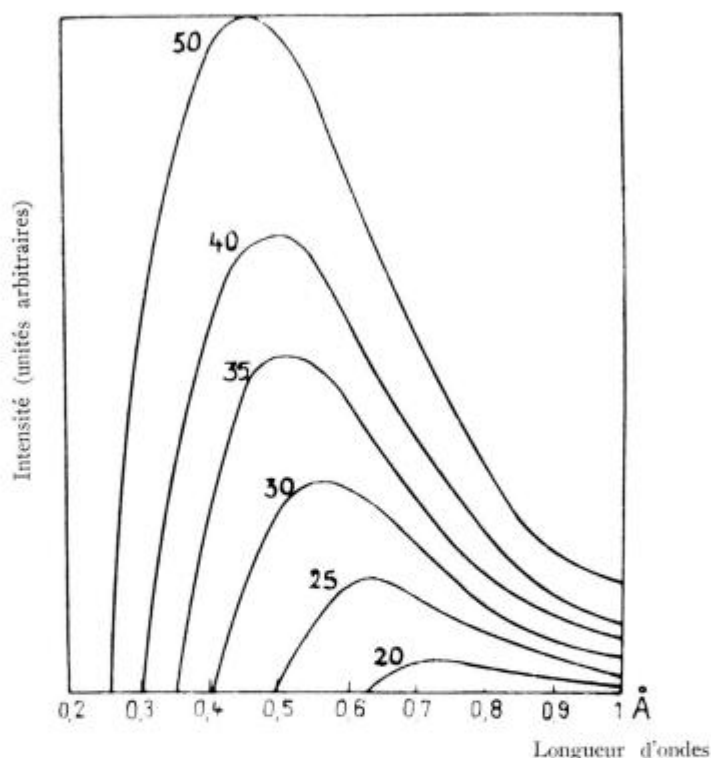


FIG. 4.  
Spectres continus pour différentes tensions accélératrices.  
(en kV)

## 12 — Propriétés des rayons X.

Ils sont absorbés différemment par la matière en fonction de la densité et de l'épaisseur de l'échantillon traversé; il est par suite possible d'obtenir, de la structure interne de celui-ci, une image qui peut, soit être fixée sur un film en utilisant une autre propriété des rayons X, leur aptitude à impressionner les émulsions au gélatinobromure d'argent (c'est la radiographie), soit être regardée directement sur un écran, grâce au pouvoir qu'ils possèdent d'exciter la fluorescence de certains sels (c'est la radioscopie).

Les spectres de rayons X peuvent, lorsque la tension accélératrice dépasse certaines valeurs limites, présenter des raies caractéristiques

de l'anti-cathode (raies d'émission) ou des discontinuités caractéristiques de la substance irradiée (discontinuités d'absorption) qui, par spectrométrie, sont susceptibles de servir de base à des méthodes très précises d'analyse chimique.

Les rayons X peuvent, dans certaines conditions, ioniser les gaz, être réfléchis, réfractés ou polarisés, et surtout être diffractés par les cristaux, les spectres obtenus permettant alors de déterminer les caractéristiques des édifices atomiques qui les constituent.

Les rayons X exercent également une action mutagène, et ont en outre le pouvoir de tuer, de façon sélective, certaines cellules vivantes en voie de multiplication rapide, d'où leur utilisation thérapeutique.

Quelques renseignements sommaires sur certaines de ces applications seront donnés à l'occasion des utilisations qui en ont été faites en matière de recherches forestières, les phénomènes d'absorption et d'effet photographique, bases de la méthode proposée, faisant l'objet de développements plus importants dans la 2<sup>e</sup> partie de cette étude.

## 2 — Utilisation des rayons X en matière de recherches forestières.

### 21 — *Etude des insectes xylophages.*

FISCHER et TASKER (1940) ont été, semble-t-il, les premiers à préconiser l'emploi de la radiographie pour ce genre de recherches, et, à leur suite, de nombreux chercheurs se sont lancés dans cette voie particulièrement féconde; en France, JACQUOT (1961) a fait le point des résultats obtenus en la matière, et montré l'intérêt des rayons X pour les analyses de routine des produits insecticides destinés à la préservation du bois; il a expliqué l'opacité des insectes xylophages aux rayons X par l'accumulation dans leur corps d'éléments tels que le phosphore et le soufre, qui sont des constituants importants des molécules de protéines animales, ou le sodium, le calcium et le fer, qui interviennent dans le métabolisme de ces organismes; ces éléments ayant un poids atomique notablement plus élevé que le carbone, l'oxygène et l'hydrogène, qui sont les trois constituants essentiels de la matière ligneuse, leur forte concentration dans les tissus des larves rend ceux-ci beaucoup moins transparents que le bois pour les rayons X.

JACQUOT signale également que certaines galeries d'insectes, contrairement à ce qu'on pourrait penser, sont plus opaques au rayonnement que le bois qui les environne; c'est le cas lorsque les galeries sont pleines de sciure comprimée, dont la densité deviendrait supérieure à celle du bois lui-même, et qui, de plus, pourrait être traversée plus difficilement par les rayons X que la matière ligneuse, à cellulose régulièrement orientée, du bois non attaqué.



S'il est assez difficile, avec une radiographie unique, d'apprécier d'une façon exacte tous les détails d'une implantation de galeries qui s'étend en général dans un espace à trois dimensions, l'utilisation de deux stéréoradiographies prises sous des angles différents est susceptible de pallier cette difficulté et de permettre de localiser, d'une façon précise, la totalité des larves à l'intérieur des éprouvettes d'essais.

## 22 — *Recherches sur la préservation du bois.*

D.-S. BELFORD a développé (1961), à l'occasion de la réunion annuelle de l'Association britannique pour la préservation du bois, une technique d'étude de la répartition et du dosage des substances antiseptiques ou des produits ignifuges à l'intérieur des pièces traitées, basée sur l'analyse spectrographique aux rayons X.

Lorsqu'un faisceau de rayons X de haute énergie est dirigé sur un échantillon de matière, celui-ci émet, quel que soit son état physique, solide, liquide ou pulvérulent, un rayonnement secondaire caractéristique des éléments chimiques qui le composent. Ceci se produit lorsque l'énergie de la source incidente est suffisante pour expulser des électrons d'une couche interne K, L ou M dans les atomes de la substance absorbante.

Lorsqu'un électron est arraché d'une orbite à haut niveau énergétique, un autre électron d'une orbite à niveau inférieur doit venir le remplacer pour rétablir l'équilibre. L'énergie de ce transfert est dissipée sous forme d'un quantum de rayons X dont la longueur d'onde dépend de la différence de niveau énergétique de l'électron entre l'état initial et l'état final. On obtient ainsi des raies caractéristiques dont les plus intenses sont les raies K correspondant à l'expulsion d'un électron d'une orbite de même nom; il est possible, en recevant le rayonnement secondaire émis par la matière irradiée sur un analyseur monocristallin, de déterminer la longueur d'onde de ces raies caractéristiques et d'en mesurer l'intensité. La position des raies suffit à permettre l'identification des éléments constitutifs du matériau traversé, ou tout au moins, de ceux dont le nombre atomique est assez élevé pour que les longueurs d'onde caractéristiques puissent être mesurées de façon simple à l'aide d'un réseau cristallin. Dans la pratique, il suffit de recevoir le rayonnement secondaire sur un spectromètre, de déterminer d'une façon précise l'emplacement des raies caractéristiques, et d'en mesurer l'intensité par des moyens variés (compteur Geiger, compteur proportionnel, compteur à scintillation), non seulement pour déceler la présence de certains éléments chimiques, mais encore, pour peu que l'on dispose d'une courbe d'étalonnage, pour avoir une bonne approximation de leur teneur à l'intérieur de l'échantillon.

En utilisant cette méthode, BELFORD a pu doser, à différentes profondeurs à l'intérieur d'un bois, certains sels antiseptiques à

base de zinc, cuivre, chrome et arsenic, ou des produits d'ignifugation dans la composition desquels rentrent le soufre ou le phosphore. Malheureusement, le procédé est inapplicable, dans la pratique courante, lorsque l'élément actif est le bore ou le fluor dont les nombres atomiques sont trop faibles pour qu'il soit possible d'en obtenir les raies caractéristiques; les produits organiques ternaires, comme les créosotes, ou même quaternaires, sont, pour la même raison, exclus du domaine d'application de cette méthode.

### 23 — *Recherches relatives à la qualité des graines forestières.*

L'utilisation de la radiographie pour la sélection de semences de bonne qualité (élimination des graines vides ou sans embryon, ou encore des graines attaquées par des insectes) est relativement ancienne; CLARK (1947) en signalait déjà l'intérêt, et surtout mentionnait l'avantage qu'il y aurait à employer des faisceaux de longueur d'onde bien définie (par exemple raie K du molybdène), permettant d'avoir des images plus nettes et plus contrastées, donc de détecter des détails plus fins qu'avec les faisceaux polychromatiques des appareils de radiographie habituels.

MÜLLER-OLSEN et SIMAK (1954) ont rendu compte des résultats obtenus pour l'analyse du pouvoir germinatif des graines de Pin sylvestre en décrivant la technique opératoire qui, depuis, a été utilisée pour la plupart des graines forestières.

En France, BOUVAREL et LEMOINE (1959) ont insisté sur l'avantage de cette méthode d'étude en faisant ressortir notamment tout l'intérêt qu'elle présente, grâce à son caractère non destructif, pour déterminer la qualité de lots de semence ne comportant qu'un nombre restreint de graines. Ils ont montré que la possibilité qui est ainsi offerte de disposer de graines sans défaut est particulièrement bénéfique pour la réalisation d'essais comparatifs en pépinière, la présence d'une proportion notable de graines vaines étant susceptible de déséquilibrer complètement les dispositifs statistiques et, par suite, de rendre délicate l'interprétation des résultats.

### 24 — *Microradiographie.*

A l'occasion du Congrès International pour l'Exploitation et l'Utilisation rationnelles du bois, LEGRAND (1946) a exposé les avantages de la microradiographie pour les études de structure fine du bois: en utilisant un rayonnement très mou, émis par des tubes spéciaux alimentés sous une tension de 1 à 4 kV, il est possible de radiographier des échantillons de quelques centièmes de mm d'épaisseur, et le cliché obtenu, pour peu que l'on emploie des films ou des plaques à grains extrêmement fins, peut être agrandi jusqu'à 800 fois si nécessaire.

Les images sont différentes de celles que l'on peut observer par simple examen microscopique, puisque l'absorption des rayons X varie comme le cube des numéros atomiques des éléments rencontrés; il est ainsi possible de localiser certains éléments minéraux à poids atomique élevé, et surtout d'étudier la répartition dans le bois des sels de cuivre, de mercure ou d'arsenic utilisés pour son imprégnation.

Dans son ouvrage de base sur « les Rayons X et leurs Applications », édition française de 1961, CLARK signale également l'intérêt des rayons X à très grande longueur d'onde pour les études histologiques du bois en indiquant qu'il est possible, par microradiographie, d'observer des détails d'aussi faibles dimensions que les cristaux d'oxalate de calcium que l'on trouve dans de nombreux bois, et notamment dans certains Chênes américains. Il ajoute que des fiches de détermination ont été dressées dans son Laboratoire qui permettent d'identifier un morceau de bois ou de sciure par simple examen microradiographique.

#### 25 — *Dénombrement et étude de largeur de cerne.*

Le chercheur forestier suisse LENZ (1957) a publié une étude remarquable sur « l'utilisation de la radiographie pour l'examen des couches d'accroissement »; c'était, semble-t-il, la première fois que les rayons X étaient employés pour irradier des échantillons prélevés à la tarière de Pressler. Il décrivait les diverses conditions à remplir pour avoir une image nette, mais préconisait l'utilisation d'appareils radiographiques médicaux, qui ne sont cependant pas les plus aptes à fournir un contraste satisfaisant avec un matériau à faible densité comme le bois; de plus, LENZ faisait état de la nécessité rigoureuse qu'il y aurait à introduire la tarière dans l'arbre perpendiculairement au fil du bois, alors qu'il est aisé de corriger un défaut de perpendicularité en inclinant les échantillons sur le film lors de la radiographie, en suivant une méthode qui sera exposée plus loin.

LENZ avait déjà observé, à l'occasion de cette étude, la remarquable différenciation obtenue sur les films entre le bois d'été et le bois de printemps mais, faute sans doute de travailler sur des clichés de qualité suffisante, il ne pensait pas pouvoir aller au-delà d'une détermination subjective, conseillant pour des mesures exactes de texture sur des essences à passage progressif de s'en rapporter à d'autres méthodes: la méthode micrométrique de VON PECHMANN (1954) basée sur une représentation graphique des variations d'épaisseur des membranes, ou celle de MAYER WEGELIN (op. cit.) s'appuyant sur les changements de la microdureté dans le cerne.

26 — *Détermination de la densité.*

WORSCHITZ a décrit, à l'occasion du Congrès de Nancy de l'Union Internationale des Instituts de Recherches Forestières (1932), trois méthodes permettant de connaître d'une façon approximative la densité globale d'échantillons de bois de forte épaisseur en utilisant diverses propriétés des rayons X. Ce travail, qui présente quelque analogie, assez lointaine il est vrai, avec celui que nous poursuivons, fera l'objet d'un résumé assez détaillé.

261 — *Procédé radiographique.*

WORSCHITZ définit d'abord l'irradiation optimale comme étant la quantité de rayonnement (produit de l'intensité par la durée de l'exposition) qui donne le meilleur contraste de noircissement, sans préciser d'ailleurs comment est apprécié ce contraste, ni comment sont éliminées les variations du noircissement dues à des causes différentes, telles que la température ou l'usure du révélateur par exemple. Il détermine ensuite les irradiations optimales pour toute une gamme d'épaisseurs d'échantillon comprises entre 1 et 15 cm, la distance entre la source et le film restant fixée à 40 cm et le rayonnement utilisé étant produit par un tube à anti-cathode de tungstène sous une tension de 50 kV. Les irradiations optimales ainsi obtenues sont les suivantes :

TABLEAU n° 2

Irradiation optimale en fonction de l'épaisseur de bois traversée.  
(pour une tension de 50 kV)

Epaisseur en cm	Irradiation optimale en mA. s
1 .....	18
2 .....	40
3 .....	72
4 .....	105
5 .....	140
6 .....	182
7 .....	230
8 .....	280
9 .....	315
10 .....	350
11 .....	385
12 .....	430
13 .....	480
14 .....	525
15 .....	560

En appréciant le noircissement par mesure photométrique sur une base 100 égale à la déviation maximale du galvanomètre correspondant au noircissement provoqué par une irradiation de 100 milliampères seconde sur une éprouvette de densité 1 et d'épaisseur 5 cm, WORSCHITZ a établi le tableau d'équivalence suivant :

TABLEAU n° 3

Relation entre le degré de noircissement et la densité du bois.

Degré de noircissement en %	Densité
—	—
0,3 .....	400
0,4 .....	490
0,5 .....	530
0,6 .....	570
0,7 .....	630
0,8 .....	670
0,9 .....	730
1,0 .....	800

Cette méthode, dans laquelle on admet que le noircissement provoqué par l'irradiation optimale est constant pour une densité donnée, quelle que soit l'épaisseur de l'échantillon, repose sur un certain nombre d'hypothèses qui ne sont qu'approximativement exactes ; elle est de plus sujette à des possibilités d'erreurs tenant, par exemple, au vieillissement de la source lumineuse du photomètre, qui ne peuvent être évitées que moyennant un réajustement périodique du noircissement étalon.

#### 262 — Procédé ~~photométrique~~ spectrométrique

On a vu que, lorsque l'on applique aux bornes d'un tube à rayons X une tension inférieure à la valeur critique au-delà de laquelle apparaissent les raies caractéristiques de l'anti-cathode, il émet un spectre continu qui commence à une longueur d'onde dont la valeur en angströms est liée à la différence de potentiel exprimée en volts par la relation :

$$\lambda_0 = \frac{12\,400}{V},$$

et que le rayonnement non filtré passe par un maximum d'intensité pour une longueur d'onde égale à 1 fois et 1/2 la longueur d'onde minimale.

Lorsqu'un tel rayonnement traverse la matière, son spectre se trouve modifié, et l'on obtient des courbes dites « de filtre » dans lesquelles les intensités diminuent d'autant plus que les longueurs d'onde augmentent. Le rayonnement s'affaiblit donc davantage dans la partie correspondant à des rayons mous que dans celle des rayons durs à faible longueur d'onde, et les rayons filtrés par la matière irradiée deviennent donc relativement plus durs qu'ils n'étaient à l'émission.

WORSCHITZ a par suite pensé utiliser pour ses études sur le bois le degré de durcissement des rayons X, qui est d'autant plus grand que le filtrage est plus fort, c'est-à-dire que la densité et l'épaisseur de la matière traversée sont plus élevées. Dans cet esprit, il a tracé l'ensemble des spectres continus, obtenus toujours avec un tube à

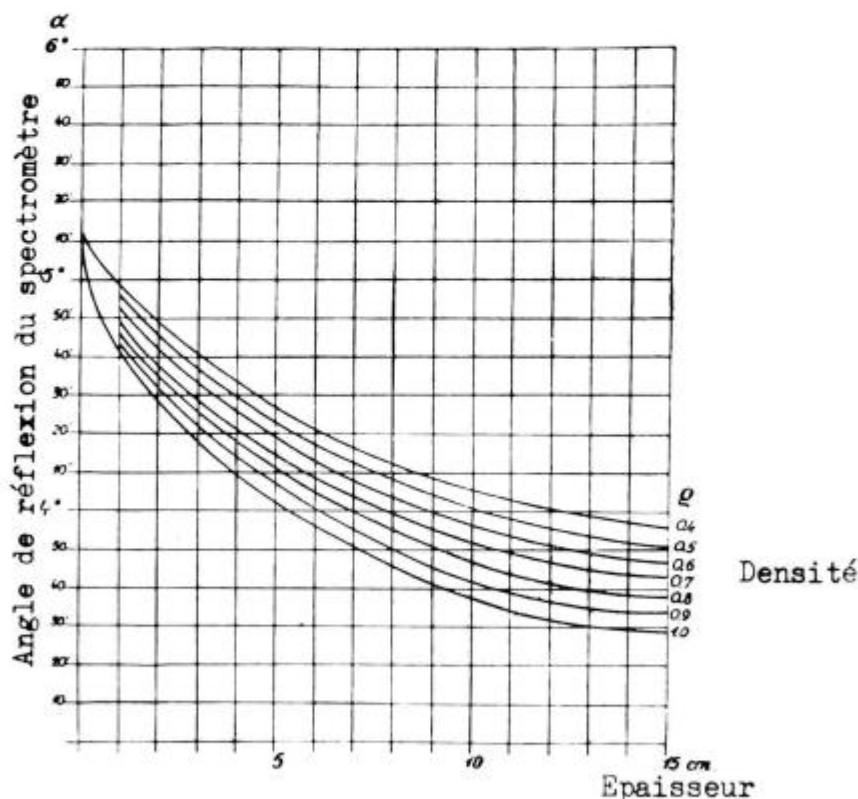


FIG. 5.

Durcissement du spectre continu par des échantillons de différentes épaisseurs en fonction de la densité du bois.

(d'après WORSCHITZ.)

anti-cathode de tungstène sous une tension de 50 kV pour des échantillons de bois de 1, 5, 10 et 15 cm d'épaisseur, et pour des densités variant de 0,4 à 1. Il a ainsi établi un nomogramme, représenté sur la figure n° 5, sur lequel sont portés en ordonnées les angles de réflexion du spectromètre à cristal de chlorure de sodium correspondant à la longueur d'onde pour laquelle l'intensité est maximale.

Cette méthode nécessite donc la détermination préalable de l'intensité maximale qui, à l'époque où WORSCHITZ poursuivait ses travaux, se faisait par mesure de la déviation de la feuille d'un électromètre branché sur une chambre d'ionisation. L'angle du spectromètre pour lequel cette intensité est atteinte est reporté, en même temps que l'épaisseur de l'échantillon, sur le nomogramme; on obtient ainsi, par extrapolation entre les courbes qui y figurent, la densité du bois, mais le seul examen du graphique montre que, pour les échantillons de faible épaisseur tout au moins (1 à 5 cm), la précision de cette détermination est assez faible.

#### 263 — Procédé « jonctométrique ».

Dans ce procédé, WORSCHITZ utilise, contrairement au précédent, une tension supérieure à la tension critique (qui est dans le cas particulier de 70 kV) et un filtre en platine et en iridium de façon à exciter les raies K du tungstène, et à n'exciter pratiquement qu'elles seules.

La méthode est basée sur la détermination du degré d'affaiblissement de ces raies après passage dans des échantillons de bois de

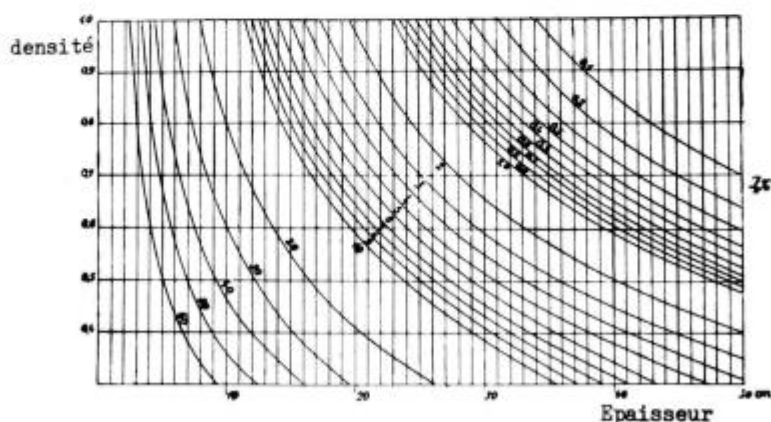


FIG. 6.

Affaiblissement des raies K du Tungstène  
en fonction de l'épaisseur et de la densité de l'échantillon.  
(d'après WORSCHITZ.)

densité variant de 0,4 à 1, et d'épaisseurs comprises entre 1 et 50 cm. L'affaiblissement du rayonnement est exprimé en fonction du temps de décharge d'un électromètre, la base 100 correspondant au temps observé pour un bois de 0,4 de densité et de 1 cm d'épaisseur. Il suffit de se reporter au nomogramme faisant l'objet de la figure n° 6, sur lequel les chiffres inscrits à côté de chaque courbe indiquent le pourcentage du temps de décharge par rapport au temps maximum de base, pour obtenir la densité de l'échantillon.

Cette méthode, qui exige des délais assez longs, sauf si on utilise des tensions très élevées, paraît surtout intéressante pour la détermination de la densité sur des échantillons de forte épaisseur, mais elle est d'une mise en œuvre assez complexe; elle ne permet pas de recueillir d'autres renseignements que la seule détermination de la densité moyenne d'un échantillon, qui pourrait être obtenue plus rapidement et avec une plus grande précision par les méthodes traditionnelles.

---





## DEUXIÈME PARTIE

### EXPOSE DE LA METHODE

---

#### CHAPITRE I

#### BASES THEORIQUES DE LA METHODE PROPOSEE

---

##### 1 — Absorption des rayons X.

###### 11 — Formules générales de l'absorption.

###### 111 — Absorption linéaire et absorption massique.

Quant un flux de rayons X d'intensité  $I$  traverse, perpendiculairement à sa surface, un échantillon mince de bois d'épaisseur infiniment petite  $dx$ , l'intensité du faisceau transmis est, si l'on suppose la fraction du rayonnement absorbé proportionnelle à l'épaisseur de la couche absorbante, diminuée d'une quantité  $dI$ , telle que :

$$\frac{dI}{I} = -\mu_1 dx \quad (1)$$

Le coefficient  $\mu_1$ , qui dépend de la longueur d'onde du rayonnement et de la nature de l'échantillon absorbant, est désigné sous le nom de coefficient d'absorption linéaire, et représente la fraction d'énergie absorbée par un volume de  $1 \text{ cm}^3$ , lorsque le flux incident a une section de  $1 \text{ cm}^2$ .

Si l'on se réfère, non plus au volume, mais au poids de matière traversée, la fraction d'énergie absorbée par gramme d'un corps de densité  $\rho$  est, pour un faisceau de  $1 \text{ cm}^2$  de section, égale au coefficient d'absorption massique  $\mu_m$ , qui est lié au précédent par la relation :

$$\mu_m = \frac{\mu_1}{\rho} \quad (2)$$

d'où :

$$\frac{dI}{I} = -\mu_m \rho dx$$

On a donc pour une épaisseur finie  $x$  :

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^x -\mu_m \rho \cdot dx$$

d'où l'on tire les formules fondamentales de l'absorption :

$$\text{Log}_e I - \text{Log}_e I_0 = -\mu_m \rho x \quad (3)$$

ou encore :

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x}$$

dans laquelle  $I_0$  est l'intensité du rayonnement incident (pour  $x = 0$ ).

On voit que, si l'épaisseur reste constante, le logarithme de l'intensité du rayonnement transmis est une fonction linéaire de la densité. Si épaisseur et densité varient,  $\log I$  dépend de leur produit qui est égal au poids superficiel.

#### 112 — *Absorption atomique et absorption moléculaire.*

Si, au lieu de se référer à la fraction d'énergie d'un faisceau de  $1 \text{ cm}^2$  de section absorbée par  $\text{cm}^2$  ou par gramme de matière, on évalue celle qui l'est par un atome, on définit un coefficient d'absorption atomique  $\mu_a$  tel que :

$$\frac{dI}{I} = -\mu_a dn \quad (4)$$

où  $dn$  est égal au nombre d'atomes irradiés.

Pour un faisceau ayant une section transversale égale à  $1 \text{ cm}^2$ , la valeur de  $dn$  peut être calculée par la formule :

$$dn = \frac{N \rho dx}{A} \quad (5)$$

dans laquelle  $\rho$  est la densité du corps absorbant.  $A$  son poids atomique, et  $N$  le nombre d'Avogadro, le rapport  $A/N$  représentant

par conséquent la masse d'un atome du corps; on voit que, d'après les équations 1, 4 et 5 précédentes, le coefficient atomique est lié au coefficient d'absorption linéaire par la relation:

$$\mu_a = \mu_l \times \frac{A}{\rho N} \quad (6)$$

De plus, de la comparaison des équations 2 et 6, il résulte que le coefficient d'absorption massique est égal à  $N/A$  fois le coefficient d'absorption atomique:

$$\mu_m = \mu_a \left( \frac{N}{A} \right) \quad (7)$$

Pour un corps composé, de formule  $X_a Y_b Z_c$ , on admet, et cette hypothèse est vérifiée, tout au moins d'une façon approximative, dans la plupart des cas, qu'un coefficient d'absorption moléculaire  $\mu_{mol}$  peut être défini à partir des coefficients d'absorption atomique des divers corps simples qu'il contient, tel que:

$$\mu_{mol} = \frac{ax\mu_X + by\mu_Y + cz\mu_Z}{ax + by + cz} \quad (8)$$

dans laquelle  $\mu_X, \mu_Y, \mu_Z$  sont les coefficients d'absorption des atomes X, Y et Z, et x, y, z, leur poids atomique.

Si on connaît la composition centésimale en poids du corps composé, c'est-à-dire le pourcentage  $P_X$  du corps de coefficient d'absorption atomique  $\mu_X$ , etc..., la formule devient:

$$\mu_{mol} = \frac{P_X \mu_X + P_Y \mu_Y + P_Z \mu_Z}{100} \quad (9)$$

### 113 — Application au calcul du coefficient d'absorption du bois.

Si l'on néglige, en première approximation, les substances diverses: pigments, résine, protéides ou matières minérales, qui ne représentent qu'un faible pourcentage du poids total du bois, le coefficient d'absorption de la matière ligneuse peut être calculé en utilisant les formules précédentes à partir de ceux des constituants principaux: la cellulose, les hémicelluloses et la lignine.

La composition centésimale en poids de la cellulose (formule globale simplifiée  $C_6H_{10}O_5$ ), ainsi que, à très peu de choses près, celle

des hémicelluloses (hexosane, pentosane et polysaccharides principalement) est :

$$\begin{aligned} \text{C} &= 44 \% \\ \text{H} &= 6 \% \\ \text{O} &= 50 \% \end{aligned}$$

et celle de la lignine (formule simplifiée  $\text{C}_9\text{H}_9\text{O}_3\cdot\text{OCH}_3$ ) :

$$\begin{aligned} \text{C} &= 61 \% \\ \text{H} &= 6 \% \\ \text{O} &= 33 \% \end{aligned}$$

Sur ces bases, et en utilisant la formule 9, on peut calculer le coefficient d'absorption massique de la cellulose et de la lignine à partir des coefficients atomiques de C, H et O, tels qu'ils sont donnés dans les tables de VICTOREEN (1950).

Pour une longueur d'onde de 1 Å, on obtient ainsi un coefficient d'absorption de 2,29 pour la cellulose, et 1,97 pour la lignine.

Pour un bois ayant une teneur en poids de 70 % en produits cellulosiques et dérivés et de 30 % en lignine, on peut calculer un coefficient d'absorption pour la matière ligneuse proprement dite :

$$\frac{\mu}{\rho} \text{ (mat. ligneuse)} = \frac{70 \times 2,29 + 30 \times 1,97}{100} = 2,19$$

Mais le bois comprend, outre la matière ligneuse, des vides importants, et pour obtenir le coefficient d'absorption du bois, il faut tenir compte d'un « coefficient de remplissage », rapport de la densité du bois à celle de la matière ligneuse, qu'on admet être constamment égale à 1,53.

Pour un résineux de densité 0,51 par exemple, on aboutit ainsi finalement, toujours avec un rayonnement monochromatique de longueur d'onde 1 Å, à un coefficient d'absorption massique particulièrement faible de 0,73 ; pour le même bois, mais avec une longueur d'onde de 1,5 Å, le coefficient serait de 2,33.

## 12 — Influence de la qualité du rayonnement sur l'absorption.

Le coefficient d'absorption massique  $\mu/\rho$ , défini au paragraphe précédent, est un coefficient global qui est, en fait, égal à la somme de deux coefficients distincts : le coefficient d'absorption dû à la diffusion  $\sigma/\rho$ , et celui correspondant au rayonnement de fluorescence émis  $\tau/\rho$ .

Le premier est lié au rayonnement diffusé proprement dit, c'est-à-dire au rayonnement de même longueur d'onde que le rayonnement incident qui est renvoyé par les atomes du corps irradié dans toutes les directions de l'espace.

Quant au second, appelé aussi coefficient d'absorption vrai, il tient compte à la fois d'un rayonnement électronique secondaire et du

rayonnement X de fluorescence qui sont émis lorsqu'un photon X expulse un électron des couches profondes d'un des atomes rencontrés.

Le coefficient  $\sigma/\rho$  est faible par rapport au coefficient d'absorption vrai, et de plus à peu près constant (de l'ordre de 0,17), tout au moins pour les atomes légers qui constituent l'essentiel de la matière ligneuse.

Le coefficient d'absorption par effet photoélectrique, au contraire, varie à la fois avec la longueur d'onde du faisceau et le nombre atomique  $Z$  des éléments irradiés; il est, en première approximation, proportionnel, dans un domaine de longueurs d'onde situé entre deux discontinuités d'absorption, au cube de l'une et de l'autre de ces deux caractéristiques (loi de BRAGG et PIERCE).

On a donc pour le bois la formule empirique suivante:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\tau}{\rho} \approx 0,17 + C Z^3 \lambda^3 \quad (10)$$

où  $C$  est un coefficient qui reste constant dans de très larges intervalles de longueurs d'onde, mais varie brusquement lorsque celle-ci est égale à la valeur critique d'absorption de l'un des constituants du corps irradié.

Or, ces discontinuités d'absorption correspondent à des fréquences telles que:

$$\sqrt{\nu} = K (Z - a)$$

en sorte que leur longueur d'onde varie à peu près comme l'inverse du carré du nombre atomique, et que, pour le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, constitutifs de la matière ligneuse, les hypothétiques raies d'absorption sont en dehors du domaine normal d'émission des tubes à rayons X ordinaires.

La formule 10, qui peut, par suite, s'appliquer sans restriction pour les études envisagées, est extrêmement importante:

Le fait que le coefficient d'absorption varie comme le cube du nombre atomique explique que le bois soit particulièrement transparent aux rayons X.

Quant à l'influence de la longueur d'onde, elle rend compte du durcissement d'un faisceau hétérogène quand il traverse la matière, puisque la partie molle du rayonnement (zone des basses fréquences) est beaucoup plus absorbée que la partie dure.

C'est également pour cette raison que, lorsqu'on diminue la tension accélératrice, occasionnant par le fait même un déplacement de l'ensemble du spectre continu vers les grandes longueurs d'onde, l'intensité du rayonnement transmis est considérablement réduite, en sorte que, pour obtenir une même dose à la sortie de l'échantil-

lon, il faut augmenter d'une façon très importante les temps de pose; en fait, le rendement énergétique du tube intervient aussi pour expliquer le phénomène, puisque lui aussi diminue en même temps que la différence de potentiel appliquée.

En raison enfin du durcissement d'ensemble du spectre continu consécutif à toute absorption, il faudra, dans les applications pratiques, réduire dans toute la mesure possible la filtration due à la fenêtre du tube émetteur, et même se poser la question de savoir s'il n'y a pas lieu d'éliminer cette autre filtration non négligeable qui est occasionnée par la couche d'air traversée.

## 2 — Choix entre les différentes méthodes possibles de mesure du rayonnement absorbé.

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer l'intensité des rayons X, mais seul un petit nombre d'entre elles permet un enregistrement continu des variations de celle-ci.

Les plus courantes sont les méthodes directes qui utilisent, soit les phénomènes d'ionisation des gaz (compteur proportionnel, compteur Geiger-Müller), soit ceux de fluorescence de certains cristaux provoqués par les photons du rayonnement X (compteur à scintillation).

Ces méthodes directes peuvent paraître à première analyse très séduisantes pour résoudre le problème qui nous intéresse, puisqu'il serait possible, à l'aide de compteurs logarithmiques, d'avoir, sans aucune opération intermédiaire, un enregistrement pouvant être gradué directement en densité; malheureusement, les rayons X mous qui, du fait de la transparence du bois à ce type de rayonnement, peuvent seuls permettre un contraste satisfaisant, sont faiblement ionisants; par suite, on ne pourrait procéder à une analyse rapide des variations de la densité qu'en utilisant un faisceau large, donc en sacrifiant la précision de la méthode, et dans l'option contraire, la recherche d'un pouvoir de résolution élevé nécessiterait une exploration à vitesse très réduite, d'où impossibilité d'analyser, dans chaque cas, un nombre d'échantillons suffisant pour pouvoir obtenir des moyennes statistiquement valables; de plus, il arrive que les échantillons prélevés à la tarière de Pressler présentent des défauts de rectitude après séchage, ou des défauts de perpendicularité par rapport aux zones d'accroissements; l'emploi d'une méthode directe avec de tels échantillons serait aléatoire, car il faudrait disposer d'un chariot porte-échantillons dont l'orientation puisse varier en cours d'exploration, ce qui occasionnerait des difficultés de réalisation certaines.

En outre, les carottes analysées peuvent recéler des anomalies de structure interne: nœuds, poches de résine notamment, qui faussent considérablement la densité du bois, et qui, de plus, ne

sont pas toujours décelables extérieurement sur des échantillons bruts; avec une méthode directe par comptage, l'élimination de ces points aberrants n'est pas possible.

Pour ces raisons, nous avons pensé que la méthode la plus appropriée pour répondre au but poursuivi consisterait à utiliser l'action photographique des rayons X, en se basant sur le principe que les différences d'absorption liées aux différences de densité se traduisent par des variations dans le noircissement des clichés radiographiques obtenus, variations qui peuvent, à leur tour, être analysées, et même enregistrées automatiquement à l'aide d'appareils spécialement conçus à cet effet.

Le premier avantage d'une telle méthode doit être de permettre un gain de temps considérable par rapport aux méthodes directes, par le seul fait qu'il est possible de radiographier ensemble, sur un même film, un grand nombre d'échantillons, et que, grâce à l'existence de photomultiplicateurs à haut rendement électronique, l'exploration de la densité photographique peut se faire à très grande vitesse, même si, pour obtenir un pouvoir de résolution élevé, on est amené à employer un spot lumineux de faible largeur.

Les défauts de rectitude ou de perpendicularité ne posent pas de problèmes insolubles, ainsi qu'on le verra dans le chapitre suivant.

Lorsque les échantillons présentent des anomalies internes, il est possible, en utilisant l'action photographique des rayons X, de voir ces défauts lors d'une première étape (radiographie), et, par suite, soit d'éliminer complètement l'échantillon coupable avant la deuxième étape (exploration densitométrique), soit de supprimer seulement la partie recélant l'anomalie, ou, au contraire, de la conserver volontairement, et d'en établir un profil de densité en toute connaissance de cause, pour étudier précisément l'influence du défaut préalablement repéré sur la densité du bois.

Enfin, la réalisation de radiographies dans une phase intermédiaire permet de conserver l'image de la structure interne de tous les échantillons analysés; on peut ainsi les détruire dans une étape ultérieure pour procéder à des essais divers (rendement en fibres, teneur en produits extractibles, rétractibilité par tranches pluri-annuelles, etc...), en gardant la possibilité de se reporter aux clichés de la « radiothèque » pour y trouver l'explication de tel ou tel résultat qui paraîtrait surprenant.

### 3 — Action photographique des rayons X.

#### 31 — *Rappel de quelques notions de photographie.*

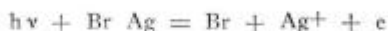
Les couches sensibles utilisées en photographie ou en radiographie présentent à l'état vierge une coloration jaunâtre; même après une exposition à la lumière, les modifications qu'elles subissent ne



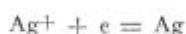
sont pas directement perceptibles, car l'image latente qui s'y trouve dissimulée doit être révélée, puis stabilisée avant de devenir visible.

Le mécanisme de la formation de l'image latente n'est pas parfaitement connu, mais la théorie la plus plausible peut être résumée comme suit :

Lorsqu'un quantum d'un rayonnement électromagnétique d'énergie  $h\nu$  atteint une molécule de bromure d'argent, il libère par effet photo-électrique l'électron de valence du brome suivant l'équation :



Cette opération n'intervient que lorsque l'énergie du photon est suffisamment grande ; au cas contraire, c'est-à-dire lorsque la fréquence est faible, donc la longueur d'onde élevée, aucune image latente n'est formée, ce qui explique que l'on puisse éclairer un film radiographique ou certains films photographiques non chromatisés, ou orthochromatiques, en lumière rouge. Mais, dans le cas où l'énergie est suffisante, l'électron libéré se déplace dans le cristal jusqu'à un centre de sensibilité superficiel constitué par une impureté localisée (en général du sulfure d'argent) en déchargeant les ions interstitiels  $\text{Ag}^+$  qui sont transformés en atomes d'argent-métal, suivant l'équation :



et en formant ainsi un germe de développement situé au contact du centre de sensibilité.

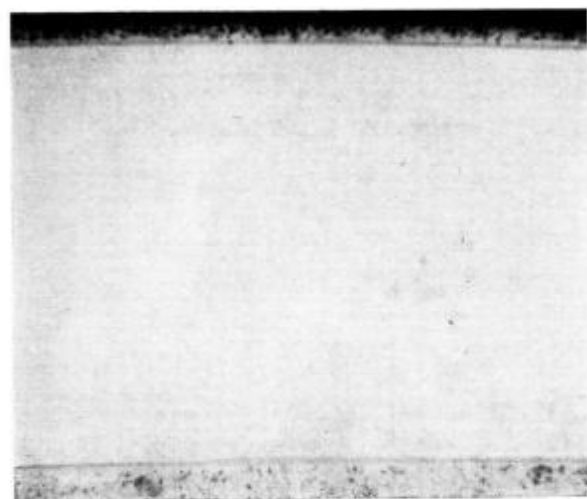
Lors du développement, le révélateur, qui est un réducteur, transforme en argent-métal les cristaux de bromure d'argent porteurs de l'image latente, et non les autres, et l'acide bromhydrique obtenu est neutralisé, au fur et à mesure de sa formation, par une base (généol ou diaminophénol).

### 32 — *Différences dans le mode d'action des rayons X et de la lumière sur les émulsions photosensibles.*

Les choses ne se passent pas exactement de la même façon avec les rayons X, car ceux-ci, ayant un pouvoir de pénétration beaucoup plus élevé que la lumière, peuvent arracher des électrons dans les couches profondes des ions constituant le cristal de bromure d'argent, qui vont à leur tour décharger un nombre élevé d'ions  $\text{Ag}^+$ , ce qui entraîne une concentration importante en atomes d'argent. Le rendement quantique de la photolyse est donc bien meilleur qu'avec la lumière, et au lieu d'avoir approximativement un atome d'argent par photon, on en obtient plusieurs centaines, leur nombre étant proportionnel à la fréquence du rayonnement.

DIRECTION DU RAYONNEMENT INCIDENT

Lumière



Rayons X

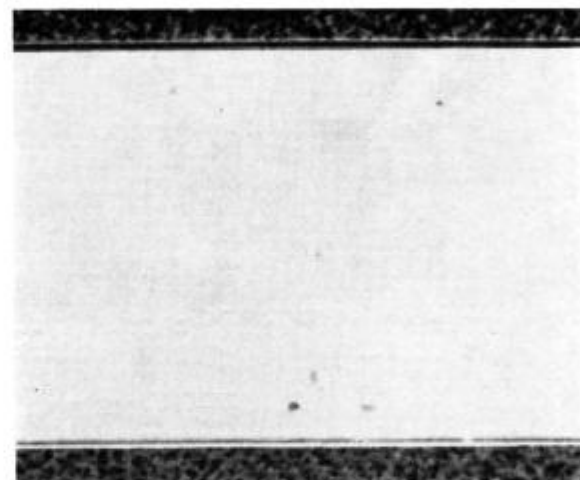


FIG. 7.

Micrographies à  $G \times 200$  de deux coupe microscopiques  
faites dans un même film exposé, à gauche à la lumière, à droite aux rayons X.

Malgré cela, le rendement du système film-rayons X est très inférieur à celui du système film-lumière, à cause de la différence d'absorption des deux radiations par l'émulsion: la couche au gélatino-bromure, très opaque à la lumière, a un coefficient d'absorption  $\mu$  très élevé pour le rayonnement à grande longueur d'onde de celle-ci; pour les rayons X, au contraire, ce coefficient, qui est, on l'a vu, proportionnel au cube du nombre atomique, est faible pour les divers constituants de l'émulsion; les films sont, par suite, traversés facilement par les rayons X, en sorte qu'il y a souvent intérêt à transformer en lumière une partie plus ou moins importante du rayonnement X par le jeu d'écrans renforceurs fluorescents.

Le coefficient d'absorption peu élevé de l'émulsion pour les rayons X a d'autres applications sur le plan pratique: alors que pour les films photographiques il est sans intérêt d'augmenter l'épaisseur de l'émulsion, puisque la lumière est arrêtée par les cristaux les plus superficiels qui, seuls, reçoivent l'image latente, avec les rayons X, au contraire, il y a tout avantage à recourir à des émulsions épaisses, puisque celles-ci sont facilement traversées par le rayonnement, et que, par suite, les cristaux les plus internes peuvent aussi bien recevoir l'image latente que les cristaux superficiels.

Une autre conséquence de la forte transparence de l'émulsion au gélatino-bromure, comme d'ailleurs de celle du support en acétate de cellulose pour les rayons X, est l'emploi possible en radiographie de films émulsionnés sur les deux faces du support; l'absorption par la face antérieure et par la pellicule est suffisamment faible pour que la face postérieure reçoive une proportion élevée du rayonnement incident, et contribue, par suite, à la formation de l'image latente en augmentant la sensibilité du film, ce qui permet de réduire les durées d'exposition; le seul inconvénient pratique de cette solution est que, du fait de l'épaisseur non négligeable du support (de l'ordre de grandeur de 0,2 mm), un détail très fin de l'objet radiographié peut former deux images légèrement décalées sur les couches antérieure et postérieure de l'émulsion, lorsque l'axe du rayonnement au point considéré n'est pas exactement perpendiculaire à la surface du film, mais ceci est sans importance pour la plupart des applications courantes.

La différence d'action des deux sortes de rayonnement (lumineux et X) sur les émulsions au gélatino-halogénure est illustrée par la figure n° 7, qui regroupe les photographies de deux coupes microscopiques réalisées au laboratoire dans un même film radiographique émulsionné sur les deux faces, et exposé séparément à la lumière et aux rayons X; on peut voir que, dans le premier cas, les grains d'argent développés sont surtout concentrés dans la couche la plus superficielle de la face supérieure située du côté de

la source émettrice; leur nombre diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de la surface, et ils sont à peu près absents de la face inférieure.

Avec les rayons X, au contraire, les grains développés sont répartis dans toute l'épaisseur des deux couches émulsionnées, bien que l'action du révélateur, qui doit diffuser dans la gélatine et qui, de plus, s'use dans son travail de réduction, devienne moins efficace au fur et à mesure que l'on pénètre en profondeur.

### 33 — Définition de quelques caractéristiques photométriques.

Si l'on fait traverser un film photographique ou radiographique par un faisceau lumineux d'intensité  $I_0$ , et si  $I$  est l'intensité transmise par le film en un point donné, on appelle transparence le rapport  $I/I_0$ ; l'opacité, qui est l'inverse de la transparence, est par suite définie par le rapport  $I_0/I$ , et l'on désigne sous le nom de densité optique, ou densité photographique, le logarithme décimal de l'opacité:

$$D = \log \frac{I_0}{I}$$

La densité optique a été adoptée comme principale caractéristique sensitométrique, d'une part, parce que l'œil humain apprécie les noircissements sous une forme logarithmique, d'autre part, parce que la densité est, en première analyse, proportionnelle à la quantité d'argent réduit, une densité de 1, par exemple, correspondant à peu près à la présence sur un film de 0,01 mg d'argent métal par  $\text{dm}^2$ . De plus, l'opacité varie d'une façon extrêmement rapide d'un point à l'autre d'un même cliché, pour peu que celui-ci soit bien contrasté, et seule l'utilisation d'une unité logarithmique permet l'établissement de courbes de noircissement dont l'échelle ne soit pas trop étendue.

Il est extrêmement difficile de définir et de mesurer une densité absolue car celle-ci dépend des dimensions du faisceau incident et varie de plus suivant que la détermination est faite en lumière diffuse ou en lumière parallèle. On se contente donc en général d'apprécier des différences de densités en décrivant dans chaque cas le type d'appareil et les caractéristiques de la fente d'exploration utilisée. Le plus souvent, il est fait usage dans ce but de « coins optiques de densité variable », c'est-à-dire de dispositifs formés de deux lames de verre enserrant entre elles une matière opaque (gélatine colorée d'encre de Chine) dont l'épaisseur va en augmentant d'une façon très régulière d'une extrémité à l'autre.

Dans les chapitres suivants, la lettre  $D$  désignera aussi bien la densité optique elle-même, que l'unité de mesure de celle-ci.

34 — *Courbes de noircissement.*341 — *Courbes de noircissement d'une émulsion photographique exposée à la lumière.*

Si l'on porte en ordonnées les densités photographiques, et en abscisses les logarithmes de l'exposition, c'est-à-dire du produit de l'éclairement par le temps, on obtient, dans le cas d'une exposition à la lumière, une courbe analogue à celle faisant l'objet de la figure n° 8, sur laquelle on peut distinguer 4 phases:

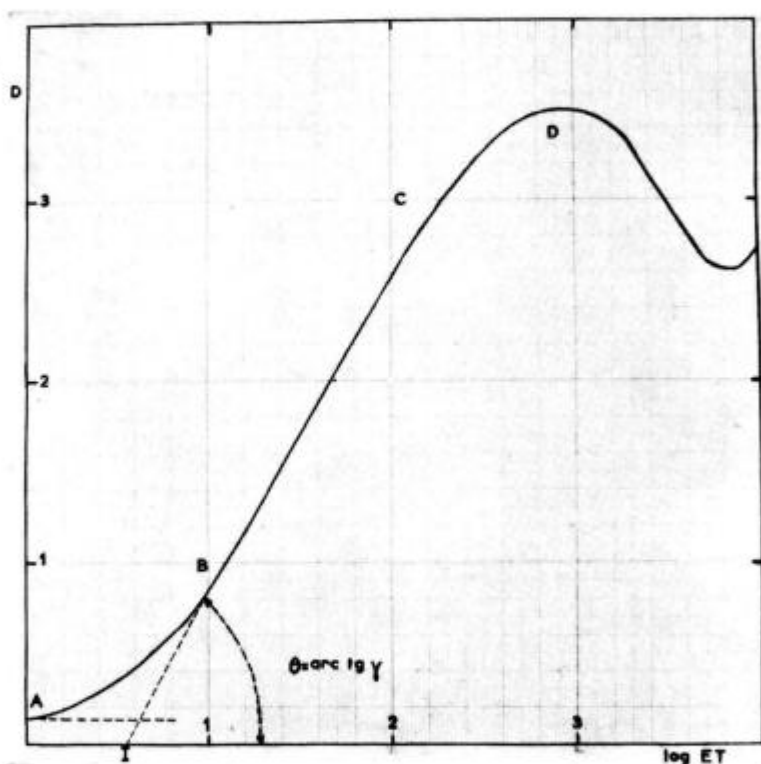


FIG. 8.

Courbe de noircissement d'une émulsion photographique exposée à la lumière.

a) une première représentée par la portion AB de la courbe appelée région de sous-exposition, dans laquelle on observe une concavité vers le haut,

b) une phase linéaire BC correspondant à la région dite de pose normale,

c) une phase de sur-exposition pour laquelle la portion de courbe CD est concave vers le bas,

d) une phase dite de solarisation, au-delà de D, où plusieurs inversions successives peuvent apparaître sur la courbe et dans laquelle, en particulier, il arrive qu'une majoration de l'exposition entraîne une diminution de la densité photographique; seules, les portions de courbe AB et BC ont un intérêt dans la pratique courante. Si l'on prolonge la portion BC jusqu'au point de rencontre I avec l'axe des abscisses, la distance OI représente l'inertie de l'émulsion; la pente de la partie BC, supposée rigoureusement rectiligne, correspond au facteur de contraste  $\gamma$  qui a donc pour valeur:

$$\gamma = \frac{\Delta D}{\Delta(\log. E)}$$

De plus, on constate que la courbe de noircissement ne passe pas par l'origine, c'est-à-dire que, pour une exposition nulle, la densité photographique n'est pas elle-même nulle, à cause du voile chimique de l'émulsion, l'ordonnée OA étant désignée sous le nom de densité du voile.

Si, au lieu d'inscrire en abscisses le logarithme de l'exposition, on y porte l'exposition elle-même, la courbe obtenue commence par une partie à peu près linéaire dans la zone des densités optiques inférieures à 1 (zone de sous-exposition) et présente, par la suite, une concavité vers le bas.

#### 342 — *Courbes de noircissement d'une émulsion radiographique exposée aux rayons X (fig. n° 9).*

Elles diffèrent des précédentes aux deux points de vue suivants:

1° Il n'y a pas, dans le cas d'une exposition aux rayons X, de seuil au-delà duquel l'effet photographique commence à se manifester, c'est-à-dire que la courbe de noircissement part de l'origine ou d'un point extrêmement voisin de celle-ci.

2° La courbe ne comporte pas de partie absolument rectiligne, mais présente, même en dehors de la zone de sous-exposition, une concavité tournée vers le haut; cependant, il existe toujours une zone plus ou moins étendue suivant les émulsions et les conditions de développement pour laquelle l'erreur commise en assimilant la courbe de noircissement à une ligne droite peut être considérée comme négligeable dans la pratique.

Si l'on confronte la densité photographique, non plus avec le logarithme de l'exposition, mais avec l'exposition elle-même, on

trouve, comme pour les émulsions photographiques, une partie initiale rectiligne qui correspond en première analyse à la zone des densités inférieures à 1.

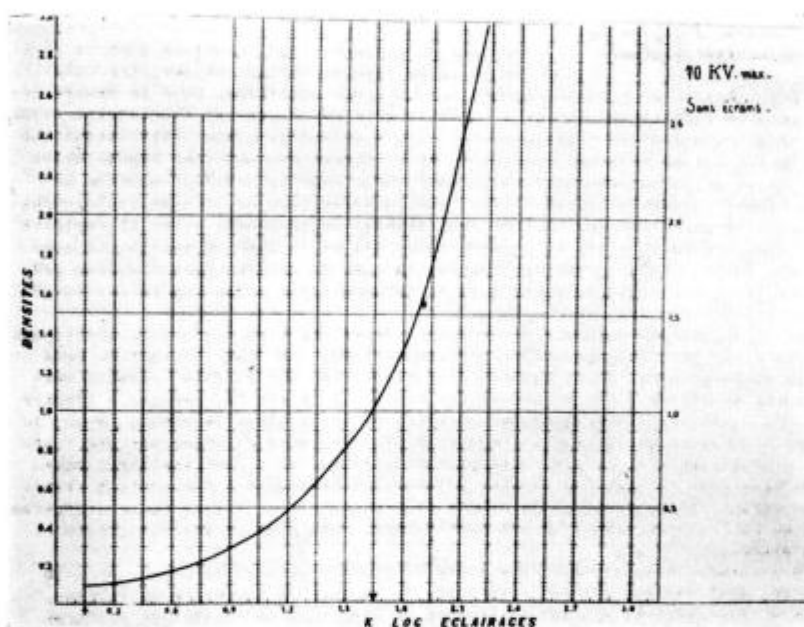


FIG. 9.

Courbe de noircissement d'une émulsion radiographique  
exposée aux rayons X.

(d'après BARBOTIN.)

343 — *Courbes de noircissement d'une émulsion radiographique exposée à la lumière (fig. n° 10).*

C'est le cas des émulsions utilisées avec écrans renforçateurs qui subissent, en général, un traitement préalable appelé maturation, dont le but est précisément d'augmenter leur sensibilité à la lumière; ce résultat est acquis en les soumettant pendant un certain temps à un chauffage à une température voisine de 60°, en présence d'une faible quantité d'ammoniaque, ce qui a pour effet de multiplier, à la surface des cristaux, les centres de sensibilité constitués par des traces de sulfure d'argent. Lorsque ces films sont impressionnés par la lumière de fluorescence des écrans, les courbes de noircissement obtenues sont très semblables à celles des films photographiques ordinaires exposés à la lumière, c'est-à-dire qu'elles compor-

tent une partie assez étendue, pour laquelle il y a une relation linéaire entre la densité optique et le logarithme de l'exposition.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer les différences d'action de la lumière et des rayons X sur une même émulsion; d'après BARBOTIN (1941-1942), la première partie incurvée des courbes de noircissement, dans le cas d'une exposition à la lumière,

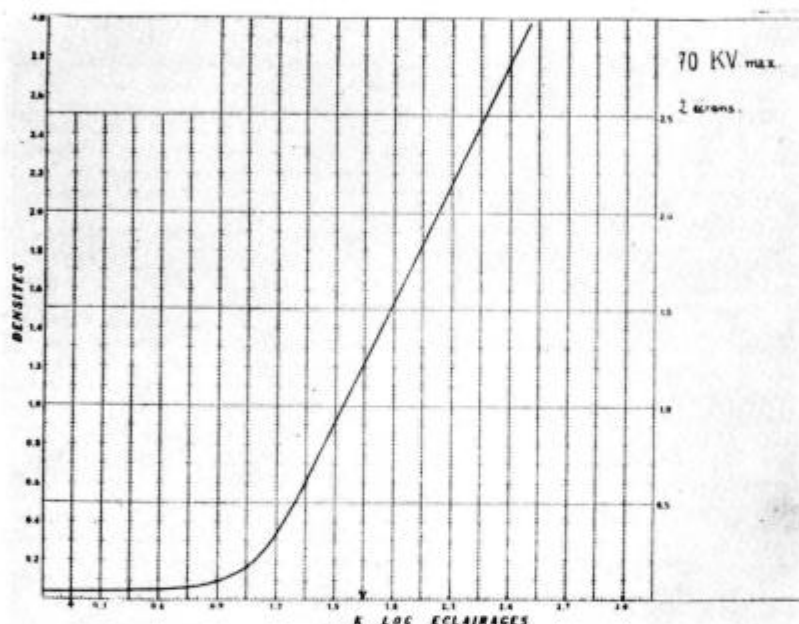


FIG. 10.

Courbe de noircissement d'une émulsion radiographique  
exposée à la lumière.

(d'après BARBOTIN.)

correspond au moment où seuls les grains superficiels sont impressionnés, la partie rectiligne, au contraire, représentant une période d'exposition dans laquelle la quantité d'argent réduit est fonction de l'épaisseur de la couche sensible traversée par une quantité de lumière suffisante pour obtenir une image latente; avec les rayons X, l'absorption est négligeable, et l'intensité de la radiation à peu près constante, quelle que soit l'épaisseur traversée; tout se passe par suite comme si on avait affaire à une couche unique de cristaux, ce qui correspond à la première phase observée dans le cas d'une exposition à la lumière, et expliquerait que la courbe de noircissement soit toujours concave vers le haut.



35 — *Anomalies du noircissement.*

En dehors du phénomène de solarisation aux très fortes expositions dont il a été question plus haut, diverses anomalies peuvent se présenter à la suite de phénomènes intervenant durant le développement.

351 — *Effet Eberhard.*

Lorsqu'une plage de densité très élevée se trouve immédiatement à côté d'une plage à faible opacité, un accroissement anormal de la transparence de la seconde et du noircissement de la première peut être observé au voisinage de leur limite commune. Ceci tient au fait que, dans une région fortement impressionnée, la concentration locale élevée en produits usés gêne l'action du révélateur; à proximité d'une plage claire, ces produits diffusent vers la zone voisine où leur concentration est plus faible, d'où un meilleur développement, et, par suite, un noircissement plus intense. En bordure de la plage ayant reçu la plus faible exposition, au contraire, les produits usés en provenance de la partie limitrophe à forte opacité restreignent le travail de réduction du révélateur, et, comme conséquence, une plus forte transparence apparaît près de la lisière mitoyenne.

L'effet Eberhard peut être important, si l'on n'y prend garde, dans les radiographies de bois, puisque les limites d'accroissements annuels sont automatiquement marquées par des zones à fort contraste de noircissement.

Dans les pays anglophones, on désigne (WILSEY, 1934) sous le nom de Mackie line un phénomène qui rend compte d'une partie de l'effet Eberhard, à savoir l'apparition d'une ligne claire, à proximité d'une zone de forte densité photographique, due à la diffusion latérale du révélateur dans la gélatine qui vient limiter le développement de la plage moins exposée située à proximité immédiate.

L'effet Eberhard peut être presque entièrement supprimé, sauf dans le cas de contraste particulièrement élevé entre les deux plages voisines, par un sur-développement qui permet une action prolongée du révélateur, et une agitation continue des bains qui favorise le remplacement des produits usés par du révélateur actif sur toute la surface du cliché.

352 — *Effet Kostinski.*

Cette anomalie de développement se produit dans le cas où l'objet comporte des points de forte densité très voisins l'un de l'autre, et séparés par une zone plus claire; la concentration en produits usés étant plus forte entre les deux images qu'à l'extérieur, il peut arriver que les deux maximums de noircissement se trouvent déportés vers l'extérieur, c'est-à-dire finalement, que la distance entre images soit supérieure à la distance réelle entre objets.

Ce phénomène ne peut se produire, en matière de radiographie du bois, que sur des clichés sur lesquels on chercherait à apprécier des écartements entre vaisseaux dans des essences à zone poreuse; son importance pratique est donc, dans le cas particulier, assez limitée.

Les diverses anomalies du développement sont surtout à redouter avec les émulsions à forte épaisseur, ce qui est le cas des films radiographiques ordinaires; il est donc très important pour ceux-ci de prendre les précautions signalées en prolongeant la durée de développement, et en assurant une agitation continue du révélateur.

### 36 — *Effets des divers facteurs de l'exposition.*

#### 361 — *Effets conjugués de l'intensité du rayonnement et du temps d'exposition.*

Sur les courbes de noircissement sont généralement portées en abscisses les valeurs de l'exposition (ou de son logarithme), c'est-à-dire du produit de l'intensité du rayonnement (lumière ou rayons X) par le temps d'exposition, et on admet en première analyse qu'il peut y avoir compensation entre l'une et l'autre de ces deux variables, en sorte que l'effet photographique ne serait fonction que du produit de l'une par l'autre.

Cette hypothèse avait été formulée dès 1860 par BUNSEN et ROSCOE sous forme d'une loi, dite loi de réciprocité, qui a reçu leurs noms, et suivant laquelle, pour un même noircissement :

$$I \times t = \text{constante.}$$

En fait, dans le cas des émulsions photographiques soumises à la lumière, cette loi n'est vraie que pour les densités voisines de 1, et pour une gamme de temps d'exposition peu étendue; si ces conditions ne sont pas réunies, la loi de réciprocité se trouve en défaut, et on ne peut obtenir une même opacité qu'en recourant à la formule de SCHWARZSCHILD (1889):

$$I \times t^p = \text{constante.}$$

Or, dans le cas des rayons X, la loi de réciprocité de BUNSEN et ROSCOE se trouve pratiquement vérifiée pour toute la gamme de densités photographiques correspondant à une exposition normale, ce qui, d'après TELLEZ-PLASENCIA (1956), est dû au fait que les photo-électrons primaires ou secondaires libérés par l'absorption d'un seul photon ont une énergie suffisante pour créer un germe de développement irréversible.

Cette interchangeabilité de l'intensité du rayonnement et du temps d'irradiation est très importante en matière de radiographie car elle permet de caractériser, à tension constante, une exposition par le seul produit des milliampères seconde, et de compenser faci-

lement, en cas de nécessité, une diminution de l'une des caractéristiques par une augmentation de l'autre, sans craindre une modification de l'effet photographique obtenu.

362 — *Influence de la qualité du rayonnement.*

3621 — *Rayonnement homogène.*

Dans le cas d'un rayonnement monochromatique, le noircissement varie considérablement pour une même intensité reçue en fonction de la longueur d'onde.

BERTHOLD et GLOCKER (1925) ont confirmé, comme on pouvait s'y attendre, que l'effet photographique augmente rapidement en partant des courtes longueurs d'onde jusqu'à  $0,485 \text{ \AA}$ , qui correspond à la discontinuité d'absorption de l'argent, où il diminue brutalement; il est ensuite constant entre  $0,485 \text{ \AA}$  et  $0,918 \text{ \AA}$ , discontinuité d'absorption du brome, où il subit une deuxième chute importante, puis reste à nouveau constant lorsque la longueur d'onde augmente; la figure n° 11 résume ces résultats.

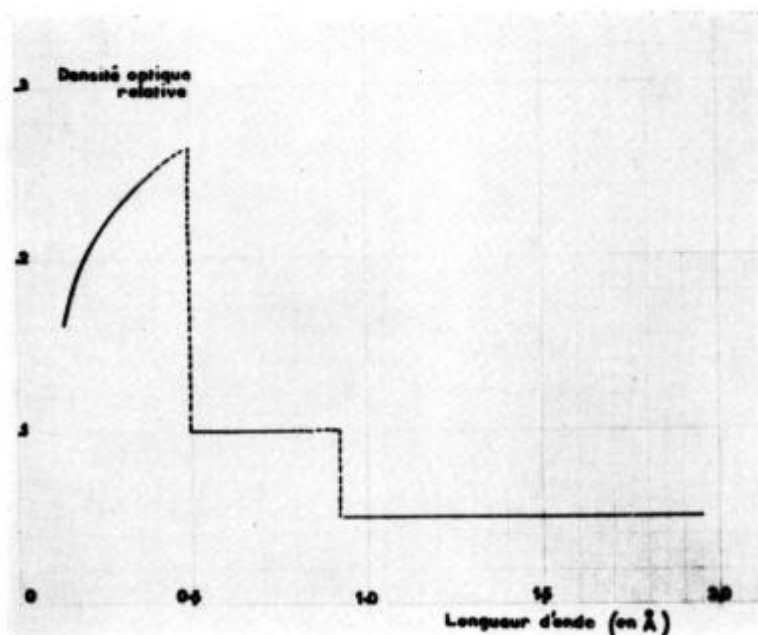


FIG. 11.

Variations de l'effet photographique  
en fonction de la longueur d'onde du rayonnement.

(d'après BERTHOLD et GLOCKER.)

## 3622 — Rayonnement hétérogène.

L'influence de la qualité du rayonnement sur le noircissement des films radiographiques, dans le cas d'un rayonnement hétérogène, a été très peu étudiée, et BELL (1936) semble avoir été le premier, sinon le seul, à se préoccuper de ce problème en analysant les différences observées sur les courbes de noircissement dans le cas de rayonnements de 80, 120, 175 kV de tension accélératrice filtrés respectivement par 0,24, 1 et 2 mm de cuivre.

Les courbes densité-log exposition obtenues sont reportées sur la figure n° 12 où l'on peut voir que la forme des courbes est indépendante de la qualité de la radiation, toutes trois présentant no-

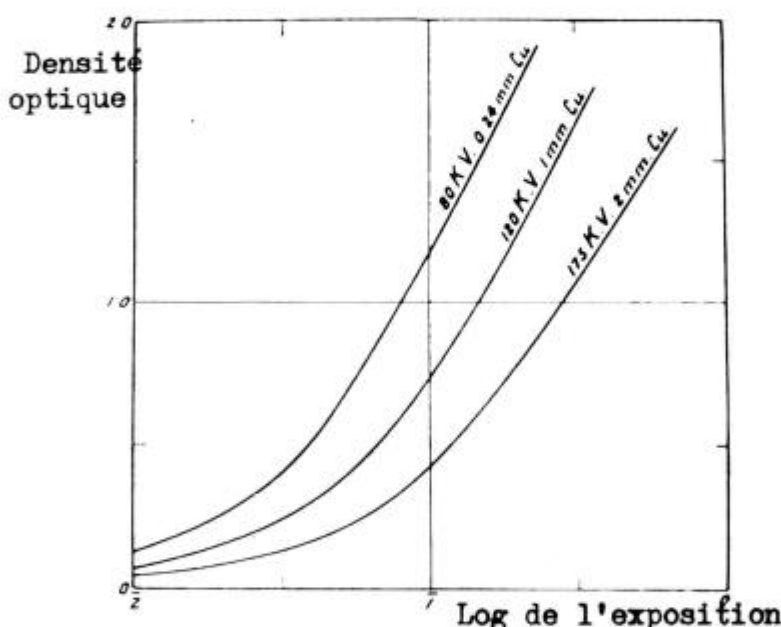


FIG. 12.

Courbes de noircissement pour des rayonnements hétérogènes émis sous différentes tensions accélératrices.

(d'après BELL.)

tamment une partie pseudo-linéaire au-delà d'une densité de 1; en outre, le rayonnement le plus dur produit, pour une même exposition, un effet photographique inférieur au rayonnement le plus mou; mais ceci n'est vrai que dans la gamme relativement étroite de duretés employées.

En fait, il existe, d'après BELL, une qualité particulière de rayonnement pour laquelle l'effet photographique est maximum; c'est ce qu'indique la figure n° 13 qui représente l'exposition nécessaire pour obtenir une densité optique de 0,5 avec des rayons X de pouvoirs de pénétration différents; la qualité des radiations utilisées est exprimée en couches de demi-absorption (en abrégé CDA) du

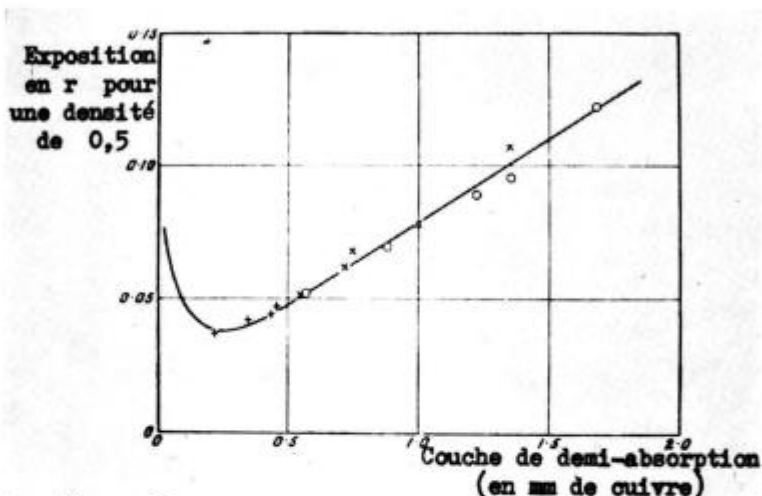


FIG. 13.

Variations de la dose nécessaire pour obtenir un effet photographique donné en fonction du pouvoir de pénétration du rayonnement.

(d'après BELL.)

cuivre, c'est-à-dire en épaisseurs d'un écran de ce métal réduisant de moitié l'intensité du rayonnement, dont la dureté est d'autant plus élevée que la CDA est plus faible; on voit que, dans une première phase, l'effet photographique augmente rapidement avec la longueur d'onde effective, passe par un maximum, puis diminue d'une façon progressive quand le rayonnement devient plus dur.

## CHAPITRE II

### APPLICATION AUX ETUDES DES VARIATIONS DE LA DENSITE DU BOIS

---

#### 1 — Principe fondamental.

On a vu (chapitre I, paragraphe 111) que si un rayonnement incident, d'intensité  $I_0$  et de qualité bien définie, traverse un échantillon d'épaisseur constante et de densité variable  $\rho$ , l'intensité du rayonnement émergent est liée à la première par une relation de la forme :

$$\log I = \log I_0 - K\rho$$

On sait également (paragraphe 34 du chapitre ci-dessus) que, dans certaines conditions, on peut avoir une relation à peu près linéaire entre la densité optique de la radiographie et le logarithme de la dose reçue :

$$D \approx K' \log I \approx a - b\rho$$

si bien que finalement la densité photographique peut être, à une constante près, inversement proportionnelle à la densité du bois.

#### 2 — Problèmes à résoudre.

Ayant choisi d'utiliser l'effet photographique pour analyser les variations de la densité en radiographiant ensemble, par contact, un certain nombre de « carottes de sondage » de 5 mm de diamètre prélevées à la tarière sur des arbres vivants, les principaux problèmes à résoudre sont au nombre de trois :

— *Problème du contraste*: faire en sorte que pour de faibles différences dans la densité du bois, on ait un écart important des valeurs enregistrées de la densité optique correspondantes.

— *Problème de l'uniformité du fond des radiographies*: obtenir que pour l'ensemble des échantillons radiographiés côte à côte, non seulement l'intensité incidente  $I_0$  soit la même, mais encore qu'à une même intensité incidente corresponde un même noircissement du film.

— *Problème de la linéarité*: étudier dans quelles conditions la relation entre densité optique et densité du bois est vraiment linéaire, et, dans la négative, chiffrer l'erreur qui est faite en l'assimilant à une relation linéaire.

### 21 — *Problème du contraste.*

D'une façon générale, si l'on désigne par E un effet observé et par C sa cause, par f et g deux fonctions, qui peuvent d'ailleurs être très simples, on peut définir le contraste  $\gamma$  par le rapport:

$$\gamma = \Delta f(E) / \Delta g(C)$$

Dans le cas particulier qui nous préoccupe, partant de différences de densité du bois, et cherchant à aboutir à des différences d'enregistrement de densité optique, C peut être successivement la densité du bois, l'intensité des rayons X transmis par l'échantillon et la densité optique elle-même.

### 211 — *Contraste intensité du rayonnement transmis/densité du bois.*

On a vu (chapitre I, paragraphe 12 ci-dessus) qu'en première approximation, le coefficient d'absorption varie comme le cube de la longueur d'onde. Si l'on considère deux points d'un échantillon de densité  $\rho_1$  et  $\rho_2$ , on a donc:

$$I_{\rho_1} \propto I_0 e^{-K\lambda^3 \cdot \rho_1} \quad \text{et} \quad I_{\rho_2} \propto I_0 e^{-K\lambda^3 \cdot \rho_2}$$

et par suite:

$$I_{\rho_1} - I_{\rho_2} \approx I_0 \left( e^{-K\lambda^3 \cdot \rho_1} - e^{-K\lambda^3 \cdot \rho_2} \right)$$

En supposant que la longueur d'onde reste constante, la différence entre les intensités transmises augmente donc proportionnellement à l'intensité incidente, et le contraste intensité transmise/densité du bois sera par suite d'autant plus élevé que la dose reçue sera plus forte.

Par contre, si l'on élimine  $I_0$  et si l'on prend la longueur d'onde comme variable, on peut écrire :

$$\frac{I_{\rho_1}}{I_{\rho_2}} \approx \frac{e^{K\lambda^3} \rho_2}{e^{K\lambda^3} \rho_1}$$

ou encore :

$$I_{\rho_1} - I_{\rho_2} \approx I_{\rho_1} \left[ e^{K\lambda^3} (\rho_2 - \rho_1) - 1 \right]$$

c'est-à-dire que pour une même dose transmise en un point donné (ici le point de densité  $\rho_2$ ), le contraste intensité/densité est d'autant plus grand que la longueur d'onde est élevée, donc que le rayonnement est mou.

Ces deux résultats sont confirmés par la pratique :

D'une part, si l'on n'était pas limité par d'autres considérations (phénomène de solarisation des radiographies, accroissement du bruit de fond électronique dans les appareils de mesure de la densité optique), on pourrait toujours améliorer le contraste en majorant la dose d'irradiation.

Par ailleurs, toute augmentation de la longueur d'onde se traduit par une baisse de l'intensité transmise (puisque le coefficient d'absorption varie comme le cube de la longueur d'onde), mais, si l'on compense cette diminution par un allongement des temps d'exposition, par exemple, de façon que la dose moyenne reçue soit la même, le contraste se trouve augmenté.

En majorant la longueur d'onde, il peut même arriver que le rayonnement soit presque entièrement arrêté par les zones de bois les plus denses (il ne l'est jamais tout à fait puisque la fonction exponentielle n'atteint jamais une valeur nulle), tout en traversant les parties moins denses; on obtient ainsi des densités photographiques très voisines de 0 pour les premières, et aussi élevées qu'il est possible d'en mesurer pour les secondes, au prix évidemment d'une augmentation très importante des temps d'exposition. Ainsi, par le jeu conjugué d'une diminution de la tension accélératrice et d'une majoration consécutive des milliampères seconde du flux électronique, il est possible d'augmenter à volonté le contraste entre les doses reçues par le film.

## 212 — *Contraste densité optique/logarithme de l'intensité reçue.*

Il est donné par la pente en chaque point des courbes de noircissement. Pour une émulsion photographique, cette pente reste cons-



tante dans toute la zone d'exposition normale, et il est par suite possible de définir, pour chaque émulsion, un facteur de contraste  $\gamma$  qui représente la pente de la partie rectiligne. On a vu qu'il n'en était malheureusement pas de même avec les émulsions radiographiques, dont les courbes de noircissement ne possèdent pas, sauf exception, de partie absolument rectiligne; cependant, la pente des tangentes aux courbes de noircissement en un point de densité donnée varie avec les émulsions, ce qui permet de dire que, pour cette densité, le contraste de l'une est supérieur ou inférieur à celui de l'autre.

D'une façon générale, quand tous les grains d'halogénure d'une émulsion ont des dimensions sensiblement voisines, le film procure un contraste maximal, puisque tous les grains ont à peu près la même sensibilité; par suite, si l'exposition est suffisante, ils sont tous rendus développables; si elle est insuffisante, aucun ne l'est; il en résulte que pour de faibles différences de dose reçue, on peut avoir des différences de noircissement très importantes.

Au contraire, lorsque l'émulsion renferme des grains de tailles variées, il s'en trouve toujours un certain nombre pour être développables, et ce nombre croît de façon progressive avec la dose reçue, en sorte que le contraste est faible.

Le problème du contraste des clichés est au reste fort complexe, puisqu'il varie, pour un même film, suivant le type de révélateur utilisé, et pour un même révélateur, suivant la durée de développement, le  $\gamma$  augmentant avec celle-ci jusqu'à un optimum qui est de l'ordre de 5 minutes; d'après VAUCOULEURS (op. cit.), les conditions de séchage elles-mêmes influent sur le facteur de contraste, qui est meilleur lorsque la température et l'état hygrométrique au cours de cette opération sont eux-mêmes plus élevés.

### 213 — *Contraste ordonnée des courbes d'enregistrement/densité optique.*

Nous ne le mentionnerons ici que pour mémoire: aussi bien qu'il est possible d'avoir pour une même différence de densité du bois des différences variables de dose reçue par le film, ou, pour une même différence de dose reçue, des différences variables de densité optique, il est également possible qu'à un même écart de densité photographique corresponde des différences considérables dans les graphiques d'enregistrement; il ne s'agit pas là d'un véritable contraste mais plutôt d'un changement d'échelle qui a cependant pour effet de permettre de mieux discerner des points de densités très voisines; on y parvient, ainsi qu'on le verra plus loin, dans le chapitre consacré à l'appareillage, par un simple changement des coins optiques utilisés.

Il ressort des considérations ci-dessus que le problème du contraste, s'il revêt des aspects variés, ne soulève guère de difficultés dans la pratique, puisqu'il est toujours possible, partant de faibles écarts de la densité du bois, d'avoir finalement des différences importantes dans les graphiques d'enregistrement obtenus.

## 22 — *Problème de l'uniformité du fond des radiographies.*

Pour que la densité photographique de l'image d'un échantillon puisse servir de référence pour l'étude de la densité du bois, il faut qu'il n'existe aucune autre cause de variation de la première que les modifications qui interviennent réellement dans la seconde; cela veut dire qu'il est tout d'abord nécessaire que tous les points d'une même radiographie reçoivent une même dose de rayonnement, et, deuxièmement, qu'à une même dose reçue corresponde un même noircissement, l'ensemble des deux conditions se traduisant par l'uniformité du fond des radiographies, c'est-à-dire par l'uniformité de la densité optique pour tous les points du cliché ayant reçu la totalité du rayonnement incident.

### 221 — *Uniformité de la dose reçue sur la surface des films.*

#### 2211 — *Influence de la distance.*

Si  $I$  est l'intensité d'émission, supposée constante, d'une source  $O$  (fig. n° 14), et  $dS$  la surface irradiée à l'intérieur d'un angle solide très petit  $d\omega$ , la dose reçue est, par définition :

$$D = \frac{I \, d\omega}{dS}$$

Si la normale à la surface irradiée  $dS$  fait avec le flux incident un angle  $\alpha$ , et si, de plus, cette surface se trouve à une distance  $R$  de la source émettrice, on a la relation :

$$d\omega = \frac{dS}{R^2} \cos \alpha$$

d'où :

$$D = \frac{I \cos \alpha}{R^2}$$

On voit donc que la dose reçue est inversement proportionnelle au carré de la distance entre la source et le plan, et varie en outre comme le cosinus de l'angle d'inclinaison.

En fait, on néglige régulièrement ce dernier facteur, sans doute parce qu'on compare surtout les doses reçues sur des films différents, tous perpendiculaires à l'axe du rayonnement, et situés à des distances variables de la source; on aboutit ainsi à la loi bien connue du carré de la distance que l'on retrouve dans tous les manuels de pratique radiographique.

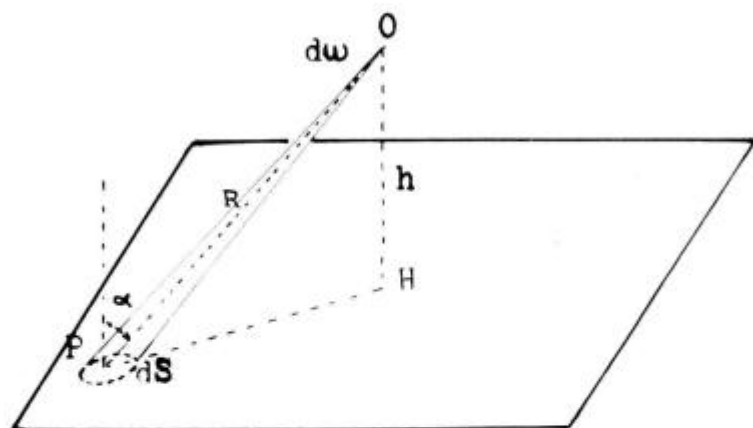


FIG. 14.

Influence de la distance sur la dose reçue.

Mais, si l'on cherche à connaître les variations de dose reçue en des points différents d'un même film en fonction de la distance qui les sépare de la source émettrice, on est obligé de tenir compte du fait que l'angle d'inclinaison varie d'un point à un autre.

Si  $H$  est le pied de la perpendiculaire abaissée de la source sur le film et  $h$  la distance  $OH$ , on a :

$$\cos \alpha = \frac{h}{R}$$

et par suite :

$$D = \frac{Ih}{R^3}$$

On obtient ainsi une nouvelle loi (que nous n'avons retrouvée dans aucune publication) :

Les doses reçues en divers points d'un même film sont inversement proportionnelles au CUBE de la distance qui les sépare de la source.

De l'équation ci-dessus, on tire :

$$\frac{D_P}{D_H} = \frac{OH^3}{OP^3} = h^3 \cdot (HP^2 + h^2)^{-\frac{3}{2}}$$

On peut ainsi, en considérant une distance  $h$  fixe, calculer dans quelle zone circulaire de rayon  $HP$  du film doit se trouver  $P$  pour que l'erreur relative sur la dose n'excède pas une valeur limite convenue.

On peut également, si l'on veut utiliser toute la surface émulsionnée, déterminer à quelle distance de la source doit se trouver le film pour que l'erreur entre le point de dose maximale  $H$  et les points de dose minimale (extrémités des diagonales) ne dépasse pas cette même valeur limite.

C'est ainsi que, si l'on prend comme seuil maximal de l'erreur celui de 5 %, le calcul montre qu'il est dépassé pour un film de format  $18 \times 24$  cm (demi-diagonales : 15 cm) dès lors que la distance source-film n'atteint pas 66 cm.

#### 2212 — Dissymétrie d'émission.

Dans un tube à rayons X (fig. n° 15), un plan passant par l'axe  $XX'$  du tube (droite joignant le milieu du filament au centre de

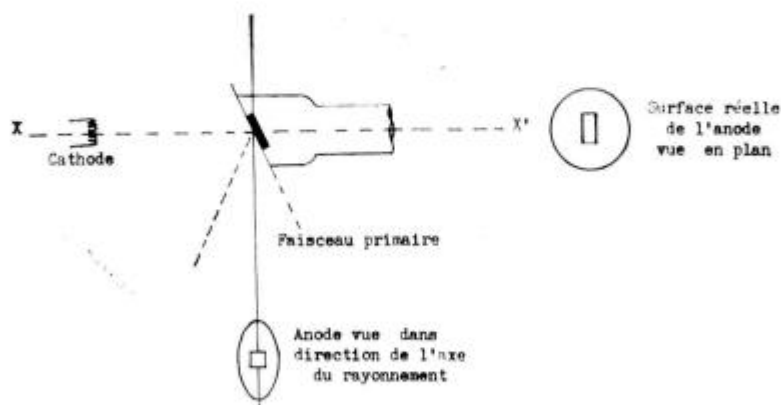


FIG. 15.

Schéma d'un tube à rayons X et surface focale apparente.

l'anti-cathode) et perpendiculaire à la surface de celle-ci constitue un plan de symétrie du rayonnement. Mais, à l'intérieur de ce plan, il n'y a pas d'axe de symétrie proprement dit ; en particulier, la perpendiculaire à l'axe  $XX'$  située dans ce plan, que l'on peut dési-

gner sous le nom d'axe du rayonnement, n'en est pas un, et elle ne coïncide pas non plus avec l'axe d'intensité maximale. DESTRIAU (1945) a même montré que, non seulement l'angle que ces deux axes font entre eux est variable, mais encore qu'il peut changer de signe, l'axe d'intensité maximale étant par exemple déporté du côté de la cathode dans les tubes à diagnostic, dont l'anode est très inclinée, et du côté de l'anode dans les tubes à thérapie pour lesquels l'angle d'inclinaison de celle-ci n'est que de 45° environ. La figure n° 16 donne la répartition des doses trouvées par DES-

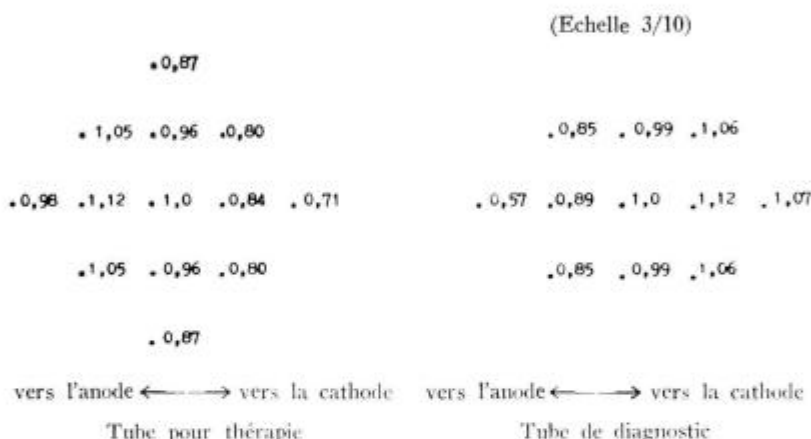


FIG. 16.  
Dissymétrie d'émission.  
(d'après DESTRIAU.)

TRIAU pour un plan irradié parallèle à l'axe du tube et situé à 24 cm de la source dans le premier cas, et à 16 cm dans le second; on voit qu'à ces très courtes distances, la dissymétrie d'irradiation est considérable et que l'axe d'intensité maximale ne s'identifie nullement avec l'axe du rayonnement.

En fait, l'angle d'inclinaison de l'anti-cathode est conditionné par la nécessité plus ou moins impérieuse qu'il y a à disposer d'une source ponctuelle: dans toutes les applications où l'on craint un défaut de netteté des images radiographiques ou un manque de précision des mesures dû au fait que la surface d'émission de l'anti-cathode présente une certaine étendue, on dispose celle-ci très en biais par rapport à l'axe du tube; de cette façon, vue dans la direction du faisceau primaire, sa projection sur un plan d'irradiation perpendiculaire à l'axe de celui-ci se trouve réduite dans une proportion qui est égale au cosinus de l'angle d'inclinaison; on obtient

ainsi une faible surface focale apparente, compatible avec la finesse recherchée, cependant que l'ampleur de la surface focale réelle permet d'utiliser des intensités d'émission élevées.

Dans les autres cas, la ponctualité de la source ne présente pas d'avantage particulier, et la surface de l'anode est alors faiblement inclinée par rapport à l'axe du tube, de façon à disposer d'un faisceau primaire largement étalé.

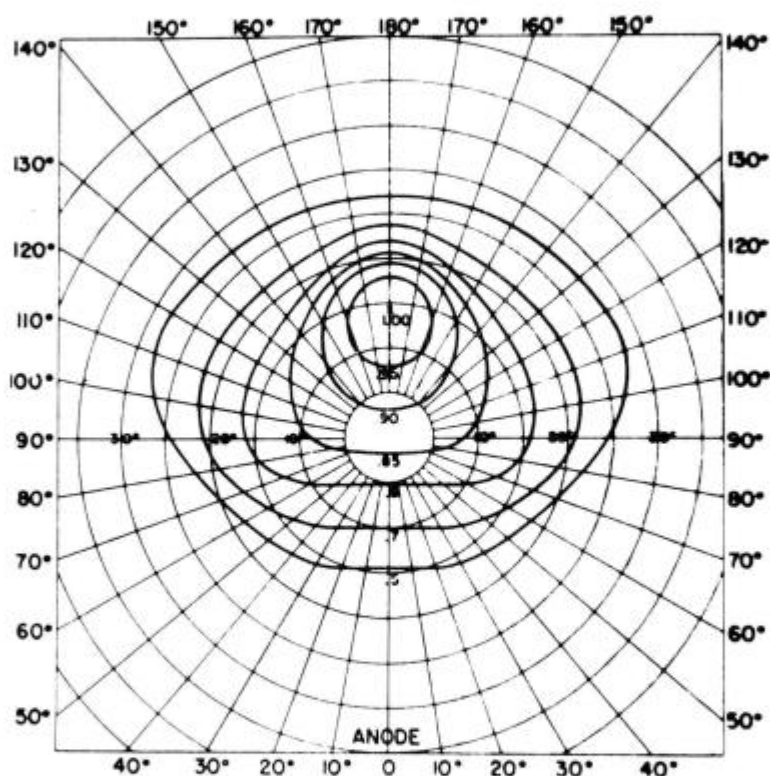


FIG. 17.

Courbes isodoses.

L'étude théorique de la répartition dans l'espace du flux d'émission d'un tube RX n'est possible que si, comme l'a fait SPROULL (1946), on suppose une anti-cathode extrêmement mince, ce qui n'est évidemment pas le cas dans la réalité. Dans la pratique, les constructeurs de tubes fournissent, pour chacun de leurs modèles, des courbes isodoses auxquelles il est possible de se reporter; sur la figure n° 17 sont reproduites celles du tube que nous utilisons

maintenant le plus souvent, établies pour un film placé à 15 cm de la source; on voit que, dans ce tube, l'axe d'intensité maximale est fortement déporté vers la cathode, et que, de plus, les courbes isodoses sont loin de correspondre à des figures géométriques simples; pour avoir une meilleure appréciation de la dissymétrie d'irradiation, la figure n° 18, établie à partir de la précédente, représente

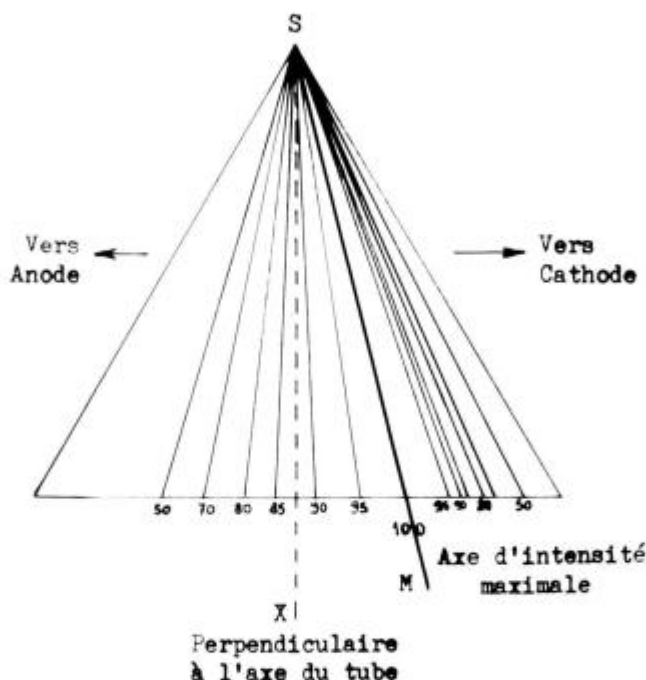


FIG. 18

Dispersion du faisceau dans le plan de symétrie du rayonnement.

la dispersion du faisceau autour de l'axe du rayonnement SX perpendiculaire à l'axe du tube; on observe que l'axe d'intensité maximale SM fait avec le précédent un angle de  $15^\circ$ , ce qui correspond à une excentricité considérable, se chiffrant par exemple à 67 cm pour une distance source-film de 2,5 m.

On peut constater de plus que, si l'on place des échantillons à irradier au voisinage de l'axe du rayonnement, non seulement la dose reçue sur les films n'est pas uniforme, mais encore qu'elle ne varie pas d'une façon symétrique, ou presque symétrique, d'une des extrémités à l'autre du film.

En outre, les variations de dose deviennent plus importantes pour un même déplacement dans le plan d'irradiation lorsqu'on s'éloigne de l'axe d'intensité maximale, en sorte que, si l'on cherche à avoir une uniformité aussi grande que possible des doses reçues, il convient de placer le centre des films sur l'axe SM; mais alors l'angle d'inclinaison devient important, et si l'on veut éviter qu'il n'en résulte à nouveau une trop grande hétérogénéité du rayonnement, il faut rendre cet axe perpendiculaire au plan d'irradiation en inclinant le tube par rapport à celui-ci d'un angle égal à celui que font entre eux l'axe du rayonnement et l'axe d'intensité maximale.

La nécessité de cette inclinaison du tube est particulièrement évidente dans le cas particulier qui nous préoccupe, puisqu'on cherche à irradier, à l'aide d'un rayonnement parallèle au fil du bois, des échantillons prélevés perpendiculairement à celui-ci et reposant directement sur le film; à défaut, force serait, soit de se placer sur l'axe du rayonnement, avec les inconvénients que cela comporte, soit de tolérer un flou, qui sera étudié plus loin, dû au non-parallélisme entre la direction des fibres et celle des rayons incidents.

### 2213 — *Absorption par l'air.*

L'absorption du rayonnement par l'air est très importante, non seulement en elle-même, puisqu'elle a pour effet d'entraîner une augmentation sensible des temps d'exposition, et puisqu'elle exerce une certaine filtration des rayons émis par le tube, mais encore parce qu'elle intervient pour aggraver l'influence de la distance entre la source et les différents points du film sur les doses reçues.

VICTOREEN (op. cit.) donne, pour les longueurs d'onde comprises entre 0,01 et 1 Å, les coefficients massiques  $\mu/\rho$  de l'air, qui sont les suivants:

longueur d'onde.	0,010	0,050	0,100	0,50	1,0
$\mu/\rho$ air .....	0,0570	0,1136	0,1433	0,5250	2,879

On voit que ces coefficients augmentent très rapidement avec la longueur d'onde, pour les raisons qui ont été exposées plus haut, ce qui explique que la couche d'air située entre la source et le film se comporte comme un véritable filtre et élimine une grande partie des rayons mous émis par celle-ci.

DAY et TAYLOR (1950) ont par ailleurs établi une série d'abaques, reproduite sur la figure n° 19, qui permet de déterminer d'une façon empirique l'importance relative de l'absorption due à l'air en fonction de l'épaisseur traversée, pour toute une gamme de tensions accélératrices comprises entre 10 et 200 kV, et pour un rayonnement émis à travers une fenêtre de béryllium de 1,5 mm d'épaisseur; on voit que, pour 10 kV par exemple, le rayonnement est totalement arrêté par une couche de 2 m d'air.



Par ailleurs, si l'on veut chiffrer l'incidence de l'absorption par l'air sur les différences de dose reçue en divers points d'un même film, on constate que, pour une tension accélératrice de 15 kV et une distance source-film de 60 cm par exemple, l'absorption supplémentaire due à l'air est de 5 % pour une variation d'épaisseur traversée de 10 cm, ce qui correspond, en première approximation, pour un film de format  $18 \times 24$  cm, à une différence de 1 % entre le centre d'un film placé au point le plus proche de la source et les extrémités des diagonales, qui en sont éloignées d'environ 62 cm.

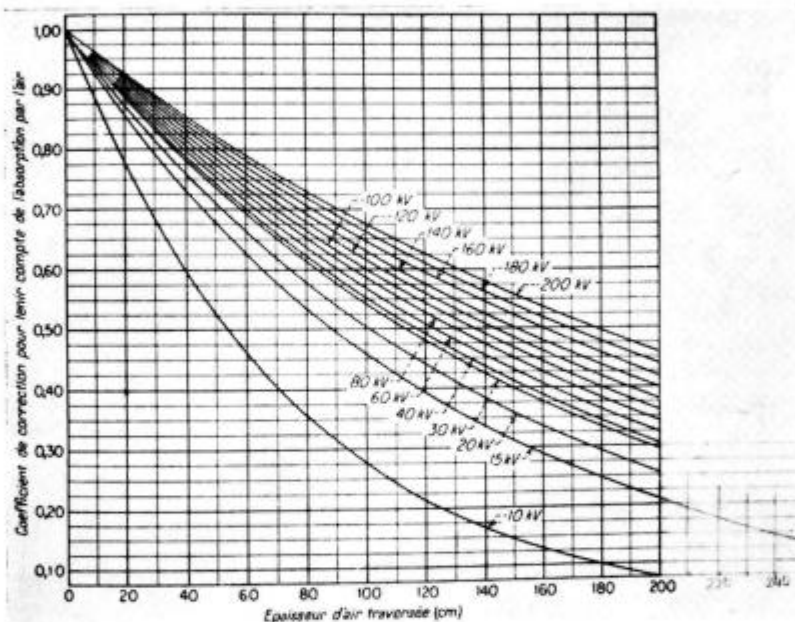


FIG. 19.

Absorption par l'air en fonction de l'épaisseur traversée.

(d'après MAY et TAYLOR.)

L'absorption par l'air intervient ainsi d'une façon faible, mais non négligeable, pour aggraver l'influence de la distance source-film et de l'inclinaison variable des différentes zones du film par rapport au rayonnement.

On pourrait, dans ces conditions, être tenté de faire le vide sur le trajet du faisceau, ce qui supprimerait les trois inconvénients mentionnés ci-dessus (allongement des temps de pose, durcissement du rayonnement, aggravation de l'hétérogénéité des doses reçues en divers points d'un même film).

Malheureusement, la réalisation du vide sur une distance source-film aussi importante que celle que nous devons adopter, avec des échantillons très légers, dont certains doivent être calés d'une façon assez minutieuse, et qui, par suite, ne doivent subir ni manipulation ni déplacement après avoir été mis en place sur le film, entraînerait, pour un travail de routine, des servitudes difficilement compatibles avec la simplicité recherchée.

Il faut dire que l'on peut fort bien s'accommoder dans la pratique de l'interposition de l'air entre les échantillons et la source, parce que l'obtention d'un bon contraste ne soulève, ainsi qu'on l'a vu, aucune difficulté, et parce que les grandes distances utilisées rendent négligeables les différences de dose reçue sur les films; seuls restent en cause les temps d'exposition; on verra qu'ils sont raisonnables, surtout si on les rapporte au nombre d'échantillons radiographiés simultanément.

222 — *Uniformité du noircissement pour une même dose reçue.*

Pour pouvoir faire de l'absorptiométrie de précision sur un film radiographique, il ne suffit pas que tous les points du film reçoivent la même dose, mais il faut encore qu'à dose reçue égale, le noircissement soit identique; c'est là un simple problème de développement photographique, mais son importance est capitale pour la validité des résultats obtenus.

Si l'on se contente, comme en radiographie médicale par exemple, de mettre les films à développer sur des cadres, puis de placer ceux-ci en position verticale dans les cuves contenant le révélateur, il y a toutes chances pour que des hétérogénéités apparaissent dans le noircissement de l'émulsion: les produits de réaction du développement, en effet, ont une densité plus élevée que le révélateur lui-même, en sorte que, normalement, ils descendent par gravité à l'intérieur des cuves, et tendent par suite à restreindre le développement dans les zones inférieures du film devant lesquelles ils passent; ce phénomène peut facilement être observé lorsque deux zones d'un même film, voisines l'une de l'autre, présentent des densités très différentes, ce qui est souvent le cas pour les radiographies de bois; si les parties du film situées au-dessous d'elles ont reçu une dose égale de rayonnement, la zone qui se trouve sous la plage de forte densité est, quand on laisse le film immobile dans le bac, automatiquement moins développée que l'autre.

Il est donc nécessaire d'assurer une agitation *continue* et *vigoureuse* des films dans le révélateur pendant *toute* la durée du développement.

Nous avons essayé d'obtenir le même effet en assurant une rotation ininterrompue du révélateur par pompage; les résultats n'ont

pas été satisfaisants, en raison vraisemblablement du fait que des courants réguliers s'établissent à l'intérieur des bacs; du révélateur non usé repasse ainsi toujours sur les mêmes zones du film, y provoquant un noircissement plus important qu'ailleurs.

Il est, par suite, indispensable que l'agitation du film et du révélateur se fasse manuellement et de façon volontairement irrégulière, en évitant tout mouvement d'allure cyclique; il faut pour cela disposer de cuves suffisamment grandes pour permettre un déplacement des cadres porte-films dans les trois directions de l'espace.

CLARK W. (1925) a proposé pour sa part de remplacer cette agitation des films dans des cuves verticales par un développement sur plateau horizontal avec brossage continu de la surface de l'émulsion, à l'aide d'une brosse souple en poils de chameau, ce qui aurait l'avantage d'éliminer au fur et à mesure de leur formation les produits de réaction du révélateur, tout en assurant un renouvellement efficace de celui-ci; malheureusement, ce mode de développement, qui convient peut-être parfaitement pour les films à une seule couche émulsionnée, est difficilement applicable aux films à double couche sur lesquels nous l'avons essayé; dans ce cas, en effet, il est nécessaire de retourner les films pour les brosser alternativement des deux côtés, ce qui exige qu'ils soient sortis du bain, d'où un risque de voile dû à l'oxydation par l'air du révélateur.

Le premier procédé décrit ci-dessus nous paraît donc de beaucoup préférable, bien que les lisières des films, situées à proximité des cadres de développement, soient quelque peu sous-développées, en raison d'une stagnation relative du révélateur au contact des cornières ou des tiges métalliques dont ils sont formés.

Ces zones à opacité moindre ne représentent que quelques millimètres, et peuvent facilement être éliminées; sur le reste des films, il est possible, lorsque le développement est fait avec un soin suffisant, de faire en sorte que les variations de densité optique n'excèdent pas 5 %, ce qui est acceptable pour un travail de routine; avec des précautions toutes spéciales, émulsion à une couche, usage d'un révélateur neuf à dilution plus forte que la normale compensée par un temps de développement plus long, on peut même obtenir que l'erreur en densité, due aux variations de noircissement pour une même dose reçue, ne dépasse pas 2 % sur la partie utile d'un film de format  $18 \times 24$  cm.

### 23 — *Problème de la linéarité.*

#### 231 — *Conditions d'obtention de courbes de noircissement linéaires.*

Il existe théoriquement plusieurs possibilités pour avoir une relation assez linéaire entre la densité photographique et la densité du bois,

2311 — *Utilisation d'écrans renforceurs.*

La solution qui pourrait paraître la plus simple consisterait à transformer une partie du rayonnement ayant traversé l'échantillon en lumière, de façon à obtenir, par le jeu d'écrans fluorescents, une courbe de noircissement  $D/\log$ . Il dotée d'une partie parfaitement rectiligne très étendue (fig. n° 10).

Malheureusement, cette solution présente plusieurs inconvénients : tout d'abord, le support des écrans est constitué par un carton dense et épais qui absorbe une grande partie du rayonnement ; il n'est par suite pas possible, si l'on veut utiliser des rayons mous, de mettre le film entre deux écrans, solution qui fournirait le maximum de fluorescence ; on doit donc supprimer l'écran antérieur, d'où une baisse sensible du rendement lumineux qui n'est plus assuré que par le seul écran postérieur.

Il faudrait en conséquence recourir à un écran à gros cristaux, si l'on voulait bénéficier de l'action prépondérante de la lumière de fluorescence ; or, les cristaux des écrans rayonnent dans toutes les directions, et leur effet s'exerce d'autant plus loin que leur taille est plus élevée ; l'adoption d'écran à gros cristaux aurait ainsi pour effet d'occasionner un flou extrêmement important dans l'image radiographique obtenue.

Enfin, le rendement d'un écran n'est maximal que lorsque le rayonnement utilisé est, en majeure partie, formé de longueurs d'onde inférieures à celle qui correspond à la discontinuité d'absorption K de celui des constituants du sel fluorescent qui présente le plus grand nombre atomique.

Un écran au tungstate de calcium, par exemple, ne convient pas puisque la discontinuité K du tungstène se produit pour une longueur d'onde de 0,18 Å, très inférieure à celle de la partie efficace du spectre correspondant à un rayonnement mou, seul utilisable pour les radiographies du bois. On pourrait employer un écran au sulfure de zinc (discontinuité K du zinc : 1,29 Å), puisque, d'après la formule de DUANE, cette longueur d'onde peut être atteinte avec une tension accélératrice de 10 400 volts seulement. Mais pour que la longueur d'onde d'intensité maximale soit elle-même inférieure à celle de la discontinuité du zinc, il faudrait une tension supérieure de 50 %, soit 15 600 volts. Encore convient-il de tenir compte du fait qu'avec une alimentation en courant alternatif, la tension n'atteint sa valeur maximale que pendant une fraction de la période, et que, pendant le reste, elle est plus faible, donc la longueur d'onde du rayonnement émis plus élevée. Il faudrait ainsi, pour améliorer le rendement d'un écran au sulfure de zinc, majorer encore la tension appliquée aux bornes du tube, ce qui ferait sortir de la gamme de rayons mous que l'on désire utiliser.

Pour ces diverses raisons, l'emploi d'un écran renforçateur ne semble pas à conseiller, et il est, par suite, nécessaire de se limiter à la seule impression directe des émulsions radiographiques par le rayonnement.

2312 — *Utilisation de la région à faible opacité des courbes de noircissement  $D = f(I t)$ .*

On a vu dans les considérations théoriques du chapitre I que, dans la zone des faibles opacités ( $D < 1$ ), il y a proportionnalité directe entre la densité photographique et l'exposition  $I t$ ; or, on peut, dans certaines conditions, avoir également une relation linéaire entre celle-ci et la densité du bois traversé; l'intensité  $I$  transmise par l'échantillon est en effet donnée par la formule:

$$I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x}$$

dont les divers paramètres ont déjà été définis; or, pour les faibles valeurs de  $\mu/\rho \rho x$ , on a:

$$e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x} \approx 1 - \frac{\mu}{\rho} \rho x$$

Pour préciser les idées, si  $\mu/\rho \rho x$  est, par exemple, égal à 0,25, l'erreur relative commise en remplaçant le premier terme de la pseudo-égalité ci-dessus par le second est inférieure à 4 %. Pour les échantillons prélevés à la tarière de Pressler de 5 mm,  $x$  a une valeur fixe de 0,5; par ailleurs, la densité  $\rho$  dépasse rarement 0,8, tout au moins pour les bois les plus courants de la zone tempérée, en sorte que pour que  $\mu/\rho \rho x$  soit inférieur à 0,25, il suffit que le coefficient d'absorption massique ne dépasse pas 0,61.

En utilisant un mode de calcul semblable à celui décrit au paragraphe 113 du chapitre I, on trouve que cette valeur de  $\mu/\rho$  correspond à une longueur d'onde de 0,9 Å, qui elle-même est, soit la longueur d'onde limite du spectre continu obtenu avec une tension accélératrice de 14 kV, soit la longueur d'onde d'intensité maximale pour une tension accélératrice de 21 kV, ceci avec une alimentation en tension continue; en tension pulsatoire, il faut bien entendu tenir compte du fait que la différence de potentiel maximale n'est atteinte qu'une fois par période, et il y a lieu par suite d'augmenter cette tension de crête pour que la majeure partie du rayonnement soit excitée par une tension supérieure à la valeur limite trouvée, en filtrant en outre les rayons les plus mous de façon que le coefficient d'absorption garde une valeur moyenne suffisamment faible.

En contrepartie de la linéarité obtenue, l'élévation de la tension accélératrice et la nécessité de filtrer les rayons les plus mous entraînent naturellement un affaiblissement du contraste.

Quoi qu'il en soit, si, grâce à la faible valeur de  $\mu/\rho$ ,  $I$  est lié à  $\rho$  par une relation linéaire, il suffit, pour qu'il en soit de même pour la densité du bois, que l'on reste, grâce à une réduction du temps d'exposition, dans les zones de faible densité photographique.

2313 — *Utilisation de la région à forte opacité des courbes de noircissement*  $D = f(\log If)$ .

On a vu que, dans le cas des émulsions radiographiques exposées aux rayons X, il n'y a pas de partie réellement linéaire sur les courbes donnant la densité photographique en fonction du logarithme de la dose reçue, mais seulement une portion pseudo-linéaire qui commence en général au-dessus d'une densité de 2, et se rapproche plus ou moins d'une droite selon, en particulier, le type d'émulsion utilisé; il existe là une autre possibilité théorique pour avoir une proportionnalité inverse entre densité optique et densité du bois au point correspondant; mais, il faudrait alors que l'image du bois le moins dense ait elle-même une densité supérieure à 2, ce qui amènerait à rechercher une densité de l'ordre de 3 pour les zones les plus denses si l'on voulait garder un contraste suffisant; or, pour une telle opacité, des difficultés considérables se présentent, aussi bien en matière photographique (phénomènes d'inversion) qu'en matière d'analyse densitométrique (augmentation du bruit de fond électronique).

De plus, si l'on considère les micro-fluctuations de la densité optique pour une plage ayant reçu une dose uniforme, l'écart quadratique moyen des variations de la première  $\Delta D$  est donné par la formule de SELWIN :

$$\Delta D = K\sqrt{D}$$

et augmente donc quand la densité elle-même croît; c'est une raison supplémentaire pour éviter de recourir à des noircissements trop élevés.

232 — *Résultats.*

2321 — *Equivalence bois-cellophane pour l'établissement des courbes de noircissement.*

On peut obtenir des courbes de noircissement de plusieurs façons différentes; assez souvent, on fait varier la dose reçue en gardant l'intensité constante et en exposant diverses bandes d'un même film durant des temps que l'on fait croître, soit linéairement, soit exponentiellement.

On pourrait également exposer, toujours sur un même film, des éprouvettes de bois d'épaisseur uniforme mais de densités différentes pendant un temps constant, et cette méthode pourrait paraître la plus normale compte tenu du but poursuivi; elle présente cependant quelques inconvénients: les échantillons de référence devraient couvrir une gamme importante de densités moyennes, tout en étant eux-mêmes aussi homogènes que possible, car, même en les disposant de façon qu'ils soient traversés radialement par le rayonnement, il serait difficile de supprimer totalement leurs propres variations de densité, d'où une impossibilité d'avoir des paliers bien marqués dans les enregistrements densitométriques.

Pour ces raisons, nous avons pensé remplacer ces éprouvettes de référence, constituées par de la matière ligneuse hétérogène, par d'autres, réalisées à partir de feuilles de cellophane d'épaisseur calibrée et de composition chimique constante, voisine de celle du bois, puisque la cellophane est obtenue à partir de cellulose pure.

On a vu que, dans la formule fondamentale de l'absorption, densité et épaisseur interviennent de façon absolument symétrique, et que, par suite, seul compte le poids de matière à l'unité de surface; on devrait donc pouvoir utiliser indifféremment, soit des étalons de cellophane de densité constante mais d'épaisseur variable, soit des étalons de bois d'épaisseur uniforme et de densité variable; cependant, le coefficient d'absorption étant fonction de la structure chimique de la matière traversée, il convient de vérifier, qu'en dépit de la présence dans le bois de corps autres que la cellulose, et notamment de lignine, il y a effectivement équivalence entre bois et cellophane, quelles que soient les conditions d'exposition, longueur d'onde effective du rayonnement utilisé ou dose d'irradiation.

On a donc recherché des échantillons de bois de densités très différentes et ayant, pour une épaisseur de 5,4 mm, des poids superficiels à peu près égaux à ceux d'un nombre entier de couches de 1/10 de mm de cellophane; la meilleure approximation semble être celle qui existe, d'une part, entre le Sorbier (*Sorbus domestica* L.) de poids superficiel 0,365 g/cm<sup>2</sup> et 2,5 mm de cellophane, poids superficiel: 0,375 g/cm<sup>2</sup> et, d'autre part, entre l'*Abies grandis* (*Abies grandis* Doug.), poids superficiel: 0,175 g/cm<sup>2</sup>, et 1,2 mm de cellophane, poids superficiel: 0,18 g/cm<sup>2</sup>.

Le graphique faisant l'objet de la figure n° 20 donne les densités optiques enregistrées pour ces divers échantillons, dans des conditions d'exposition très variées, aussi bien qualitativement que quantitativement. On voit que les points représentatifs obtenus s'alignent à très peu près suivant une droite également inclinée sur les deux axes de coordonnées, c'est-à-dire qu'il y a bien équivalence approximative entre bois et cellophane, que le poids superficiel des étalons soit faible ou élevé.

Les densités optiques pour la cellophane sont généralement inférieures à celles du bois correspondant, l'écart se chiffrant, en valeur



moyenne, à 4 % de celui qui sépare 1,2 de 2,5 mm de cellophane ; il représente donc une différence de  $0,008 \text{ g/cm}^2$ , alors que l'écart réel en poids superficiel, tel qu'il ressort des chiffres donnés ci-dessus, est de  $0,010 \text{ g/cm}^2$  pour le bois le plus dense, et  $0,005$  pour le plus léger. Les différences constatées ne correspondent donc, aux erreurs d'expérience près, qu'aux différences effectives en poids superficiel, et on peut, par suite, considérer qu'en première analyse un échantillon de bois peut être remplacé, pour l'établissement des

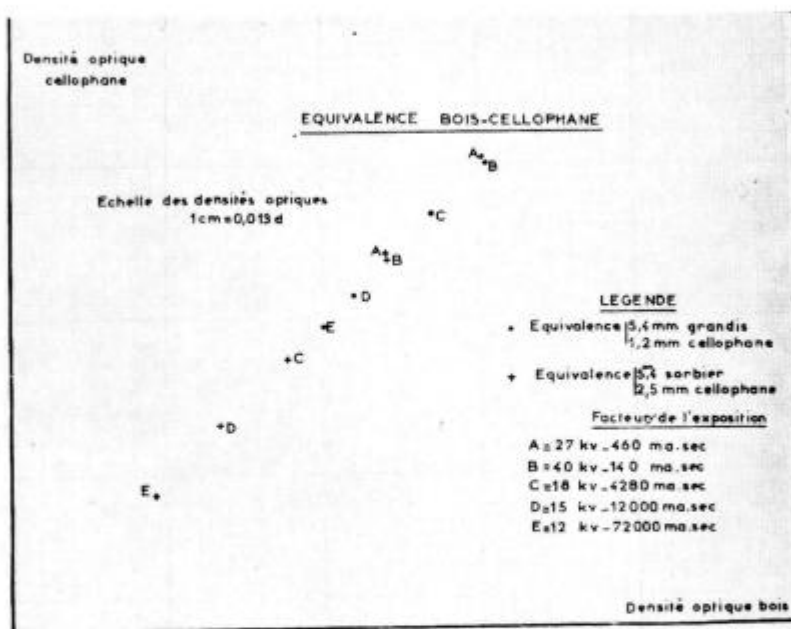


FIG. 20.

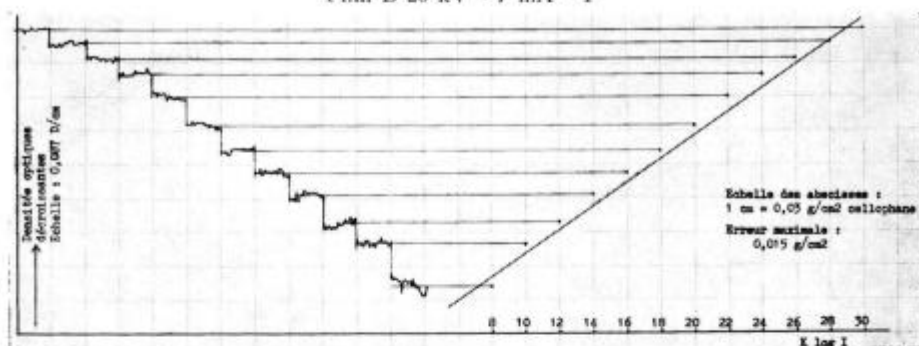
courbes de noircissement, par un échantillon de cellophane de même poids superficiel ; bien entendu, lorsque le nombre de couches de cellophane d'épaisseur uniforme augmente de façon linéaire, il en est de même pour le logarithme de la dose reçue par le film puisque celle-ci est une fonction exponentielle de l'épaisseur traversée ; on peut donc graduer directement l'axe des abscisses en épaisseurs de cellophane, en raison de la proportionnalité qui les lie au logarithme de la dose.

### 2322 — Courbes de noircissement obtenues.

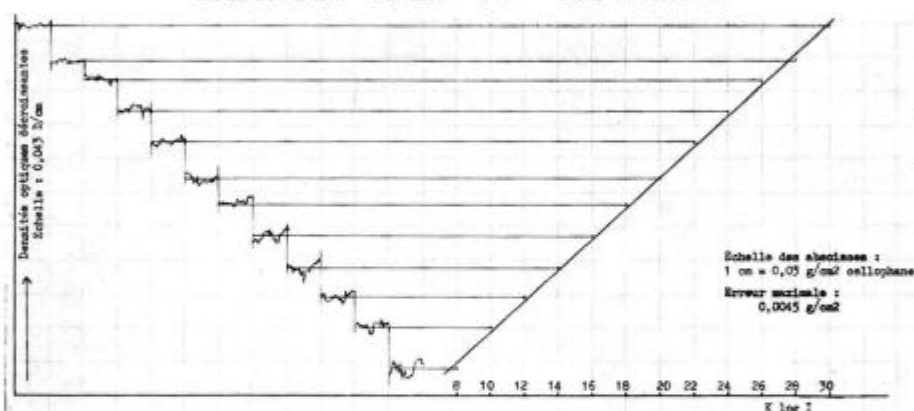
De nombreuses courbes ont été réalisées au Laboratoire pour étudier les relations entre dose et densité optique ; nous en donnons



A Courbe de noircissement  
pour 8 à 30 épaisseurs de 0,1 mm de cellophane  
Film B 20 kV - 7 mA - 1'



B Courbe de noircissement  
pour 8 à 30 épaisseurs de 0,1 mm de cellophane  
Film A 23 kV - 25 mA - 4'30'' - filtre 0.8 mm Al



C Courbe de noircissement  
pour 8 à 30 épaisseurs de 0,1 mm de cellophane  
Film A 15 kV - 20 mA - 10'

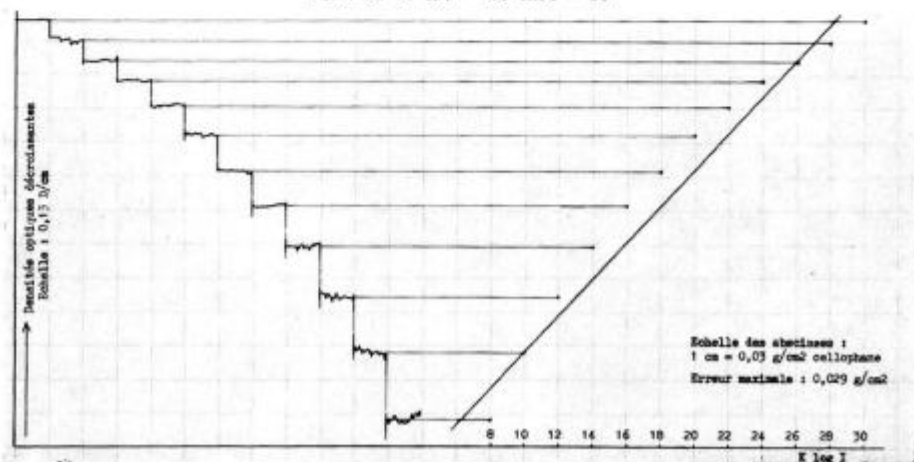


FIG. 21.  
Courbes de noircissement.

ci-contre (fig. n° 21) trois exemples caractéristiques; dans chaque cas, la linéarité est appréciée par rapport à une droite théorique tracée de façon telle que les différences maximales d'abscisses, en plus ou en moins, par rapport à la courbe de noircissement soient aussi faibles que possible.

23221 — *Emulsion pour radiographies avec écrans renforceurs.*

Ces émulsions donnent, lorsqu'elles sont effectivement utilisées au contact d'écrans fluorescents (au sulfure de zinc par exemple) des courbes de noircissement indéchiffrables, tant les paliers en sont peu marqués; cependant, les mêmes films, employés seuls, procurent des courbes qui, toutes choses égales par ailleurs, sont plus linéaires que celles des films conçus pour être normalement exposés sans écrans.

La figure 21 A représente une courbe obtenue de la sorte avec une tension accélératrice de 20 kV; elle est effectivement assez proche de la linéarité, puisque l'erreur maximale est de  $0,015 \text{ g/cm}^2$ , équivalant pour un bois de 5 mm d'épaisseur à un écart en densité de  $0,030 \text{ g/cm}^3$ , soit environ 6 % en valeur relative. Le contraste est moyen, puisque les profils correspondant à 8 et 30 épaisseurs de cellophane ( $0,12$  à  $0,45 \text{ g/cm}^2$ ) sont séparés de 7,55 cm, ce qui traduit une différence de 0,66 D, le coin utilisé ayant une pente de 0,087 D par cm.

Malheureusement, une telle émulsion semble assez irrégulière et permet difficilement d'avoir des clichés d'une grande netteté.

23222 — *Emulsion ordinaire utilisée avec filtre.*

Pour obtenir la figure n° 21 B, on a cherché à réunir les conditions décrites au paragraphe 2312, c'est-à-dire à faire en sorte que le coefficient d'absorption massique soit suffisamment bas pour que l'absorption soit, avec une approximation acceptable, proportionnelle à l'épaisseur traversée, et à utiliser des doses d'irradiation faibles afin qu'il y ait une relation linéaire entre celles-ci et la densité photographique du film.

Une différence de potentiel de 23 kV a finalement été choisie pour être appliquée aux bornes du tube et le rayonnement émis a, de plus, été filtré par 0,8 mm d'aluminium; les résultats enregistrés confirment bien les hypothèses formulées, puisque la courbe de noircissement est pratiquement linéaire, les rares points qui s'écartent de la droite de régression paraissant le faire de façon tellement aléatoire que l'on peut mettre en cause l'homogénéité de la cellophane employée. Quoi qu'il en soit, l'écart maximum est de  $0,045 \text{ g/cm}^2$  équivalant à une différence de densité minime de

0,009 g/cm<sup>3</sup> pour une carotte de 5 mm de diamètre. Malheureusement, le contraste est faible, ainsi qu'on pouvait s'y attendre, en raison, d'une part, du durcissement du spectre utilisé, et d'autre part, de la réduction de la dose reçue par le film : pour les épaisseurs extrêmes de 0,8 et 3 mm, les profils sont séparés de 9,1 cm, ce qui ne correspond qu'à 0,39 D, compte tenu de la pente du coin dont on s'est servi, qui est de 0,043 D/cm seulement.

23223 — *Emulsion ordinaire utilisée sans filtre.*

On se retrouve, à moins de chercher à avoir (ce que nous ne voulons pas pour les raisons déjà exposées) de forts noircissements, dans le cas ordinaire où la courbe donnant la densité optique en fonction du logarithme de la dose reçue, donc en fonction de l'épaisseur traversée, est plus ou moins concave. La figure 21 C représente une telle courbe obtenue avec un rayonnement mou (15 kV) non filtré, de façon à avoir un bon contraste. Ici, entre 0,8 et 3 mm d'épaisseur, il se traduit par un écart de 11,8 cm avec un coin dont la pente est de 0,13 D/cm, soit une différence considérable de 1,5 D.

Mais bien entendu, plus le contraste est élevé, plus on s'éloigne de la linéarité, et la rançon de celui-ci est une erreur assez importante qui est commise lorsqu'on assimile la courbe de noircissement à une droite ; ici, elle représente 0,029 g/cm<sup>2</sup>, soit l'équivalent de 0,058 g/cm<sup>3</sup> pour 5 mm d'épaisseur de bois, ou encore, en valeur relative, environ 10 % de la densité moyenne des bois les plus couramment analysés.

Les caractéristiques d'exposition retenues et les raisons de leur choix seront données dans le paragraphe 6 du chapitre suivant.

---

## CHAPITRE III

### CONDITIONS PRATIQUES DE REALISATION

---

#### 1 — Opportunité d'un étalonnage de chaque radiographie.

En raison des relations qui lient la densité photographique à la dose reçue par le film, et par l'intermédiaire de celle-ci, à la densité de l'échantillon traversé, il devrait être théoriquement possible, en supposant que l'on utilise toujours les mêmes conditions d'exposition et de développement, de déterminer une fois pour toutes le noircissement qui correspond à une densité donnée et de graduer ainsi directement les enregistrements de la densité optique en densité du bois.

En fait, si l'on peut contrôler parfaitement les caractéristiques électriques qui conditionnent qualitativement et quantitativement le rayonnement émis, il faut bien reconnaître que le noircissement d'un film radiographique ne dépend pas uniquement de l'irradiation qu'il reçoit et du type d'émulsion utilisée; il est également tributaire de nombreux facteurs du développement: nature, usure et température du révélateur, agitation du bain, rapidité de séchage, etc... et il semble difficile de contrôler à la fois toutes ces variables d'une façon suffisamment rigoureuse pour être assuré que, à doses reçues égales, l'opacité du film sera toujours exactement la même.

Pour pallier cette difficulté, nous avons tout d'abord pensé qu'il suffirait de radiographier, en même temps que l'échantillon à étudier, deux étalons de bois de même épaisseur et même teneur en eau que lui, mais de densité connue, de façon à pouvoir déterminer les variations longitudinales de sa densité par simple référence à celle des deux étalons. C'est une méthode qui a été utilisée pendant de nombreuses années au Laboratoire, mais il est apparu à l'usage qu'elle présentait certaines difficultés d'application, tenant au fait que la densité des étalons n'était pas elle-même absolument constante d'un point à l'autre de ceux-ci. Même en choisissant ces derniers parmi des bois à structure homogène, comme le Sorbier ou comme le bois de printemps d'*Abies grandis* à accroissements lar-

ges, et en débitant ces échantillons témoins de façon que l'épaisseur de référence corresponde au sens radial du bois (ce qui permet d'intégrer en grande partie les variations de densité qui sont maximales suivant cette direction), des modifications faibles, mais non négligeables, de noircissement peuvent être relevées dans leur image radiographique, risquant d'entraîner de légères erreurs dans l'appréciation de la densité des éprouvettes à analyser.

On est ainsi amené, comme nous l'avons fait lors de l'établissement des courbes de noircissement, et pour les mêmes raisons, à étalonner les radiographies de routine en remplaçant les deux échantillons de bois par deux échantillons de cellophane d'épaisseurs différentes, en général ceux-là mêmes dont nous avons vu plus haut qu'ils pouvaient leur être considérés comme équivalents, quelles que soient la composition spectrale et l'intensité du rayonnement utilisé.

Les tarières de Pressler n'ayant pas toujours rigoureusement le même alésage, on peut aussi, en divisant le poids superficiel des deux étalons de cellophane par le diamètre réel des échantillons de bois analysés, déterminer la densité de ceux-ci aux points présentant le même noircissement photographique.

De même, on verra plus loin (paragraphe 32) que les échantillons prélevés suivant un axe non exactement perpendiculaire au fil du bois doivent faire l'objet d'un calage qui a pour effet d'augmenter l'épaisseur traversée par le rayonnement. Dans ce cas, il est également possible d'établir une équivalence bois-cellophane pour un angle d'inclinaison donné, en se basant sur le facteur d'augmentation de l'épaisseur, qui est égal à l'inverse du cosinus de celui-ci (voir fig. n° 23); on aboutit ainsi aux tableaux d'équivalence suivants:

TABLEAU n° 4a  
Densités équivalentes à 1,2 mm cellophane.

Angles d'inclinaison en degrés	Diamètres des échantillons en mm						
	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4
0 à 3 .....	375	367	360	353	346	340	333
4 .....	374	366	359	352	345	339	332
6 .....	373	365	358	351	344	338	331
8 .....	371	363	356	350	343	337	330
10 .....	369	361	355	348	341	335	328

TABLEAU n° 4 b

Densités équivalentes à 2,5 mm cellophane.

Angles d'inclinaison en degrés	Diamètres des échantillons en mm						
	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4
0 à 3 .....	781	765	750	735	721	708	696
4 .....	779	763	748	733	719	706	694
6 .....	777	761	746	731	717	704	692
8 .....	773	758	743	728	714	701	689
10 .....	769	753	739	724	710	697	685

La graduation en densité du bois des graphiques d'enregistrement de la densité optique peut, dès lors, se faire très facilement, par simple extrapolation à partir des densités équivalentes indiquées ci-dessus.

## 2 — Etude des effets perturbateurs possibles.

### 21 — Influence de l'enveloppe radiographique.

Les films radio sont généralement livrés sous double enveloppe opaque, l'une de carton, l'autre de papier, c'est-à-dire protégés par une épaisseur non négligeable de matières cellulosiques mélangées de charges diverses qui viennent se surajouter, d'une façon à peu près uniforme il est vrai, à la cellulose et à la lignine constitutives du bois. On peut donc penser, à priori, que cette enveloppe absorbe une partie du rayonnement, nuisant à la finesse et au contraste des clichés obtenus par l'effet du filtre qu'elle produit.

Pour vérifier cette hypothèse, deux « carottes » identiques ont été prélevées sur le même arbre et suivant la même direction, à 1 cm l'une de l'autre; elles ont été collées bout à bout de façon à obtenir un échantillon symétrique dont une radio a été prise en chambre noire, moitié sous enveloppe et moitié hors enveloppe. Cette expérience montre que la double enveloppe nuit notablement à la qualité de la radiographie, en sorte que, pour un travail de précision, il serait toujours préférable d'opérer en chambre noire avec un film nu.

L'effet perturbateur de l'enveloppe est surtout sensible lorsqu'on travaille avec des rayons très mous, auquel cas une véritable image de la structure interne du carton vient se superposer au fond de la radiographie.

Pour la routine courante, au contraire, l'effet de l'enveloppe peut être aisément combattu par un léger abaissement de la tension accélératrice et une augmentation concomitante de la dose d'émission, ce qui permet de récupérer la perte de contraste subie.

## 22 — Influence du fil du bois.

L'influence de l'anisotropie du bois sur l'absorption de rayonnements électromagnétiques de faible longueur d'onde a été étudiée par LAKATOS (1956) qui a travaillé principalement avec des rayons  $\gamma$ , mais a procédé à quelques mesures avec des rayons X durs, à titre de comparaison. Les résultats qu'il a obtenus sont reproduits par STANKO BADUN (op. cit.) sous forme du tableau suivant, dans lequel le nombre d'impacts par minute correspond au rayonnement avant traversé l'échantillon :

Direction du rayonnement par rapport au fil du bois	Nombre d'impacts par minute	%
Perpendiculaire .....	766	100
Oblique .....	878	114,6
Parallèle .....	928	121,0

On voit que, d'après LAKATOS, le bois serait beaucoup plus opaque à un rayonnement reçu perpendiculairement à la direction des fibres que parallèlement à celle-ci. Nous avons cherché à voir si les résultats étaient identiques avec les rayons de grande longueur d'onde que nous utilisons ; une première expérience, faite avec des échantillons cylindriques prélevés à la tarière de Pressler de 5 mm, n'a pas fait apparaître de différences significatives, en raison vraisemblablement de la faible épaisseur des échantillons. Nous avons refait cet essai avec 8 éprouvettes parallélépipédiques de 10 mm de côté dans les sens radiaux et tangentiels, que nous avons exposées sur un même film radiographique, à raison de 4 irradiées parallèlement à la direction des fibres et 4 perpendiculairement à celle-ci ; pour une des répétitions, il n'y a pas eu de différence mesurable dans les densités photographiques de l'image ; pour les trois autres, la densité optique de la radiographie des échantillons traversés par les rayons X parallèlement au fil du bois a été supérieure de 0,7 % à celle des autres échantillons disposés dans la direction perpendiculaire.

Le coefficient d'absorption massique du bois semble donc effectivement légèrement plus élevé dans le sens perpendiculaire aux fibres, ce qui est probablement en rapport avec les phénomènes de

diffraction du rayonnement par les cristaux de cellulose dont la majeure partie est orientée suivant des hélices légèrement inclinées sur l'axe des fibres. Mais, lorsqu'on utilise des rayons mous, cette différence, qui est dans le même sens que celle observée par LAKARTOS, est incomparablement plus faible, et devient négligeable pour la pratique courante.

### 23 — *Influence de la teneur en eau.*

Dans un bois imprégné d'eau, celle-ci concourt, au même titre que la matière ligneuse, à l'absorption du rayonnement. Lorsque les échantillons se trouvent au-dessus du point de saturation des fibres, l'influence de l'eau qui remplit les cavités cellulaires est d'autant plus marquée que celles-ci sont plus grandes, c'est-à-dire que la densité du bois est plus faible; le contraste bois de printemps - bois d'été est alors estompé au point que les limites d'accroissements elles-mêmes deviennent invisibles, à moins d'utiliser de très grandes longueurs d'onde.

Nous avons présenté dans une étude précédente (POLGE, 1963 b) une série de radiographies d'un même échantillon, prises à des taux d'humidité différents, qui montrent bien le phénomène, et font de plus ressortir une déshydratation plus rapide dans le sens radial que dans le sens tangentiel; on peut y voir également que, dès lors que l'on se trouve au-dessous du point de saturation des fibres, les cernes redeviennent visibles; la présence d'eau dans les membranes cellulaires, par l'absorption supplémentaire qu'elle entraîne, provoque une baisse d'opacité générale et une diminution du contraste; il est par suite nécessaire que, dans la pratique, les échantillons présentent, lors de leur radiographie, un taux d'humidité uniforme; lorsqu'on utilise des étalons en bois, ils doivent, eux aussi, être conditionnés à cette même teneur en eau, qu'il faut également prendre comme teneur de référence lorsqu'on établit une équivalence entre des étalons en cellophane et des étalons en bois; le taux d'humidité que nous avons retenu est celui de 8 %, correspondant d'ailleurs au taux d'équilibre généralement atteint par des carottes de sondage de 5 mm de diamètre en atmosphère de laboratoire; tous les chiffres de densité qui seront portés par la suite sur les graphiques d'enregistrement sont donc censés être établis à 8 % d'humidité.

## 3 — **Lutte contre les flous de diverses origines.**

### 31 — *Flous inévitables.*

#### 311 — *Flou dû à la largeur de la source.*

Il tient au fait que, même avec une anti-cathode inclinée, la surface focale apparente n'est pas ponctuelle; ses extrémités A et B



(fig. n° 22 a) donnent donc, d'un même point de l'objet C, deux images D et E dont la distance  $f$  mesure l'étendue du flou; si l'on appelle  $d$  la distance source - film,  $e$  la distance maximale objet -

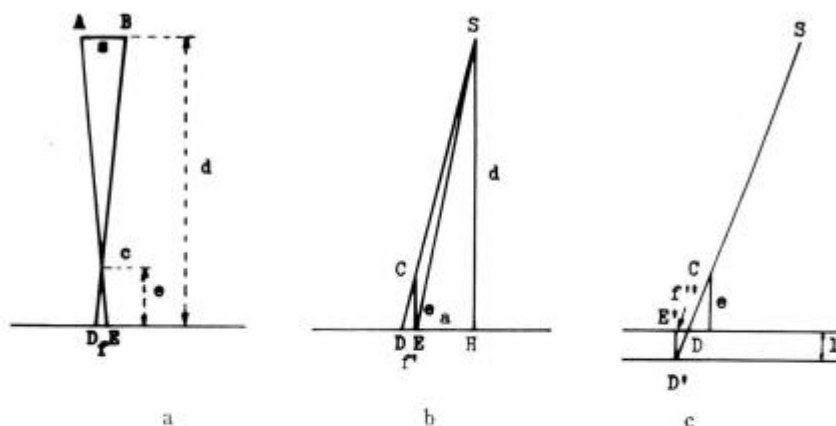


FIG. 22.  
Flous de diverses origines.

film (dans le cas particulier: 5 mm), et  $s$  la largeur de la source, on a, bien entendu:

$$\frac{f}{s} = \frac{e}{d - e}$$

que C se trouve, ou non, à la verticale de la source par rapport au film.

### 312 — *Flou dû à l'excentricité de l'échantillon.*

Il n'existe au maximum qu'une limite d'accroissement annuel, et une seule, qui puisse se trouver dans l'axe du rayonnement, et dont l'image radiographique soit par suite rigoureusement linéaire; les autres (fig. n° 22 b) se projettent suivant des ellipses dont le petit axe DE donne l'amplitude maximale du flou  $f'$  correspondant, et en appelant  $a$  l'excentricité de C par rapport à l'axe du rayonnement, on a:

$$\frac{f'}{a} = \frac{e}{d - e}$$

### 313 — *Flou dû à l'épaisseur du film radiographique.*

Avec un film double couche, on a, d'un même point C (fig. n° 22 c), une première image D qui se forme sur la face antérieure

du film, et une deuxième D' sur la face postérieure; lorsqu'on examine le cliché par transparence, ce deuxième point donne un flou supplémentaire  $f''$  égal à DE'; il s'ajoute au flou  $f'$  dû à l'excentricité, car il est toujours de sens contraire; il lui est lié par la relation:

$$\frac{f''}{f'} = \frac{l}{e}$$

si  $l$  est l'épaisseur du support.

Dans la pratique,  $l$  a une valeur voisine de 2/10 de mm, et  $e$  est égal à 5 mm, en sorte que le flou dû à l'épaisseur de la radiographie a pour effet de majorer de 4 % celui occasionné par l'excentricité.

On voit ainsi que les flous décrits ci-dessous sont, tous trois, proportionnels au facteur  $\frac{e}{d - e}$  dans lequel  $e$  est fixe; ils diminuent donc simultanément quand la distance source-film  $d$  augmente; quand  $d$  a une valeur fixe, le flou dû à la largeur de la source reste constant; les deux autres, au contraire, ont une valeur nulle pour le point de l'image situé dans l'axe du rayonnement, et augmentent lorsqu'on s'en éloigne.

Les flous  $f$  et  $f'$  sont entre eux comme la dimension maximale  $s$  de la surface focale apparente et comme l'excentricité  $a$ ; or,  $s$  est au maximum de quelques millimètres, alors que  $a$  peut dépasser 10 cm, sur une radiographie de format  $18 \times 24$  cm; c'est donc le flou dû à l'excentricité qui risque d'être, et de beaucoup, le plus grave.

### 32 — *Flous évitables.*

Ce sont ceux qui sont occasionnés par des prélèvements non perpendiculaires au fil du bois; si la tarière pénètre dans l'arbre en faisant un angle  $\pi/2 - \alpha$  par rapport aux couches annuelles d'accroissement (fig. n° 23 a), et si on radiographie par contact, directement sur le film, l'échantillon obtenu, chaque limite de cerne se projette à nouveau suivant une ellipse dont le petit axe  $f'''$  est égal à  $x \operatorname{tg} \alpha$  si  $x$  est le diamètre de la carotte (fig. n° 23 b).

Ce flou peut être particulièrement important puisqu'avec un angle  $\alpha$  de  $10^\circ$  par exemple, et un échantillon de 5 mm de diamètre, il atteint 0,9 mm.

Fort heureusement, il est possible de le supprimer totalement en inclinant l'échantillon sur le film d'un même angle  $\alpha$  (fig. n° 23 c).

Cette solution a malencontreusement pour conséquence de majorer l'épaisseur traversée qui devient :

$$\frac{x}{\cos \alpha}$$

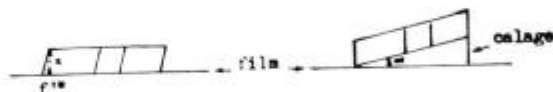
d'où, en application de l'équation fondamentale de l'absorption, une diminution de l'intensité transmise.

Mais, on peut, à nouveau, éviter qu'une erreur n'en résulte en ce qui concerne l'évaluation de la densité en corrigeant comme il convient l'équivalence bois-étalon de cellophane ainsi qu'on l'a vu au paragraphe 1 ci-dessus.

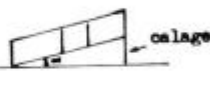
limites d'accroissements  
annuels



a



b



c

FIG. 23.

Flou dû à un prélèvement oblique.

#### 4 — Choix de la distance standard d'irradiation.

Il existe deux raisons importantes pour adopter une distance source-film aussi élevée que possible: la première tient aux considérations développées au paragraphe 2211 du chapitre II au sujet de l'uniformité de la dose reçue sur un même film, la deuxième est la conséquence des observations précédentes relatives aux flous de diverses origines; ces deux arguments convergents nous ont amené à choisir une distance d'irradiation de 2,5 m; ainsi le flou qui est dû à l'excentricité de l'échantillon, dont on a vu qu'il était le plus important, ne dépasse pas 1/500 de la valeur de cette excentricité, c'est-à-dire 2/10 de mm pour un point situé à 10 cm de l'axe du rayonnement.

Quant à la ~~différence~~ <sup>asymétrie</sup> d'irradiation, avec les mêmes données, l'erreur qu'elle occasionne n'atteint pas 2,5/1 000; la distance de 2,5 m permet donc de réduire à des valeurs acceptables l'un et l'autre de ces deux inconvénients, tout en n'exigeant pas d'expositions trop longues, comme ce serait le cas si on utilisait une distance d'irradiation sensiblement supérieure.

1) quant à la différence de distance entre la source et les divers points d'un même film.

### 5 — Choix de l'appareil émetteur.

Il doit répondre à un certain nombre de spécifications tenant, les unes, à la faible densité du matériau à étudier, les autres, à la grande distance entre la source et l'échantillon à analyser.

#### 51 — Conditions tenant à la faible densité du matériau.

Le bois ayant une densité très faible, il est nécessaire d'employer un rayonnement de grande longueur d'onde, si l'on veut obtenir des clichés convenablement contrastés; dans ce but, il convient tout d'abord, sauf si l'on recherche une linéarité aussi absolue que possible des courbes de noircissement, d'utiliser un spectre continu d'émission, sans autre filtration que celle évitable, mais tolérée, due à l'air, et celle, inévitable, due à la fenêtre du tube, puisque toute filtration supplémentaire se traduit, ainsi qu'on l'a vu, par un durcissement du spectre, les rayons les plus mous étant plus fortement absorbés que ceux de plus courte longueur d'onde.

La nécessité devant laquelle on se trouve d'employer un rayonnement peu pénétrant conduit à choisir un tube dont la fenêtre soit aussi peu absorbante que possible pour les rayons mous; le coefficient d'absorption variant comme le cube du nombre atomique du matériau utilisé, la meilleure transparence est obtenue avec le béryllium de nombre atomique 4 qui, étant un métal, peut, de plus, être facilement laminé en feuilles minces, tout en supportant des différences de pression élevées entre la face interne, où règne le vide, et la face externe de la fenêtre. Le problème de la répartition énergétique du spectre continu et de la filtration du rayonnement émis a été longuement étudié par KAYE et BINGS (1940) qui ont montré que l'intensité vraie d'émission pour la longueur d'onde  $\lambda$  était donnée par la formule:

$$I_{\lambda} \propto V^2 (V_0 - V) d\lambda$$

où  $V_0$  est la tension maximale en kV appliquée aux bornes du tube, et  $V$  la tension correspondant à  $\lambda$  d'après la loi de DUANE

$$(V = \frac{12\,400}{\lambda}).$$

Il est ainsi possible de calculer l'énergie émise, de l'exprimer en pouvoir d'ionisation dans l'air, connaissant le coefficient d'absorption massique de celui-ci pour les diverses longueurs d'onde, et à partir de cette énergie initiale, d'établir la répartition spectrale du rayonnement après filtration par divers matériaux en fonction de leur coefficient d'absorption propre.

ROGERS (1946) a procédé à de tels calculs pour comparer notamment les intensités émises dans les différentes longueurs d'onde avec des tensions accélératrices variées, en employant, soit une fenêtre en verre, soit une fenêtre en béryllium de même épaisseur. Les résultats auxquels il est parvenu font l'objet du graphique reporté sur la figure n° 24.

En intégrant les surfaces comprises entre l'axe des abscisses et les courbes pour 50 kV par exemple, on trouve que l'intensité totale transmise dans le cas du verre pyrex n'est que de 7,9 % de celle obtenue avec le béryllium; de plus, les spectres avec filtration par le verre sont tous déportés vers les courtes longueurs d'onde, et

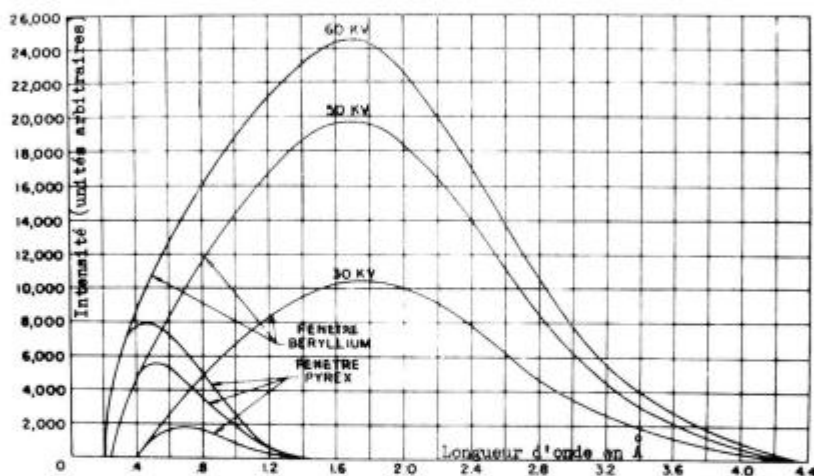


FIG. 24.

Variations du spectre continu suivant la nature et la fenêtre.

le durcissement est d'autant plus marqué que la tension accélératrice est plus élevée; on voit en particulier que, quelle que soit la tension appliquée aux bornes du tube, une fenêtre en verre arrête à peu près toutes les longueurs d'onde supérieures à 1 Å.

L'adoption d'une fenêtre en béryllium permet donc d'avoir à la fois un rayonnement plus intense et plus riche en radiation de basse fréquence.

## 52 — Conditions tenant à la grande distance entre la source et le film.

Les doses reçues sur une surface unitaire perpendiculaire à l'axe du rayonnement variant en raison inverse du carré de la distance à la source, l'éloignement de l'échantillon par rapport à celle-ci se

traduit obligatoirement par une augmentation, soit de l'intensité du courant de chauffage du filament, soit de la durée d'exposition; dans l'un et l'autre cas, ceci entraîne la nécessité de refroidir énergiquement l'anti-cathode.

Par ailleurs, le rendement énergétique des tubes à rayons X est particulièrement faible, et la puissance totale transportée par l'ensemble des radiations constituant le fond spectral continu n'est qu'une minime fraction de l'énergie électrique dépensée dans le tube. Le rendement est proportionnel à la différence de potentiel appliquée aux bornes et croît de plus avec le nombre atomique de l'anti-cathode; il y a donc lieu, pour éviter de trop longues expositions, de choisir un tube où celle-ci est constituée par un élément de nombre atomique aussi grand que possible, comme par exemple le tungstène ( $Z = 74$ ) qui a, en outre, l'avantage d'avoir un point de fusion élevé et d'être bon conducteur de la chaleur.

Une autre conséquence de la grande distance entre la source et l'échantillon est la possibilité qu'il y a d'utiliser un tube à large foyer; avec une distance de 2,5 m et des échantillons de 5 mm de diamètre, le flou dû à l'étendue de la surface focale apparente n'est, en application de la formule vue au paragraphe 311 ci-dessus, que de  $1/500$  de la largeur maximale de celle-ci; on peut ainsi opter pour un tube à large foyer puisqu'une source de 5 mm par exemple n'entraînera qu'un flou de 0,05 mm, absolument négligeable; par contre, l'utilisation d'une source de grande surface permet d'augmenter l'intensité du flux d'électrons qui vient frapper l'anti-cathode, et par suite, celle du rayonnement lui-même.

Nous employons donc un tube à anti-cathode de tungstène pourvu d'un foyer de  $5 \times 5$  mm et refroidi par une circulation d'eau dont le débit doit être au minimum de 2 litres par minute; ce tube est muni d'une fenêtre en béryllium de 1 mm d'épaisseur, et peut être alimenté avec une tension alternative réglable de 5 à 50 kV et un débit qui peut atteindre 50 milliampères; d'après le fabricant, la dose maximale d'émission est de 2 330 000 röntgens par minute et s'élève encore à 80 R/m à 50 cm avec une tension accélératrice de 50 kV.

## 6 — Caractéristiques d'exposition retenues.

### 61 — Cas général.

Pour les analyses de routine d'échantillons de 5 mm de diamètre pris à la tarière de Pressler, on a le choix entre 2 solutions:

Ou bien, on cherche à avoir une graduation en densité du bois qui soit rigoureusement exacte pour toute la gamme intéressée, et il faut alors donner le pas à la linéarité sur le contraste en adoptant des caractéristiques analogues à celles utilisées pour obtenir la

courbe de noircissement faisant l'objet de la figure n° 21 b, c'est-à-dire pour une quantité d'électricité transportée par le courant électronique de 6 750 mA.s avec une tension accélératrice de 23 kV et un rayonnement filtré par 0,8 mm d'aluminium.

Ou bien, on désire avant tout avoir des images très contrastées permettant de mettre en évidence les moindres variations locales de structure, et on accepte quelques sacrifices de linéarité pour y parvenir; on emploie alors les caractéristiques d'exposition de la figure n° 21 c (12 000 mA.s, 15 kV et sans filtration).

C'est, en général, cette dernière solution qui est retenue pour nos analyses de routine; sans doute la densité réelle en chaque point des courbes de variations n'est-elle pas exactement celle que l'on peut obtenir par extrapolation à partir de celles des deux étalons utilisés, en raison des défauts de linéarité de la courbe de noircissement; mais cela importe moins que de pouvoir déterminer si telle zone précise d'un échantillon a une densité supérieure ou inférieure à telle autre, et de faire des comparaisons analogues pour des arbres ou des stations différentes, ce qui est le but essentiel de l'analyse densitométrique.

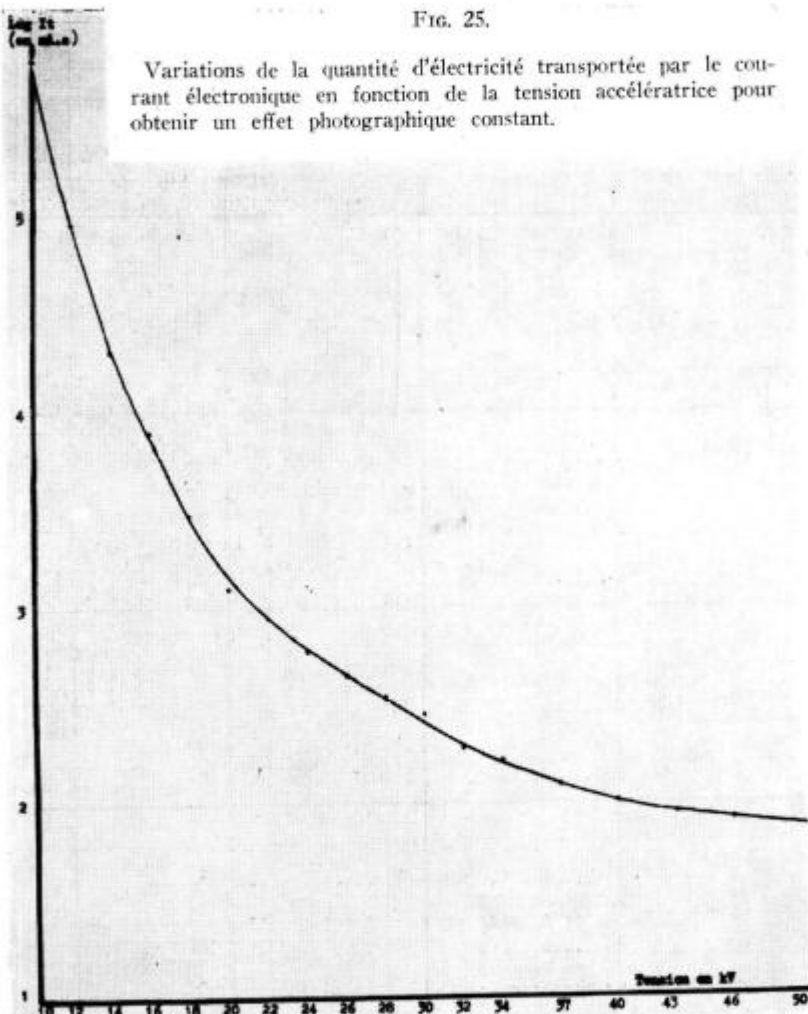
Au reste, un choix judicieux des étalons permet, si nécessaire, de cerner de plus près la valeur exacte des caractéristiques que l'on désire étudier; si l'on veut surtout avoir une bonne appréciation de la texture, on peut prendre un échantillon de référence dont le poids superficiel corresponde à la densité de base retenue pour la limite bois initial - bois final; si au contraire on cherche surtout à connaître d'une façon aussi précise que possible la valeur des densités maximales et minimales annuelles, il faut choisir des étalons dont les profils densitométriques soient au niveau moyen des pics correspondants.

Enfin, si l'on souhaitait utiliser les courbes d'enregistrement pour calculer la densité moyenne des carottes radiographiées, il conviendrait de sélectionner des échantillons repères tels qu'il y ait une certaine compensation entre la surestimation des densités intermédiaires et la sous-estimation des densités extrêmes qui résultent de l'assimilation quelque peu abusive de la courbe de noircissement à une droite (fig. n° 21 c).

Mais il existe bien entendu des moyens plus simples pour obtenir la densité d'une éprouvette de bois, et la méthode proposée serait de peu d'intérêt si elle ne devait servir qu'à la seule détermination de la densité globale. D'ailleurs, il faut se souvenir que les divers procédés traditionnels en usage pour la calculer ne donnent pas toujours des résultats concordants, en sorte que, logiquement, on ne doit pas attacher une importance excessive aux valeurs absolues des densités trouvées par analyse densitométrique de clichés radiographiques.

FIG. 25.

Variations de la quantité d'électricité transportée par le courant électronique en fonction de la tension accélératrice pour obtenir un effet photographique constant.





62 — *Cas particuliers.*621 — *Modifications de la tension accélératrice.*

Bien que les conditions d'exposition précédemment définies soient peu susceptibles de modifications lorsqu'on se contente de radiographier des échantillons de bois indigènes prélevés avec une tarière de Pressler de 5 mm, il peut arriver que l'on ait exceptionnellement à utiliser le même appareillage, soit pour des bois de densité plus élevée (bois tropicaux par exemple) ou des échantillons de plus forte épaisseur, soit au contraire pour des bois plus légers ou plus minces. On est alors conduit à adopter des tensions accélératrices qui peuvent être très différentes de celles qui sont employées pour le travail de routine, et il est, dans cette éventualité, nécessaire de connaître les conséquences qui en résultent sur le noircissement du film.

Le tableau suivant, établi dans cet esprit, donne les valeurs de la quantité d'électricité transportée par le courant électronique (produit  $It$  de l'intensité du flux électronique en mA par le temps d'irradiation en secondes) qui permettent d'obtenir une même densité photographique (voisine de 2 avec une fente de 0,15 sur 1 mm) lorsque la différence de potentiel appliquée aux bornes du tube varie de 10 à 50 kV, la distance source-film restant constamment fixée à 2,50 m; la figure n° 25 résume ces résultats sous forme graphique.

kV	$It$	Log $It$
—	—	—
10 .....	624 000 .....	5,795
12 .....	90 600 .....	4,957
14 .....	20 000 .....	4,301
16 .....	7 900 .....	3,898
18 .....	2 940 .....	3,468
20 .....	1 250 .....	3,097
22 .....	880 .....	2,944
24 .....	600 .....	2,778
26 .....	450 .....	2,653
28 .....	350 .....	2,544
30 .....	280 .....	2,447
32 .....	190 .....	2,279
34 .....	162 .....	2,210
37 .....	123 .....	2,090
40 .....	102 .....	2,009
43 .....	89 .....	1,949
46 .....	82 .....	1,914
50 .....	74 .....	1,869

On voit que, lorsque la tension accélératrice tombe en dessous des 15 kV habituellement utilisés, l'exposition doit augmenter considérablement (nécessitant l'emploi de coordonnées semi-logarithmiques pour l'établissement de la courbe représentative), en raison à la fois de la plus grande absorption du rayonnement par la fenêtre, par l'air et par l'enveloppe du film, de la baisse de rendement du tube et de la diminution de l'effet photographique pour les grandes longueurs d'onde.

Par contre, lorsqu'on durcit le rayonnement, on est amené à réduire l'exposition, mais dans des proportions bien moindres, au point d'arriver aux alentours de 50 kV à une quasi-stabilisation, ce qui paraît confirmer l'existence d'un minimum de l'effet photographique, déjà signalée par BELL (op. cit.). On peut remarquer incidemment, qu'à la distance de 2,50 m, le rayonnement n'est pas entièrement absorbé par l'air traversé pour une tension de 10 kV, alors que d'après la figure n° 19, il devrait l'être intégralement par 2 m d'air seulement; la raison en est que les abaques de DAY et TAYLOR ont été établis avec un tube muni d'une fenêtre de béryllium de 1,5 mm d'épaisseur, alors que celui que nous utilisons a une fenêtre de 1 mm.

#### 622 — *Modifications de l'épaisseur de l'échantillon.*

On a étudié au paragraphe précédent les changements à apporter à la quantité d'électricité transportée par le courant électronique en fonction des variations de la tension accélératrice pour que l'effet photographique reste constant; mais les résultats obtenus ne sont valables que dans l'hypothèse où l'émulsion reçoit la totalité de la dose incidente, c'est-à-dire lorsqu'aucun objet n'est interposé entre la source et le film.

Le problème que nous évoquons maintenant est tout à fait différent: il consiste à déterminer les caractéristiques de l'exposition (quantité d'électricité et différence de potentiel appliquée aux bornes du tube) pour que l'image d'un échantillon présente toujours le même contraste et reste située dans la même gamme de densités optiques lorsque son épaisseur varie.

Il résulte en effet des considérations théoriques développées plus haut que l'on peut toujours modifier le contraste en agissant sur la dose reçue; mais si l'on gardait constante la tension accélératrice pour radiographier des échantillons d'épaisseurs différentes, on ne pourrait obtenir un contraste donné que dans des zones de noircissement photographique fort éloignées les unes des autres; en fait, il n'existe, pour chaque épaisseur, qu'un couple intensité-tension, et un seul, permettant d'avoir, à temps d'exposition constants, des images semblables, à la fois en contraste et en densité.

Pour déterminer dans chaque cas l'intensité et la tension à employer, nous avons débité côte à côte dans une même éprouvette

de Douglas, 10 échantillons ne différant entre eux que par leur épaisseur qui s'échelonnait régulièrement de 1 à 10 mm. Le tableau suivant donne les caractéristiques d'exposition utilisées (toujours à une distance source-film de 2,50 m) pour en obtenir des radiographies identiques aux deux points de vue considérés :

Epaisseur en mm	Tension accélératrice en kV	Intensité flux électronique en mA	Temps d'exposition	Quantité d'électricité It en mA.s	Logarithme It
1	9	20	43h30mn	3 132 000	6,49582
2	11	20	2h30mn	180 000	5,25527
3	12,5	20	40mn	48 000	4,68124
4	14	20	11mn	13 200	4,12057
5	15,5	20	7mn30s	9 000	3,95424
6	16,5	20	3mn50s	4 600	3,66276
7	18	20	2mn30s	3 000	3,47712
8	19	20	1mn45s	2 100	3,32222
9	19,5	20	1mn25s	1 700	3,23045
10	20,5	20	1mn20s	1 500	3,20412

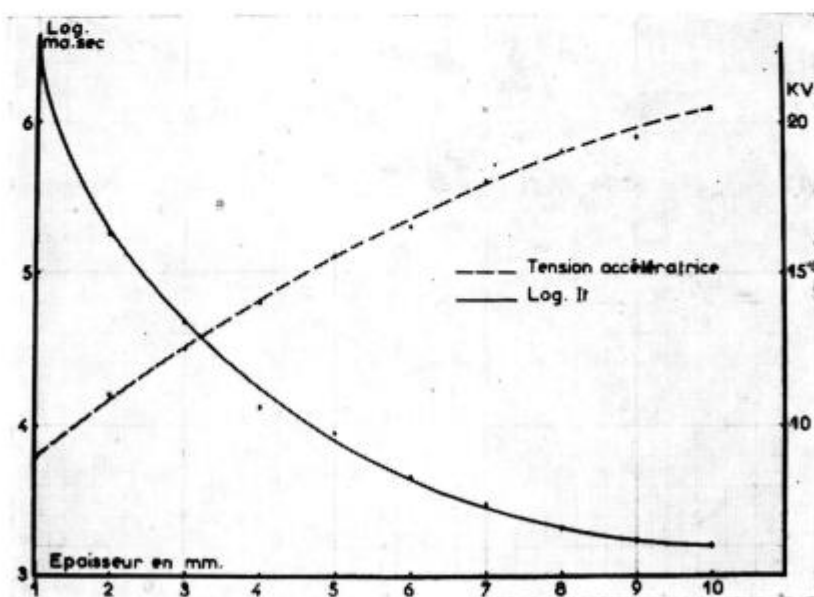


FIG. 26.

Variations des caractéristiques de l'exposition  
en fonction de l'épaisseur de l'échantillon.

Ces résultats sont reportés sur la figure n° 26 sous forme de deux graphiques jumelés dont l'un fournit les valeurs de la tension (échelle des ordonnées du côté droit en kV), et l'autre celles de l'exposition (échelle des ordonnées du côté gauche en log. mA. s.) en fonction de l'épaisseur en mm qui est portée en abscisse.

On observe que la tension accélératrice à employer croît lorsque l'épaisseur de l'échantillon augmente et, en conséquence, les temps d'exposition deviennent de plus en plus longs au fur et à mesure que l'on cherche à radiographier des échantillons plus minces.

Accessoirement, cette expérience a été mise à profit pour essayer de calculer, d'une façon certes approximative, la valeur du coefficient d'absorption massique globale  $\mu/\rho$  pour le bois de Douglas utilisé :

Au cours des multiples essais effectués à cette occasion, on a pu obtenir, pour des points correspondants d'échantillons d'épaisseur différente, des images de même densité photographique en employant une tension accélératrice et une intensité d'émission constantes, et en faisant varier uniquement les temps d'exposition.

Par exemple, avec une différence de potentiel appliquée aux bornes du tube de 11 kV et un milliampérage fixe donnant une dose incidente  $I_0$  invariable, on a obtenu un même noircissement pour un point de densité 0,25 en exposant 180 minutes l'échantillon de 3 mm et 218 minutes celui de 4 mm.

Les doses reçues par le film, après absorption, étaient :

$$I_{0,3} = I_0 e^{-\mu \times 0,3}$$

et

$$I_{0,4} = I_0 e^{-\mu \times 0,4}$$

avec, en application de la loi de réciprocité :

$$I_{0,3} \times 180 = I_{0,4} \times 218$$

ou encore :

$$180 e^{-0,3\mu} = 218 e^{-0,4\mu}$$

On en tire :

$$e^{0,1\mu} = \frac{218}{180} \quad \text{d'où :} \quad \mu = 1,92 \quad \text{et} \quad \frac{\mu}{\rho} = 7,7$$

On trouve ainsi un coefficient d'absorption massique globale élevé, ce qui est dû à la tension accélératrice utilisée qui est faible

et n'atteint la valeur nominale de 11 kV qu'une fois par période; le reste du temps, elle est encore plus basse, enrichissant le spectre continu en longueurs d'onde supérieures à celle qui pourrait être calculée d'après la loi de DUANE avec un courant de tension constante.

## 7 — Choix de l'appareil de mesure de la densité optique.

### 71 — *Considérations générales.*

Il existe de nombreux instruments de mesure permettant d'apprécier la quantité de lumière qui passe à travers un échantillon déterminé, et notamment tous ceux du type photomètre qui donnent une réponse proportionnelle à l'éclairement reçu; mais, pour l'application qui nous intéresse, il est nécessaire que l'appareil utilisé soit du type densitomètre, c'est-à-dire qu'il fournisse la valeur, non pas de la lumière transmise, mais de son logarithme, puisque seul celui-ci peut être lié à la densité du bois par une relation linéaire.

De plus, en raison du caractère microscopique de certains éléments anatomiques susceptibles d'être étudiés sur une radiographie de « carotte », en raison aussi de la nécessité de n'explorer que l'axe même de l'image si l'on veut éviter les répercussions, sur l'opacité du cliché, des changements d'épaisseur dans le sens tangentiel, il faut que l'analyse des densités optiques puisse être faite sur de très petites surfaces, d'où la nécessité d'un appareil plus précis appelé microdensitomètre.

Enfin, il est indispensable, pour que l'on puisse dans le minimum de temps explorer les images radiographiques d'un grand nombre d'échantillons, que l'instrument fournisse directement un enregistrement des variations de la densité optique, et soit donc un microdensitomètre enregistreur.

### 72 — *Description de l'appareil utilisé.*

La figure n° 27 représente un schéma très simplifié du microdensitomètre en service au Laboratoire, dont une photographie fait également l'objet de la figure n° 28; le principe en est le suivant: la lumière provenant d'une source unique S est divisée en deux faisceaux dont l'un traverse l'échantillon à analyser et l'autre un coin de densité variable CO, tous deux étant reçus alternativement, par l'intermédiaire d'un volet obturateur V tournant à 100 tours par seconde, sur un photomultiplicateur unique Ph.

Celui-ci émet, à chaque rotation du volet, un signal proportionnel à la différence des intensités lumineuses des deux faisceaux; ce signal est utilisé comme tension d'écart d'un servo-moteur SM qui commande le déplacement du coin de façon à obtenir une éga-

lisation des deux flux lumineux, c'est-à-dire de façon que, à chaque instant, la densité photographique sur le film analysé soit égale à la somme de la densité du coin optique mobile et de celle d'un coin atténuateur CA réglable à la main et destiné à corriger les différences d'opacité du fond d'une radiographie à l'autre.

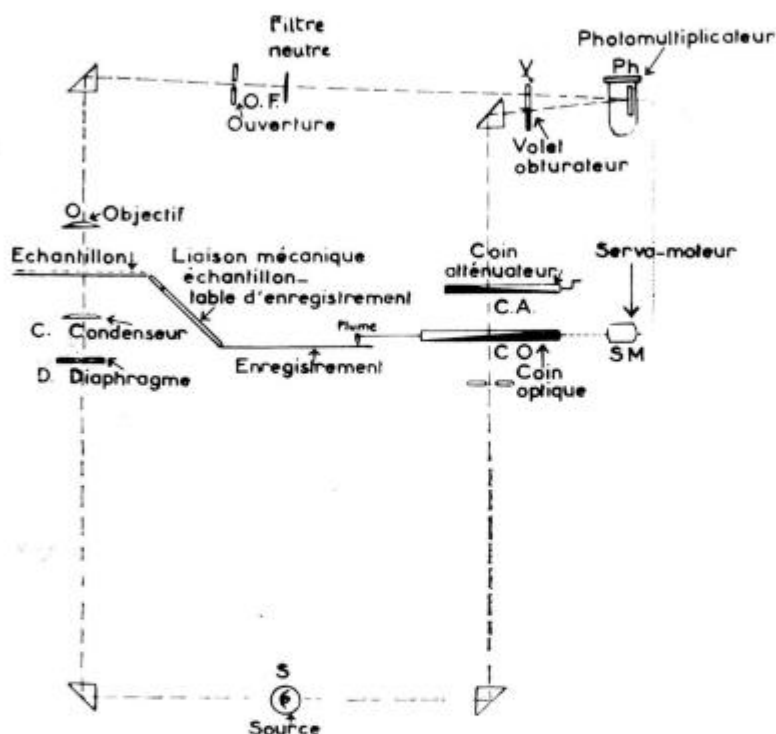


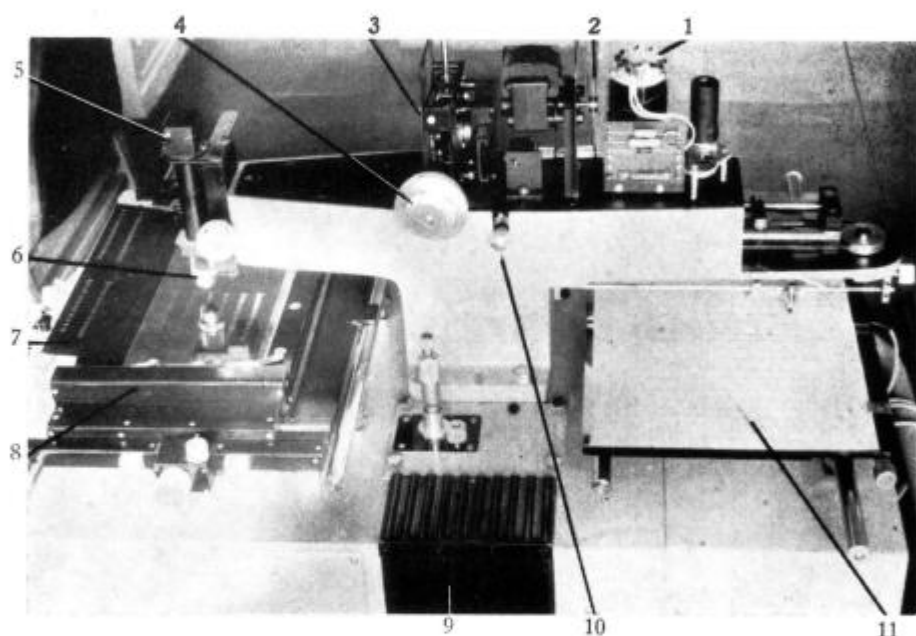
FIG. 27.

Schéma d'un microdensitomètre.

Il suffit de rendre un dispositif d'enregistrement solidaire des mouvements du coin pour obtenir en ordonnée une représentation graphique des variations de densité, le déplacement de l'échantillon étant, quant à lui, porté en abscisse à un grossissement déterminé (variable de 1/1 à 1 000/1), grâce à une liaison mécanique entre la table porte-échantillon et la table d'enregistrement.

La zone analysée, sur laquelle la lumière est concentrée par un condenseur C, peut être réduite à des dimensions infimes, de l'ordre du micron, par le jeu d'une ouverture finale qui en règle la largeur et la longueur après agrandissement par passage à travers un objectif O et projection sur le plan du diaphragme OF.

La mise en place de l'échantillon peut être ajustée dans les deux sens perpendiculaires à l'aide de verniers de précision, et l'angle d'alignement du cliché est également susceptible d'être corrigé par rotation de l'ensemble de la platine; il est ainsi possible de concentrer le faisceau lumineux sur l'axe de la « carotte » lorsque l'image de celle-ci n'est pas parallèle au bord du film, et même, en cas de besoin, d'analyser par segments les variations de densité d'un échantillon qui n'est pas rigoureusement rectiligne.



1. Photomultiplicateur. - 2. Volet obturateur. - 3. Ouverture finale. - 4. Réglage fente exploration. - 5. Prisme. - 6. Objectif. - 7. Radiographie. - 8. Platine. - 9. Source. - 10. Réglage coin atténuateur. - 11. Graphique d'enregistrement.

FIG. 28.

Photographie d'un microdensitomètre.

Chaque coin optique permet de mesurer une gamme de densités déterminée; un coin optique de densité variable de 0 à 2 par exemple correspondant à des variations de 1 à 100 des intensités lumineuses transmises, convient parfaitement pour la plupart des bois étudiés, alors que, pour d'autres échantillons moins contrastés, un coin de 0 à 0,5 peut suffire.

La vitesse d'exploration est réglable, et un servo-mécanisme la fait en outre varier automatiquement, de façon qu'elle soit à chaque instant inversement proportionnelle aux variations de densité.

Un tel microdensitomètre est donc un appareil doté d'une grande précision et d'une haute fidélité de reproduction. Sa vitesse d'enregistrement est remarquable: la plume peut se déplacer à 33 cm/seconde, et une carotte de 10 cm de longueur, par exemple, peut aisément être explorée en moins d'une minute, y compris les temps préparatoires consacrés à la mise en place des feuilles d'enregistrement et à l'alignement de l'image sur la platine porte-échantillon.

### 73 — *Caractéristiques d'exploration.*

Dans les applications courantes, il n'est pas indiqué d'utiliser au maximum le pouvoir de résolution de l'appareil; on a vu, par exemple, dans la 1<sup>re</sup> Partie, chapitre I - paragraphe 334, que les variations de dimensions des cellules n'étaient pas les mêmes d'une file radiale de fibres à l'autre; il convient par suite, si l'on veut avoir un enregistrement des variations moyennes de densité pour un accroissement annuel, d'employer un faisceau analyseur de largeur suffisante; de plus, si l'on utilise une fente d'exploration trop fine, on risque d'obtenir un enregistrement faussé par les microvariations de noircissement dues aux irrégularités du grain des radiographies, microvariations d'autant plus à craindre que l'émulsion est plus rapide.

Pour le travail de routine, on est ainsi conduit à employer un spot relativement étendu de 0,1 mm de largeur dans le sens radial sur 0,5 mm de longueur dans le sens tangentiel.

Mais, dans certains cas particuliers, on peut être amené à augmenter ou à diminuer ces dimensions standard d'exploration: on peut aller jusqu'à 0,5 mm sur 2 mm, par exemple, lorsque l'on a affaire à des bois comportant de gros éléments anatomiques irrégulièrement disposés, comme les vaisseaux des bois à zone poreuse, et lorsqu'il est, par suite, nécessaire, si l'on veut avoir une bonne image d'ensemble des variations de la densité, d'intégrer les changements qui interviennent à une échelle presque macroscopique.

Par contre, si l'on souhaite avoir un enregistrement aussi précis que possible, rendant compte d'un maximum de détails, il faut recourir à une émulsion à grain très fin, type émulsion pour micro-radiographie, et l'on peut alors utiliser des fentes d'exploration de très faible surface, par exemple  $5 \times 5$  microns.

## 8 — **Résultats obtenus.**

### 81 — *Caractéristiques générales.*

#### 811 — *Rapidité.*

La durée moyenne nécessaire pour la radiographie d'une série de 15 échantillons, par exemple, peut être estimée, mise en place



comprise, à 12 minutes; le développement du cliché prend pour sa part une dizaine de minutes, mais il est de pratique courante d'y procéder pendant qu'une nouvelle radiographie est prise; finalement, le temps de travail effectif rapporté à un échantillon est inférieur à 1 minute; quant à l'analyse densitométrique, on a vu qu'elle nécessite moins d'une minute pour explorer l'image d'une « carotte de sondage » de 10 cm de longueur.

En tenant compte de tous les temps morts, on voit donc que le temps de travail actif, pour obtenir une courbe des variations de la densité à partir d'un échantillon brut prélevé à la tarière de Pressler, n'excède pas 2 minutes.

### 812 — *Précision.*

La précision de la méthode peut être affectée de trois façons :

- par les flous de toutes origines (prélèvement non perpendiculaire au fil du bois, rayonnement non parallèle aux limites d'accroissements annuels, etc...),
- par la possibilité de diffusion du rayonnement entre zones de densités différentes,
- par la largeur de la fente d'exploration optique.

Or, un critère unique permet de contrôler l'ensemble de ces causes d'erreur et de définir par suite le degré de précision de la méthode : la netteté du passage du bois d'été d'une année au bois de printemps de l'année suivante, tout au moins pour les essences forestières de la zone tempérée à cernes annuels nettement différenciés.

Il est clair en effet que, pour ces bois, il n'existe pas de zones de transition entre les dernières cellules à paroi épaisse et à petite cavité du bois final, et les premières cellules à paroi mince et à large lumen du bois initial suivant; la densité du bois diminue instantanément de sa valeur maximale à sa valeur minimale, et une méthode idéale devrait donc permettre d'obtenir des courbes de variations de densité où le passage d'un accroissement annuel au suivant se traduirait, sur le graphique, sous forme d'une droite rigoureusement parallèle à l'axe des densités.

La méthode par analyse densitométrique de clichés radiographiques n'atteint pas cette précision idéale, mais s'en approche d'une façon qui, pour les analyses de routine, est tout à fait satisfaisante; dans la pratique courante, en effet, les limites de cernes apparaissent sur les courbes densitométriques obtenues comme des droites très légèrement inclinées par rapport à l'axe des densités, la différence maximale d'abscisse entre le sommet et le pied de ces droites étant, à titre d'exemple, pour une densité passant de 0,8 à la fin du bois final à 0,3 au début du bois initial, de 2 mm au gros-

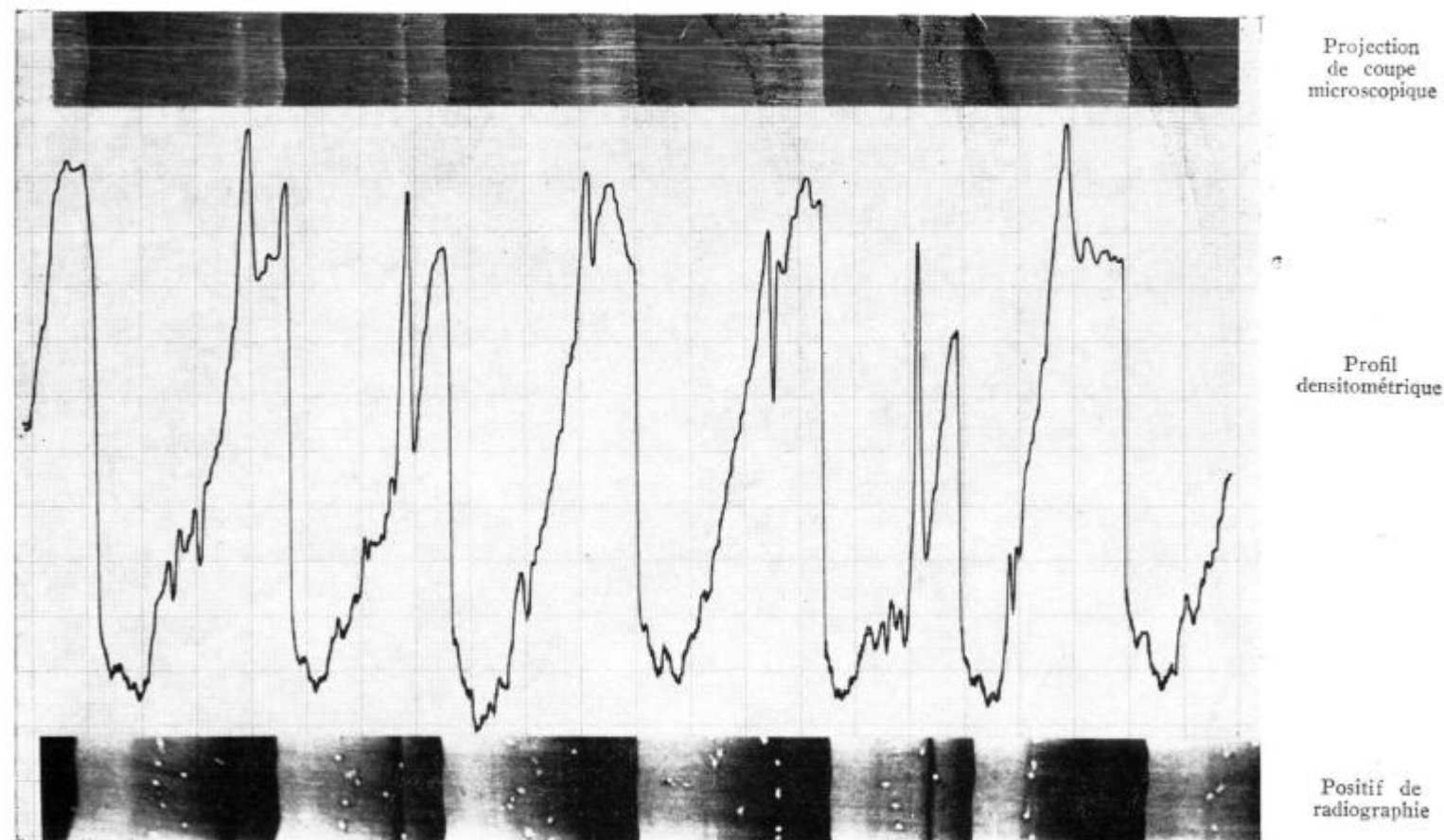


FIG. 29. — Pin maritime 0 221 E.

sissement 5, ce qui correspond en grandeur réelle à une imprécision maximale de 0,4 mm.

On peut avoir une idée de la fidélité de la méthode en comparant une radiographie et une coupe microscopique d'un même échantillon. Sur la figure n° 29 sont regroupés un positif de radiographie au grossissement 5 d'une carotte de 5 mm de diamètre de Pin maritime, le profil densitométrique obtenu à partir de ce cliché et une projection de la coupe microscopique correspondante avec un rapport d'agrandissement identique. Cet échantillon a été choisi précisément parce qu'il renfermait de nombreuses anomalies et que sa structure anatomique était très irrégulière.

On peut constater sur la coupe microscopique qu'aucun des 7 cernes de l'échantillon ne suit le schéma général de variation des éléments cellulaires constitutifs: jamais la dimension des fibres ne va en diminuant progressivement du début à la fin de la saison de végétation, pas plus que l'épaisseur des membranes n'y augmente de façon régulière.

En particulier, pour aucun accroissement annuel, les cellules les plus petites à parois les plus épaisses ne se trouvent, comme cela serait normal, à la fin du bois d'été, si bien que la densité du bois va systématiquement en diminuant à l'approche du cerne suivant; or, tous les phénomènes aberrants que l'on observe sur la coupe sont également, et plus facilement, décelables sur la radiographie, et surtout sur la courbe de variations de densité obtenue à partir de celle-ci.

Pour ne citer que quelques exemples, on retrouve bien sur le graphique les pics à forte densité des cernes n° 2 et 5 suivis d'autres pics à densité plus faible en fin de saison de végétation; on peut observer aisément le palier de densité à peu près constante qui suit le faux cerne de l'accroissement n° 1, et également cet autre palier très étendu à la fin du cerne n° 6 qui correspond à une large zone de bois de densité uniforme, beaucoup plus faible que celle du pic qui précède; de même, l'augmentation progressive du diamètre des trachéides, qui se produit à la fin du bois d'été du cerne n° 3, apparaît de façon très nette sur le profil densitométrique sous forme d'une portion de courbe à pente descendante précédant la ligne verticale qui marque le passage au cerne suivant.

### 813 — *Pouvoir de résolution.*

Celui du microdensitomètre dépassant largement les besoins pour l'analyse courante, le pouvoir de résolution de la méthode n'est limité que par la netteté des radiographies utilisées.

Lorsqu'on emploie des films standard, à l'exclusion de toute émulsion spéciale à grain très fin, on peut arriver à discerner, sur les images d'échantillons prélevés à la tarière de 5 mm de diamètre, des éléments aussi fins que des fibres de bois de printemps, dont le diamètre varie entre 25 et 40 microns (fig. n° 30).

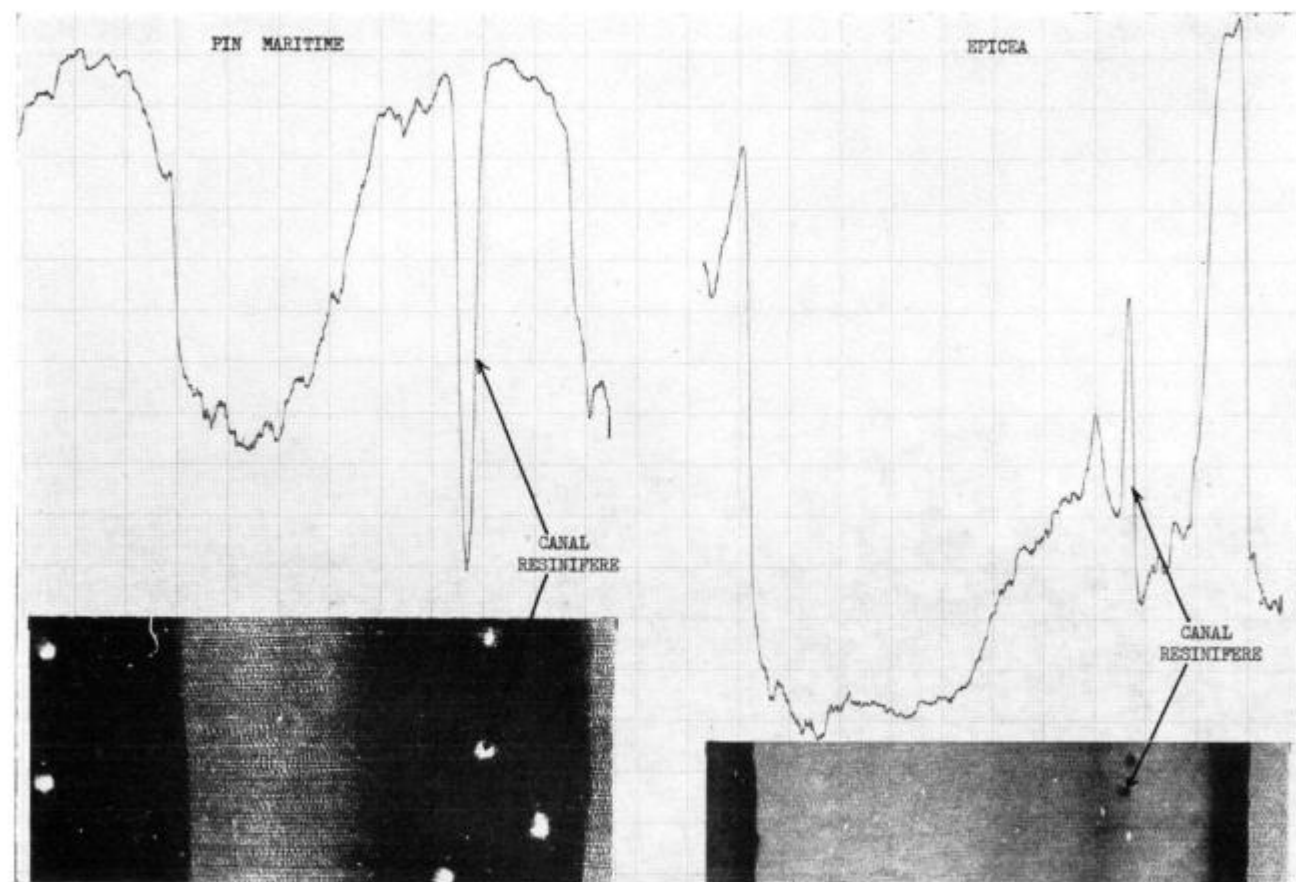


FIG. 30. — Etudes de structure fine sur radiographies et courbes densitométriques au grossissement 20.

Avec une fente d'exploration de  $20\ \mu$  et un rapport de grossissement de 20/1 pour la largeur des cernes, chaque fibre est marquée sur la courbe densitométrique par un petit pic; pour aller au-delà, c'est-à-dire pour pouvoir apprécier sur les graphiques d'enregistrement des épaisseurs de membranes ou des diamètres de cavités cellulaires, il faudrait, d'une part, se servir d'une émulsion type microradiographique, d'autre part, agrandir jusqu'à 1 000 fois environ l'échelle des abscisses, mais une telle utilisation sort manifestement du cadre des études de variations de la densité du bois.

On peut observer accessoirement sur la figure n° 30 que des éléments anatomiques de plus fortes dimensions, comme les canaux sécréteurs, sont parfaitement explorés par le microdensitomètre, et que leur taille peut, dès lors, être estimée avec une assez bonne précision sur les graphiques obtenus.

Le cliché de droite représente un positif de radiographie d'Épicéa et un profil avant passé au niveau d'un canal résinifère; celui-ci, marqué par un pic dans le sens des densités croissantes, correspond à une forte absorption du rayonnement: c'est donc un canal résinifère plein; son diamètre est de l'ordre de  $50\ \mu$ . Le cliché de gauche concerne un accroissement annuel de Pin maritime, dont le profil densitométrique passe, comme le précédent, par un canal résinifère, mais celui-ci se traduit par un pic dirigé vers les faibles densités du bois; son image radiographique est donc plus opaque que celle de la matière ligneuse environnante: il s'agit par suite d'un canal résinifère vide, dont le diamètre est supérieur à  $100\ \mu$ .

#### 814 — *Reproductibilité.*

Elle peut être affectée aux trois étapes successives de la méthode: prélèvement, radiographie, analyse densitométrique.

Au stade prélèvement, on sait que les échantillons peuvent être différents suivant la hauteur et l'orientation du sondage effectué, et les variations systématiques qui se produisent de ce fait ont déjà fait et feront encore l'objet d'études suivies, qui sont précisément facilitées par l'analyse des courbes de variations de la densité.

Mais il peut être utile de vérifier que deux prélèvements exécutés avec la même tarière, sur le même arbre, suivant une même direction et à des hauteurs voisines, donnent bien des images radiographiques identiques, ce qui entraîne notamment que les carottes prises avec une tarière donnée aient des diamètres rigoureusement égaux sur toute leur longueur.

Au stade radiographie, il faut s'assurer que deux images d'un même échantillon, développées indépendamment l'une de l'autre, à la suite d'expositions séparées, sont, sinon identiques (on a vu que la variabilité de nombreuses données photographiques rend difficile une identité absolue), du moins comparables, c'est-à-dire qu'on peut y relever, à des échelles éventuellement différentes, les mêmes dé-

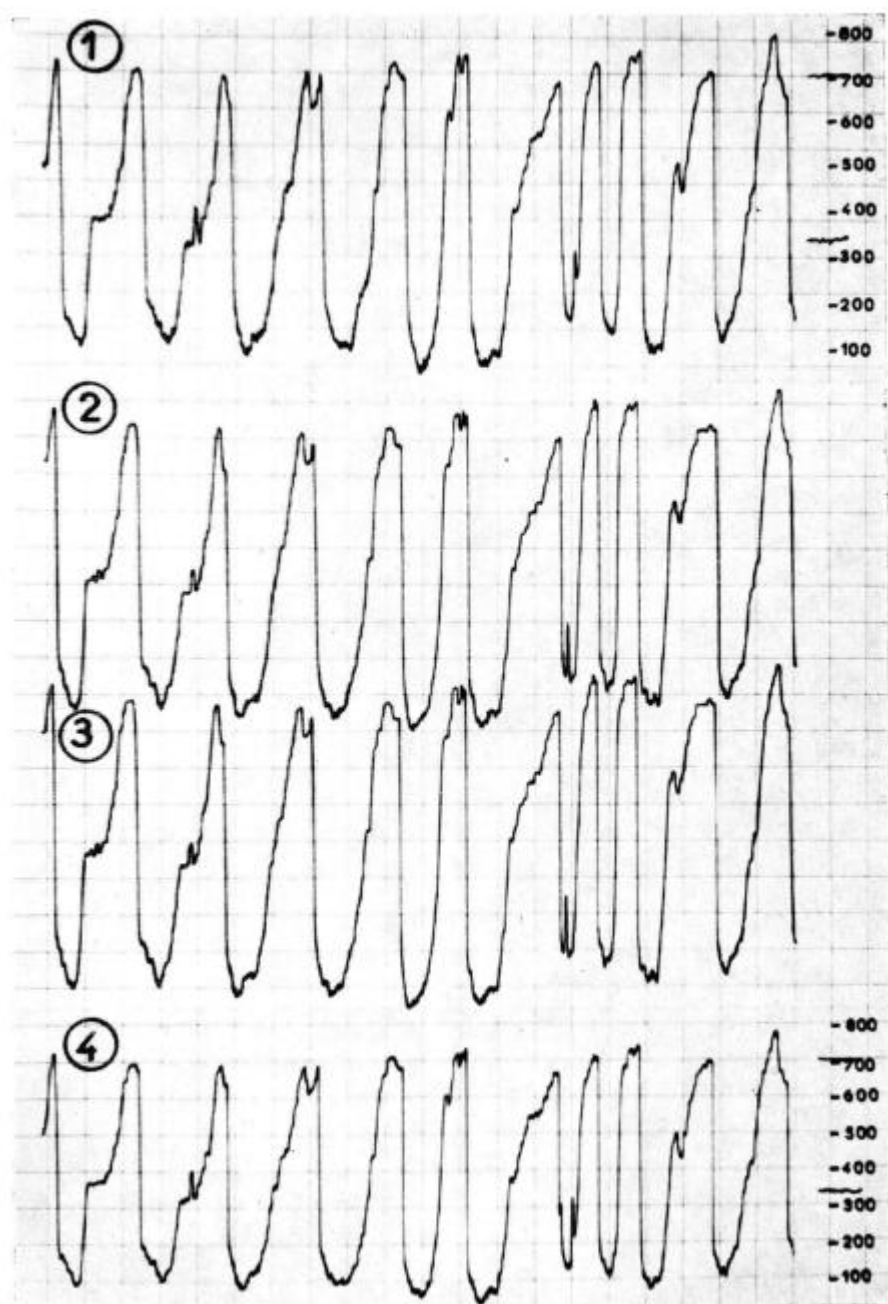


FIG. 31.

Etudes de reproductibilité (Douglas).

tails, et en tirer, grâce aux étalons de référence utilisés, les mêmes indications quantitatives.

Au stade densitométrie enfin, il convient d'étudier la similitude des courbes obtenues en explorant plusieurs fois, avec des caractéristiques constantes, la même image radiographique, ce qui permet de contrôler que les pics des courbes de variations de densité ne sont pas l'effet de caprices de l'appareillage électronique utilisé, mais correspondent bien à des modifications de structure du bois.

La figure n° 31 regroupe les divers profils obtenus au cours des tests de reproductibilité qui sont résumés dans le tableau suivant :

N° du Profil .....	1	2	3	4
N° de l'Echantillon .....	1	2	2	1
N° de la Radio .....	764	764	765	766

La comparaison des profils 1 et 2, faite pour vérifier la reproductibilité échantillon, montre que les profils correspondant à des carottes différentes tirées d'un même arbre sont tout à fait semblables, les quelques écarts minimes observés étant dus vraisemblablement à des microvariations de structure.

La comparaison des profils 2 et 3 permet d'intégrer l'étude de la reproductibilité des radiographies et celle des courbes densitométriques, puisqu'il s'agit de deux radiographies distinctes d'un même échantillon, développées séparément, et dont les images ont bien entendu été explorées l'une après l'autre; on voit qu'ici les graphiques d'enregistrement sont pratiquement identiques au point d'être superposables l'un à l'autre.

Il convient d'ailleurs de signaler à ce sujet que tous les profils densitométriques qui figurent dans le présent travail ont été obtenus au terme de plusieurs explorations successives d'un même cliché, de façon à avoir des traits particulièrement nets susceptibles de bien ressortir à la photographie; sur aucun, un écart supérieur à 1/2 mm ne peut être relevé.

Les radiographies 764 et 765, faites le même jour en contrôlant très soigneusement les caractéristiques d'exposition et de développement, et en utilisant le même révélateur au même degré d'usure, ont exactement le même noircissement, ce qui explique que les images qu'elles portent soient identiques. Mais on a vu qu'il n'en est pas toujours ainsi; pour vérifier que la reproductibilité de la méthode reste bonne, même lorsque l'opacité d'ensemble de la radiographie varie, nous avons volontairement sous-exposé le cliché n° 766 par rapport au 764; le profil densitométrique obtenu est par suite moins contrasté, mais cette baisse de contraste affecte aussi, dans une même proportion, les deux étalons; on peut ainsi vérifier que les divers pics des courbes 1 et 4, non seulement sont situés aux mêmes emplacements, mais encore correspondent à des valeurs de densité identiques.

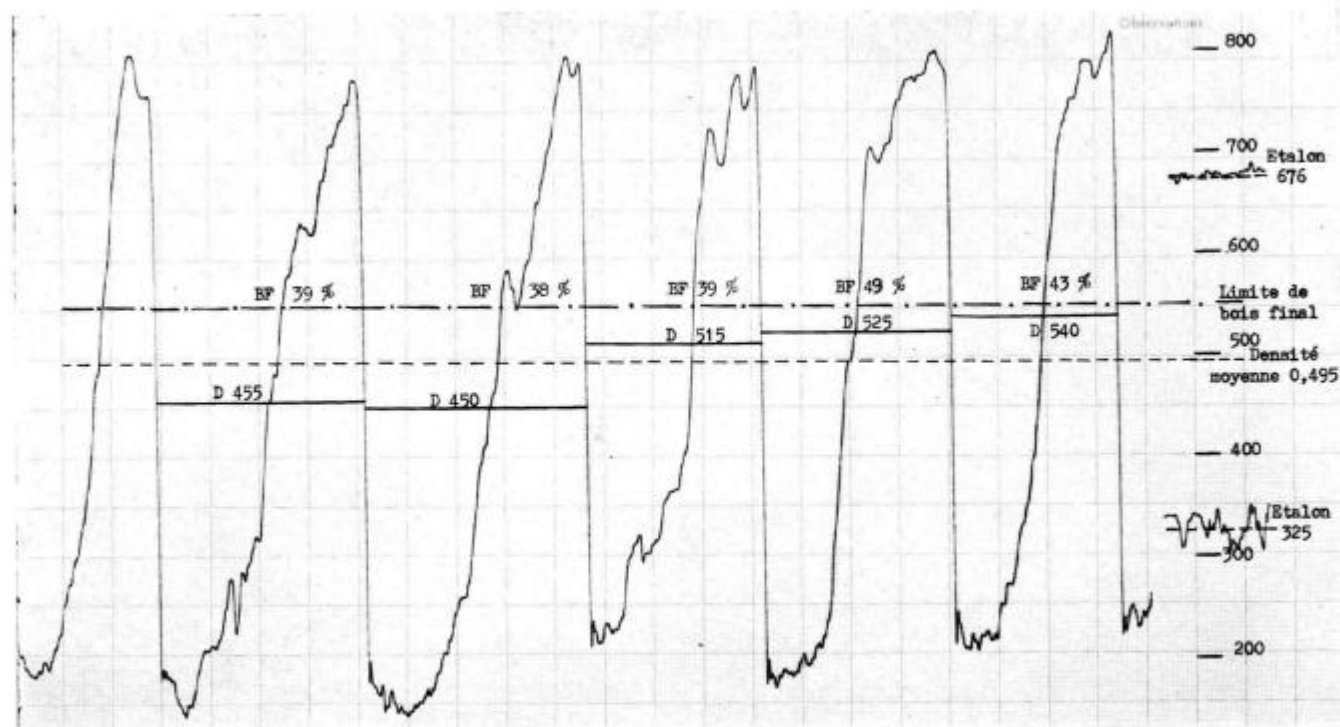


FIG. 32. — Détermination de la densité moyenne, de la texture et des densités des divers cernes (Douglas).



82 — *Détermination de routine de la densité et de la texture.*

Elle ne soulève guère de problèmes à partir du moment où l'on dispose, sur un même film, de l'image radiographique du bois étudié et de celle de deux étalons de densité connue qui permettent de graduer directement l'axe des ordonnées en densité du bois, par simple extrapolation; pour avoir la densité moyenne, il suffit tout naturellement de calculer la surface comprise entre une parallèle à l'axe des abscisses et la courbe densitométrique, ce qui peut se faire par planimétrie, mais est incomparablement plus aisé lorsque le microdensitomètre employé est muni d'un dispositif intégrateur. En divisant la surface trouvée par la longueur de l'échantillon, on obtient une ordonnée moyenne qui donne la valeur de la densité pour l'ensemble de l'échantillon. La même méthode, appliquée à chaque accroissement annuel pris isolément, permet d'évaluer rapidement la densité moyenne des divers cernes successifs.

Quant au calcul du pourcentage de bois d'été, il est également simple: en comparant, pour chaque essence, le profil densitométrique d'un échantillon et la coupe microscopique correspondante, on détermine la densité au point de passage bois initial - bois final; cette densité moyenne, établie une fois pour toutes, est ensuite utilisée comme densité limite pour tous les échantillons de même espèce; le pourcentage de bois d'été s'obtient en traçant une parallèle à l'axe des abscisses au point correspondant à la densité de base adoptée, en mesurant la largeur de bois d'été interceptée et en la divisant par la longueur totale de l'accroissement annuel.

Il semblerait même que, dans la plupart des cas, on puisse adopter une densité fixe pour la limite bois initial - bois final, les variations entre espèces étant, somme toute, relativement faibles; nous avons pu vérifier qu'une densité de 550 convient pour de nombreuses essences résineuses exotiques à croissance rapide, et nous ne recourons à une autre valeur de base qu'assez exceptionnellement, lorsque l'on a affaire à des bois constitués de fibres à membrane particulièrement mince et à lumen petit, ou particulièrement épaisse avec de grandes cavités cellulaires.

Sur la figure n° 32 ont été déterminées, comme indiqué ci-dessus, la densité moyenne, la densité des divers cernes et la texture pour 5 accroissements annuels successifs d'un échantillon de Douglas; la densité vraie de cet échantillon, calculée par pesée et détermination du volume à l'état sec à l'air, a été trouvée égale à 498, ce qui correspond parfaitement avec celle qui résulte de l'analyse densitométrique. Il est bien évident cependant qu'une coïncidence aussi rigoureuse ne saurait être atteinte dans tous les cas, compte tenu des faibles écarts par rapport à la linéarité qui sont acceptés pour les analyses de routine.

---

## TROISIÈME PARTIE

### EXEMPLES D'UTILISATION DES COURBES DE VARIATIONS DE LA DENSITE DU BOIS

---

#### CHAPITRE I

#### ETUDES QUALITATIVES BASEES SUR LA FORME DES COURBES DE VARIATIONS DE DENSITE

---

##### 1 — Le Hêtre.

Le problème de la qualité du Hêtre a déjà été évoqué dans une étude précédente (POLGE, 1963 b, op. cit.). Rappelons seulement qu'un Hêtre de bonne qualité technologique doit présenter à la fois une faible densité, une faible dureté et un faible retrait, ces trois facteurs se trouvant, et fort heureusement, en corrélation étroite entre eux, et étant tous trois, pour une même station, liés à l'importance relative du houppier par rapport à la hauteur du fût. Du point de vue anatomique, un tel bois est caractérisé par la présence de gros et nombreux vaisseaux, souvent groupés par 2 ou 3, et s'étendant sur presque toute la largeur de la zone d'accroissement. Un Hêtre de mauvaise qualité, au contraire, a des vaisseaux petits et isolés qui vont en se raréfiant au fur et à mesure que l'on se rapproche de la fin de la période de croissance en diamètre.

Toutes ces caractéristiques se retrouvent, ainsi qu'on l'a vu, sur les profils densitométriques: la courbe d'enregistrement d'un bois de ce deuxième type est toute entière déportée vers les faibles opa-

cités si on la compare à celle d'un Hêtre de bonnes caractéristiques technologiques; la montée en densité est plus rapide au début de la saison de végétation, d'où un profil convexe dans le sens des densités optiques décroissantes, alors qu'un Hêtre tendre et léger donne un profil concave.

## 2 — Le Chêne.

Avec ses gros vaisseaux, ses plages de fibres irrégulièrement réparties et ses rayons ligneux de forte taille, le Chêne a une structure interne très différenciée sur laquelle la radiographie donne des renseignements intéressants; mais l'interprétation des courbes densitométriques en est assez délicate. C'est au reste un bois dont la variabilité est beaucoup plus grande qu'on ne le pense généralement, non seulement d'une station à l'autre, mais aussi à l'intérieur d'une même station. Les 5 figures nos 33 a à 33 e permettent une bonne appréciation de ce phénomène: les 4 premières correspondent à des carottes en provenance d'un peuplement de Chênes dits « de Bourgogne » cultivés sur un sol riche, profond et très frais, formé d'alluvions récentes, en bordure de la Saône; la cinquième concerne, au contraire, un arbre de la forêt de Champenoux poussant sur un sol liasique lessivé à pseudogley, assez bien pourvu au point de vue chimique, mais lourd et compact.

L'arbre 1-9 est à la fois léger et tendre (infra-densité 385, couple de torsion à la tarière: 250 cm.kg), ce que confirme le profil densitométrique s'inscrivant, en grande partie, sous celui de l'étalon 676; les éléments fibreux sont très localisés en plages triangulaires représentant une faible partie de la largeur de l'accroissement annuel; la zone poreuse est nettement délimitée, et une bande de parenchyme périvasculaire y est très apparente.

Le n° 1-14 est également léger (infra-densité 382) et exceptionnellement tendre (couple 200); les éléments à faible densité (parenchyme et trachéides longitudinales) forment la majeure partie de la zone d'accroissement (vaisseaux mis à part); la texture est faible puisque les cernes sont relativement fins; presque tout le profil a une densité inférieure à celle de l'étalon le plus lourd.

Le Chêne n° 1-27, bien que provenant de la même station que les précédents, en diffère considérablement aux points de vue anatomie du bois et densité; bien que la zone poreuse soit très étendue (4 rangées de vaisseaux, voire plus), le bois est lourd: infra-densité 540, et dur: couple 350; ceci s'explique par la grande importance des zones de fibres qui s'allongent radialement sur toute la largeur des cernes, et ne laissent que peu de place au parenchyme à paroi mince; corrélativement, le profil densitométrique est en grande partie situé au-dessus de celui de l'étalon supérieur.

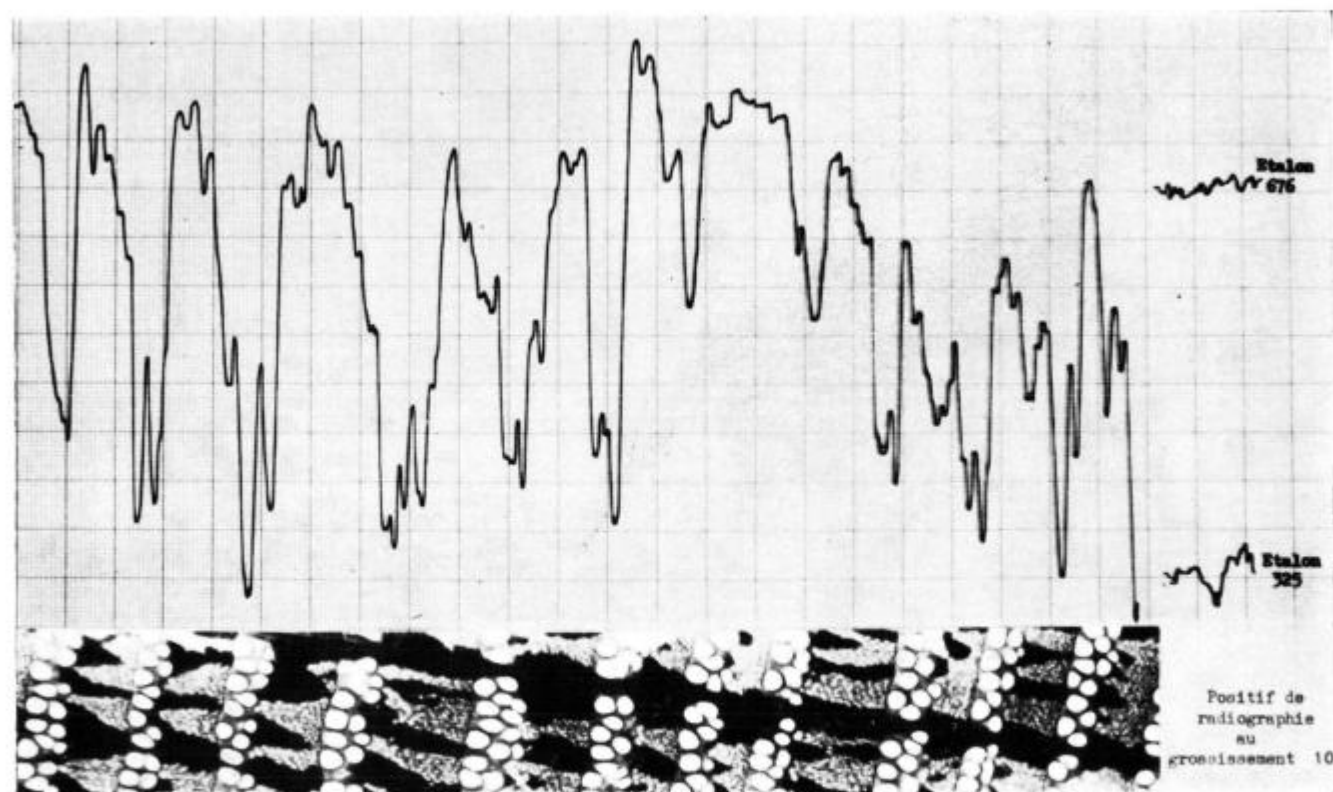


FIG. 33 A. — Chêne n° 1-9

Enregistrement n° 686 - Bras 10 - Objectif 4 - Fente 50 - Sensibilité 3 - Densité 2

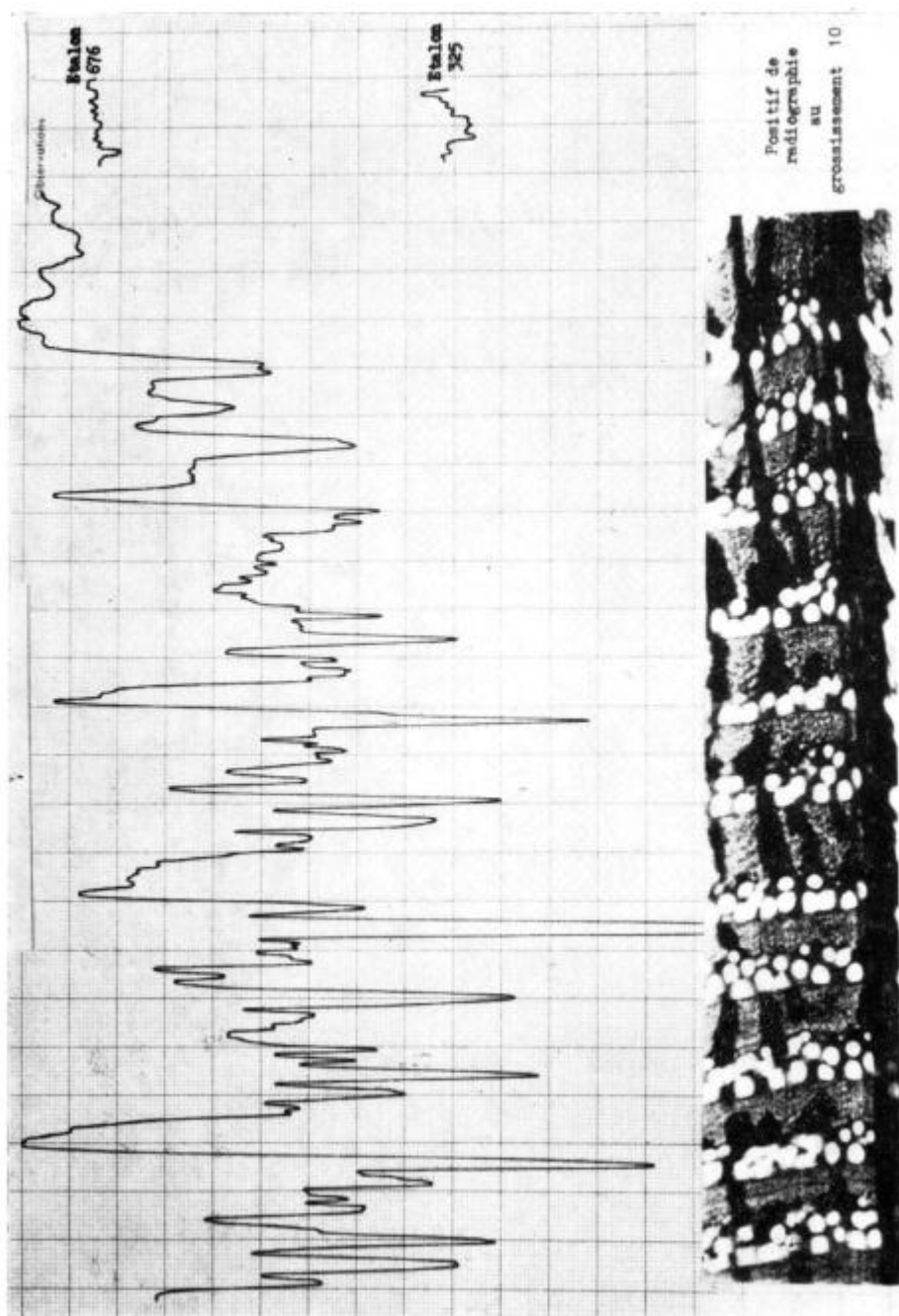


Fig. 33 B. — Chêne n° 1-14.

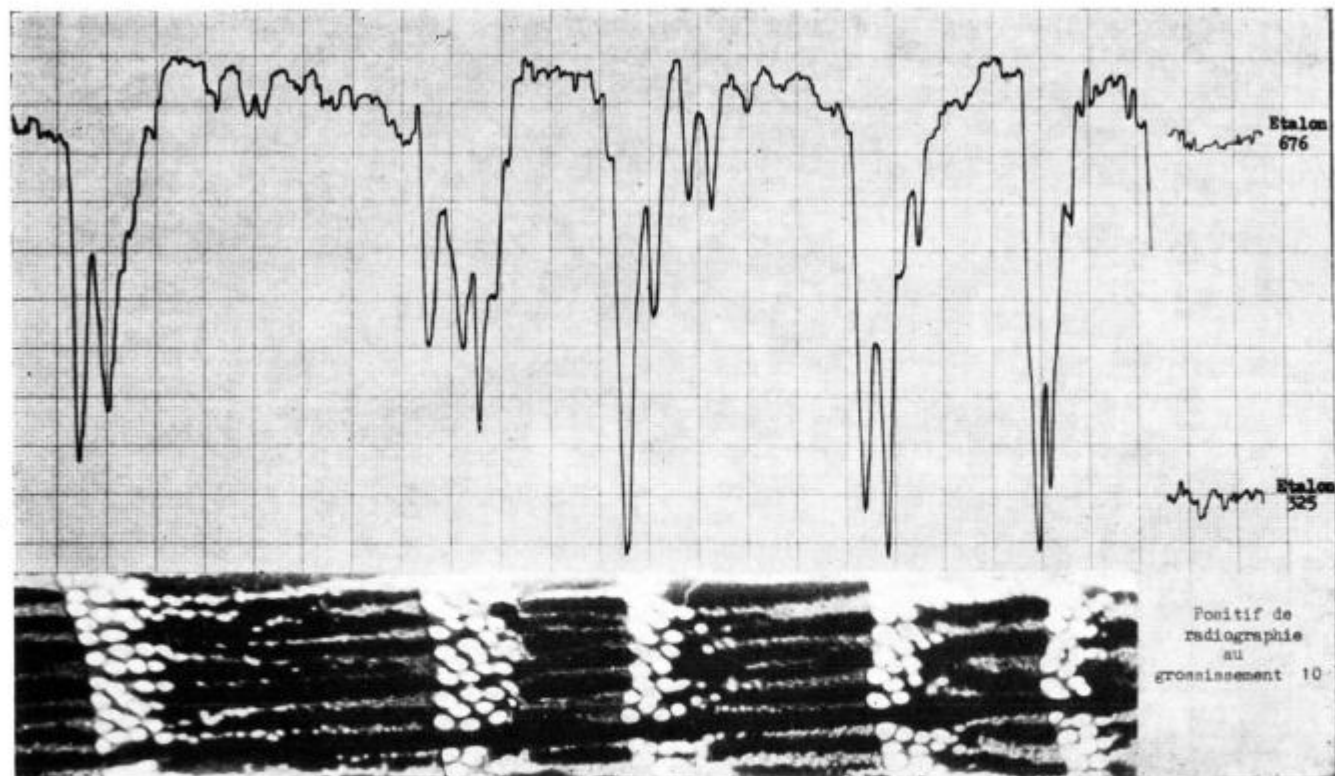


FIG. 33 C. — Chêne n° 1-27.

Enregistrement n° 686 - Bras 10 - Objectif 4 - Fente 50 - Sensibilité 3 - Densité 2

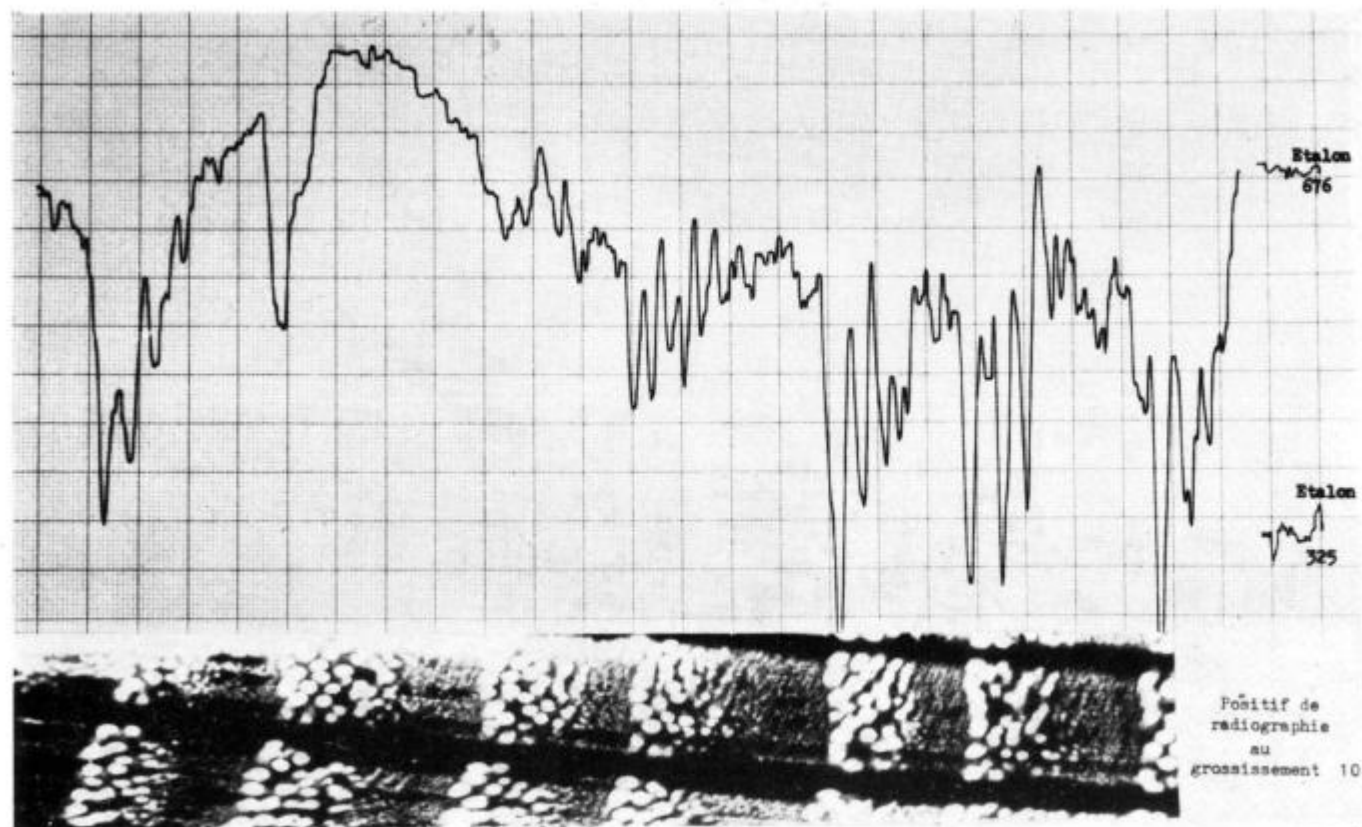


FIG. 33 D. — Chêne n° 1-28.

Enregistrement n° 686 - Bras 10 - Objectif 4 - Fente 50 - Sensibilité 3 - Densité 2

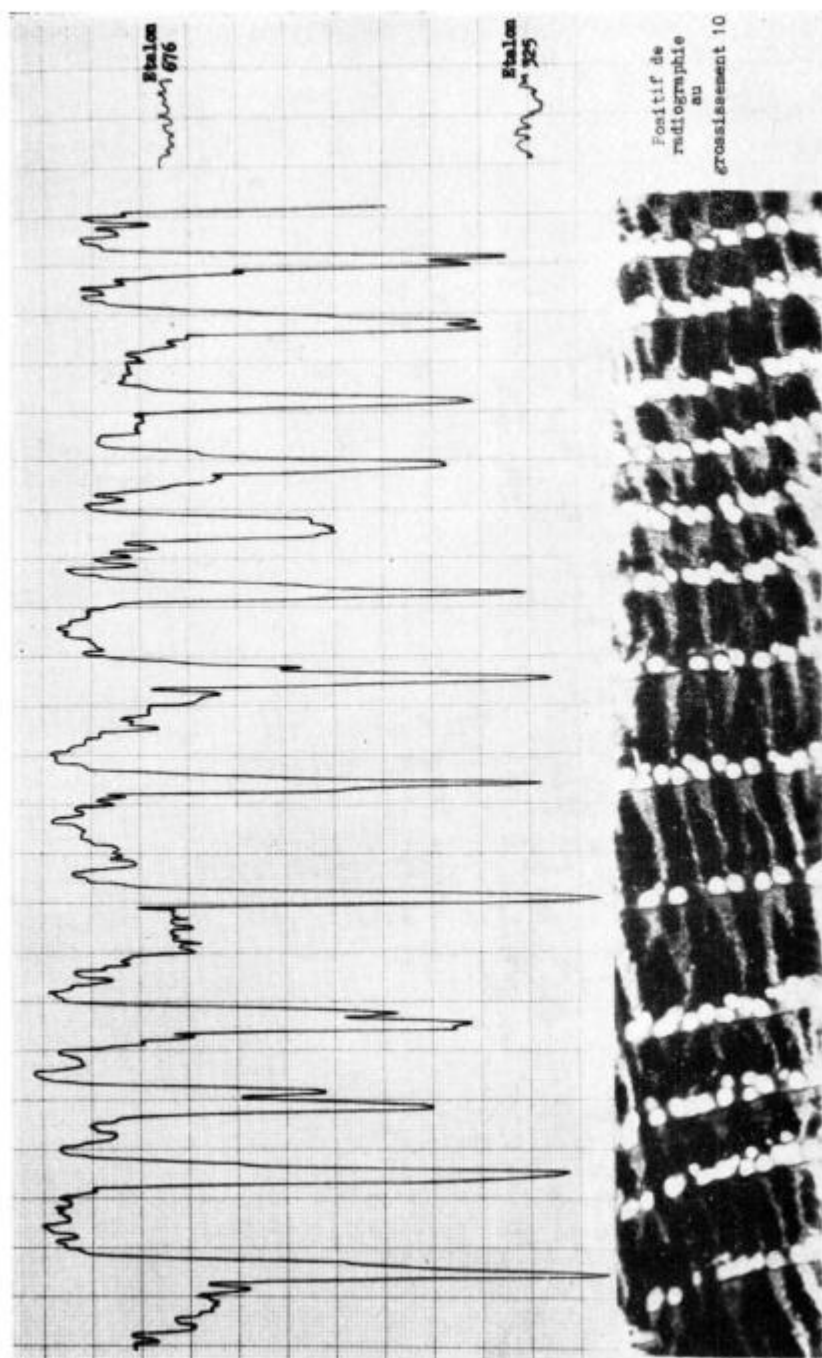


FIG. 33 E. — Chêne n° 2-4.



L'échantillon 1-28 représente à nos yeux le cas typique du Chêne de Bourgogne qui, malgré une largeur de cernes importante (3 à 4 mm), reste tendre (couple de torsion 250 cm.kg) et assez léger (infra-densité 429); un tel Chêne se caractérise par une zone poreuse très étendue et un passage progressif du bois de printemps au bois d'été; les gros vaisseaux initiaux laissent la place à d'autres dont le diamètre diminue de façon très graduelle; de surcroît, les fibres sont presque totalement absentes certaines années (3 derniers cernes vers la droite); ainsi s'explique que le profil correspondant y soit tout entier au-dessous de celui de l'étalon le plus lourd; encore convient-il d'observer que toute la partie gauche, à forte densité, se trouve faussée par le passage du spot du microdensitomètre sur un gros rayon ligneux, légèrement incliné sur l'axe de prélèvement de la carotte.

Sans doute les renseignements d'ordre anatomique qui peuvent être ainsi relevés directement sur une radiographie d'échantillons de 5 mm de diamètre sont-ils liés aux caractéristiques de la station: la fertilité et la forte teneur en eau du sol sur alluvions inondables justifient, semble-t-il, très bien l'importance des éléments conducteurs et des tissus de réserve qui font que, par exception, de larges accroissements annuels ne nuisent pas à une qualité satisfaisante du bois.

Le n° 2-4, donné à titre de comparaison, concerne un bois dur et dense (couple de torsion 350, infra-densité 545); en raison de la médiocre qualité du sol, la zone poreuse est extraordinairement réduite; souvent elle ne comporte qu'une seule rangée de vaisseaux, parfois même discontinue; c'est le cas, notamment, de celle du dixième cerne à partir de la gauche, qui est traversée par une bande radiale de fibres; ceci n'a pas échappé au spot d'exploration du microdensitomètre, d'où, sur le profil correspondant, un pic vers les faibles densités beaucoup moins prononcé que pour les autres accroissements. On peut observer que ce bois, qui est le plus dense, est aussi celui pour lequel la zone de la courbe de variations de la densité, située au-dessus du repère 676, est la plus importante en valeur relative. Notons enfin que les bandes tangentiellles de parenchyme, qui donnent une allure zébrée aux plages de fibres, apparaissent assez bien sur les graphiques, tout au moins lorsque ces plages sont parallèles à l'axe d'exploration.

On voit, par ces quelques exemples, que l'examen radiographique permet de nombreuses observations utiles à l'appréciation de la qualité du bois de Chêne; mais l'analyse densitométrique, quoique fournissant des indications supplémentaires précieuses, ne peut ici être poussée jusqu'au calcul de la densité moyenne par exemple, en raison de l'hétérogénéité de la structure du bois: selon que la fente exploratrice passe, ou ne passe pas, sur un vaisseau de fort dia-

mètre, suivant que les zones fibreuses ont, ou non, une largeur constante, qu'elles sont, ou non, parallèles à l'axe de prélèvement, les courbes de variations de densité ont des pics plus ou moins prononcés vers les fortes ou vers les faibles densités, ce qui interdit toute analyse quantitative rigoureuse.

## CHAPITRE II

### ETUDES DE CERTAINES ANOMALIES DE STRUCTURE DU BOIS

---

#### 1 — Le bois de compression.

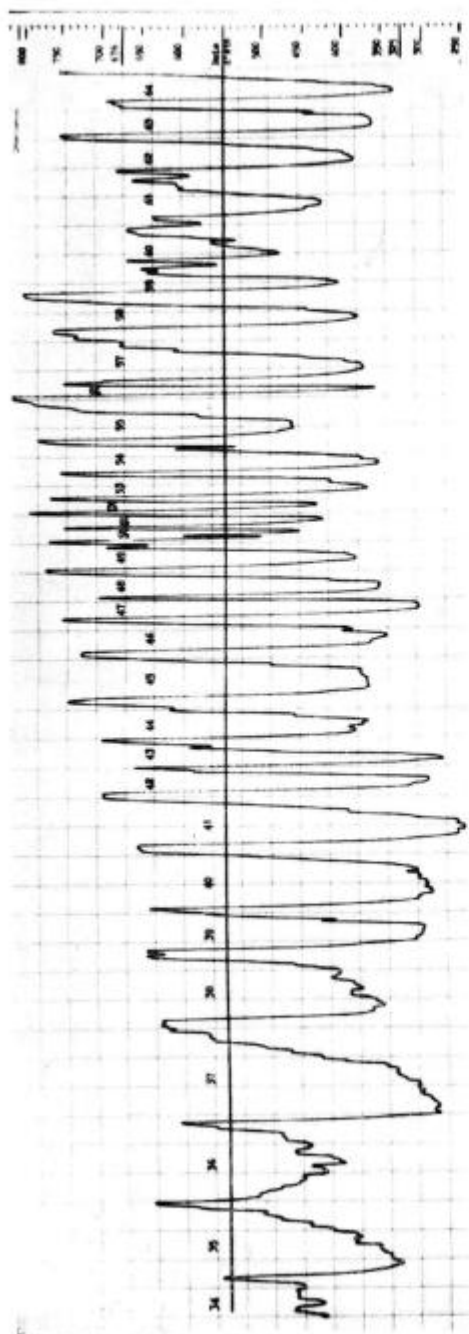
Chez les résineux à tige penchée, le bois de compression se forme au-dessous de la moelle, c'est-à-dire du côté comprimé. Les cernes y sont plus larges que du côté tendu; le bois est plus coloré; les trachéides sont plus courtes et ont des parois plus épaisses, laissant moins de place à des lumens réduits, de forme arrondie; les espaces intercellulaires sont anormalement larges. Du point de vue technologique, ce bois est dense, mais sa rétractibilité est élevée et irrégulière.

Les Pins maritimes de la forêt landaise en fournissent un exemple portant sur des millions d'individus, puisque presque tous ont, sur leur face Est, un bois présentant la plupart des caractéristiques du bois de compression, en raison sans doute des vents violents d'origine océanique qui soufflent dans cette direction; il est remarquable que le phénomène affecte aussi bien les arbres de dune, situés à proximité immédiate de la côte, que ceux de la lande, même fort loin à l'intérieur des terres.

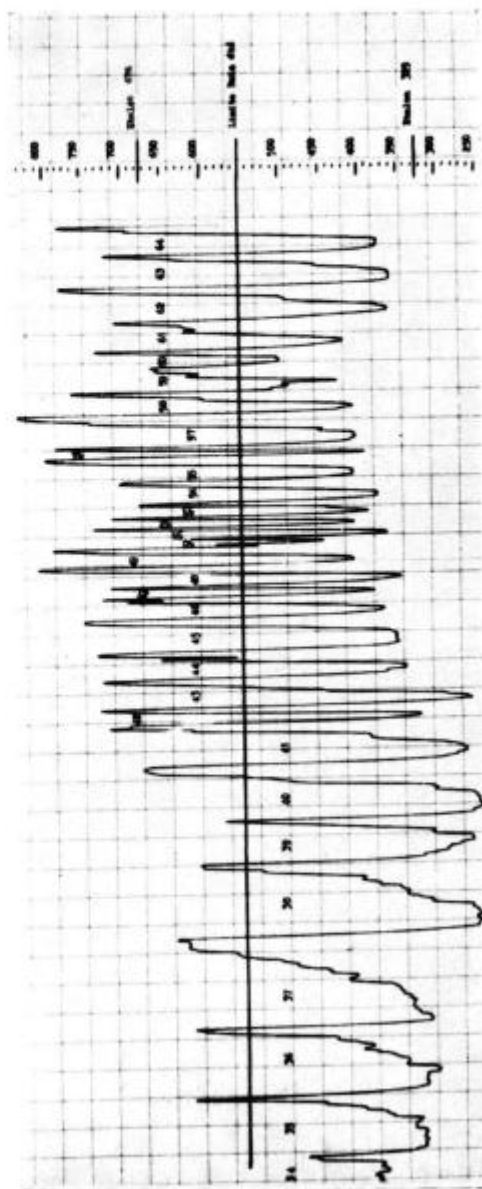
Donnons quelques chiffres: pour 231 arbres de 38 ans cultivés dans l'arboretum des Arouilles à 2 km du rivage, les largeurs moyennes des accroissements annuels sont de 3,2 mm à l'Est et de 2,6 mm à l'Ouest, et les densités correspondantes de 449 et de 430, tous les prélèvements étant effectués à hauteur d'homme.

Pour des tiges d'une cinquantaine d'années de la forêt de l'Hermitage (50 km de l'océan, 20 km du point le plus proche du bassin d'Arcachon), les accroissements annuels moyens sur le rayon sont de 5,5 mm à l'Est et 4,2 mm à l'Ouest, et les densités correspondantes de 467 et 448, toujours à 1,30 m de hauteur; des différences analogues s'observent d'ailleurs à tous les niveaux jusqu'à 13 m

Echantillon n° 8/25 Côté Est



Echantillon n° 8/25 Côté Ouest



Enregistrement  
n° 739  
Bras 4  
Objectif 4  
Fente 130  
Sensibilité 3,5  
Densité 1

FIG. 34.  
Pin maritime.

au-dessus du sol, par exemple, les cernes sont de 10 % plus larges à l'Est (6,6 contre 6,0 mm) et les densités de 6 % supérieures (402 contre 378).

Nous avons pensé que l'étude des variations de la densité pourrait fournir un moyen efficace d'analyse du phénomène, et, dans cet

TABLEAU n° 5

Analyse de variance pour étude du bois de compression  
chez le Pin maritime

Source de variations		entre années.	entre positions	Erreur	Total
Degré de liberté .....		30	1	30	61
Densité maximale	{ Somme des carrés ...	263 775	1452	35 998	301 225
	{ Carré moyen .....	8 792	1452	1 200	
	{ F .....	7,32**	1,21NS		
Densité minimale	{ Somme des carrés ...	186 835	363	26 262	213 460
	{ Carré moyen .....	6 228	363	875	
	{ F .....	7,11**	0,41NS		
Largeurs cernes	{ Somme des carrés ...	2 925,85	150,19	88,69	3 164,73
	{ Carré moyen .....	97,53	150,19	2,96	
	{ F .....	34,94**	50,74**		
Largeur bois d'été	{ Somme des carrés ...	200,97	39,52	39,86	280,35
	{ Carré moyen .....	6,70	39,52	1,33	
	{ F .....	5,04**	29,71**		
Pourcentage de bois d'été	{ Somme des carrés ...	13 401,33	148,93	1424,93	14 975,19
	{ Carré moyen .....	446,71	149,93	47,50	
	{ F .....	9,40**	3,13NS		

esprit, nous avons sélectionné une carotte de sondage particulièrement typique qui avait traversé l'arbre de part en part en passant rigoureusement par la moelle. La figure n° 34 représente les profils densitométriques des échantillons Est et Ouest ainsi obtenus, sur lesquels ont été déterminées, pour les 31 années disponibles, les densités maximales et minimales, les largeurs de cernes et de bois

d'été, ainsi que la texture. Les valeurs moyennes trouvées sont les suivantes :

	Côté Est	Côté Ouest
Densités maximales annuelles .....	715,5	705,8
Densités minimales annuelles .....	366,6	361,8
Largeur des cernes .....	3,46	2,68
Largeur du bois d'été .....	1,10	0,70
% de bois d'été .....	35,57	32,48

Une analyse de variance a été faite sur ces 5 critères avec deux origines de variation : la position (Est ou Ouest) et l'année. Les résultats de cette analyse font l'objet du tableau n° 5 ci-contre.

Comme l'on pouvait s'y attendre, on constate des différences très significatives (au seuil de 1 %) entre années pour les cinq caractéristiques sus-mentionnées ; par contre, la position n'agit significativement que sur la largeur des accroissements annuels et la largeur du bois d'été.

En résumé, comme le montre clairement le graphique, le bois de compression n'est, dans ce cas particulier, caractérisé ni par ses densités maximales annuelles ni par ses densités minimales annuelles, qui sont cependant légèrement plus élevées que du côté tendu, mais il se singularise surtout par la largeur des cernes et par celle du bois final qui, toutes deux, sont beaucoup plus importantes à l'Est qu'à l'Ouest. La texture est également plus élevée dans la zone comprimée, mais le rapport F, bien qu'assez proche du seuil de signification (4,17 pour 30 et 1 degrés de liberté), ne l'atteint pas, à cause sans doute d'un échantillonnage un peu insuffisant.

## 2 — Le bois juvénile.

Une étude spéciale (POLGE, 1964 a) a été consacrée à ce problème qui peut devenir grave si la tendance actuelle à une augmentation des distances entre plants dans les reboisements se maintient, sans que se généralise l'élagage artificiel de branches vivantes, seul susceptible de rétablir un équilibre salubre entre l'activité de l'assise génératrice et l'approvisionnement en hormones responsables de l'organisation cellulaire.

A défaut, le bois élaboré présente, tout au moins tant que l'élagage naturel n'a pas atteint la hauteur considérée, de sérieux inconvénients technologiques (faible densité, retrait longitudinal important).

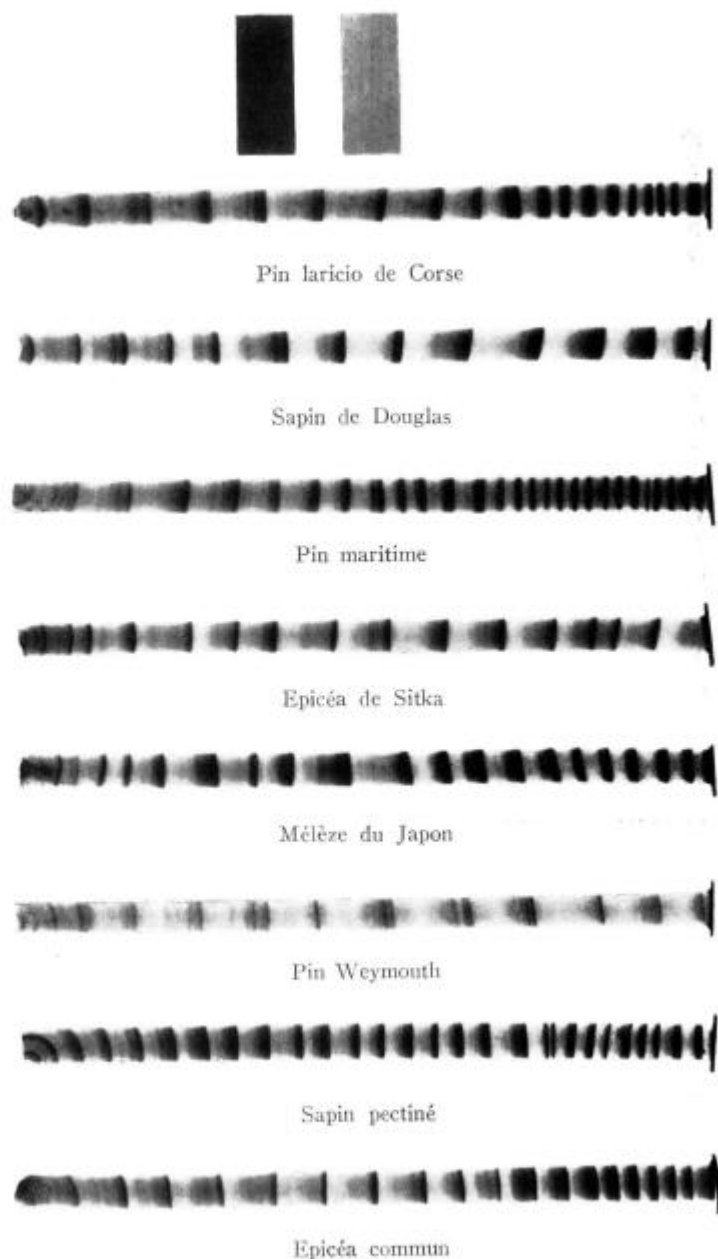


FIG. 35 a.

Positifs de radiographie de bois juvénile d'essences diverses.

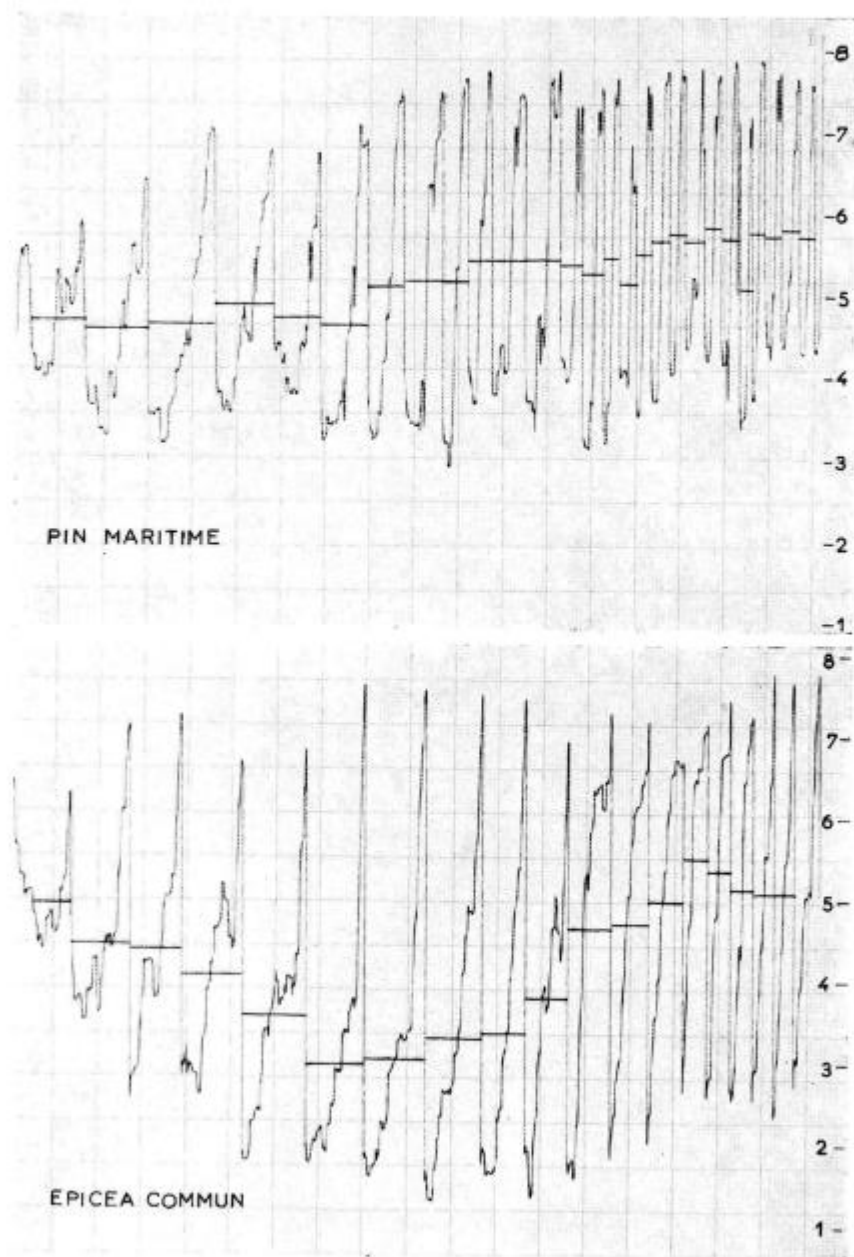


FIG. 35 b.  
Profils densitométriques de bois juvénile (Pin maritime, Epicéa commun).



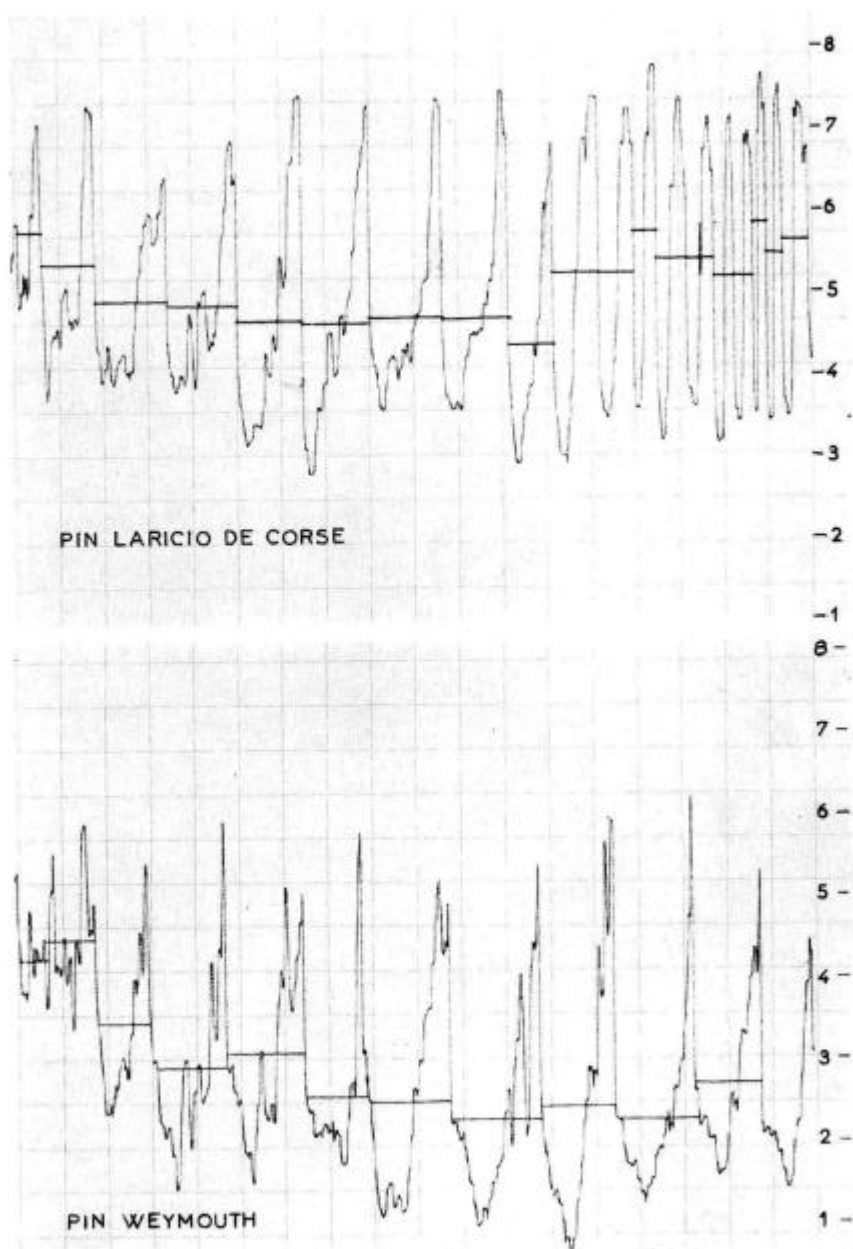


FIG. 35 c.

Profils densitométriques de bois juvénile (Pin Laricio de Corse, Pin Weymouth).

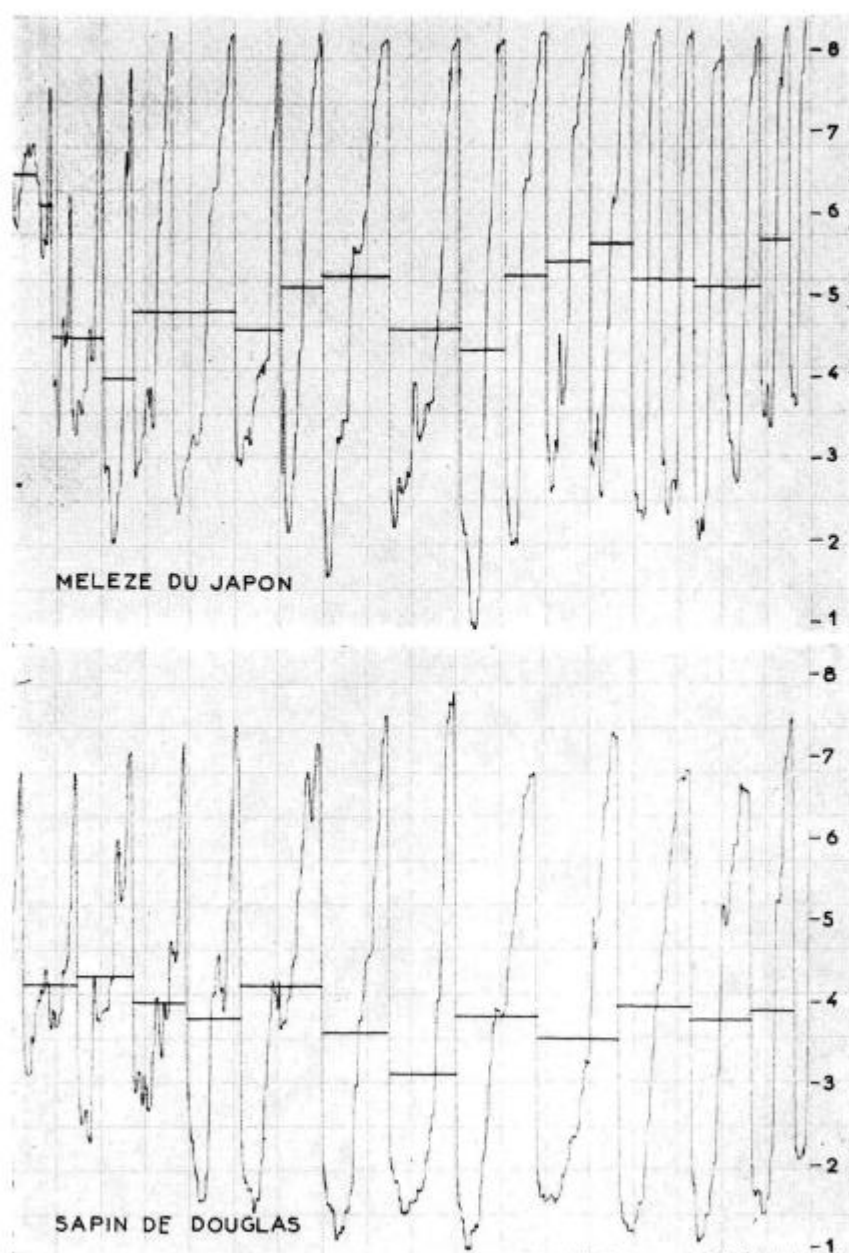


FIG. 35 d.

Profils densitométriques de bois juvénile (Mélèze du Japon, Sapin de Douglas).

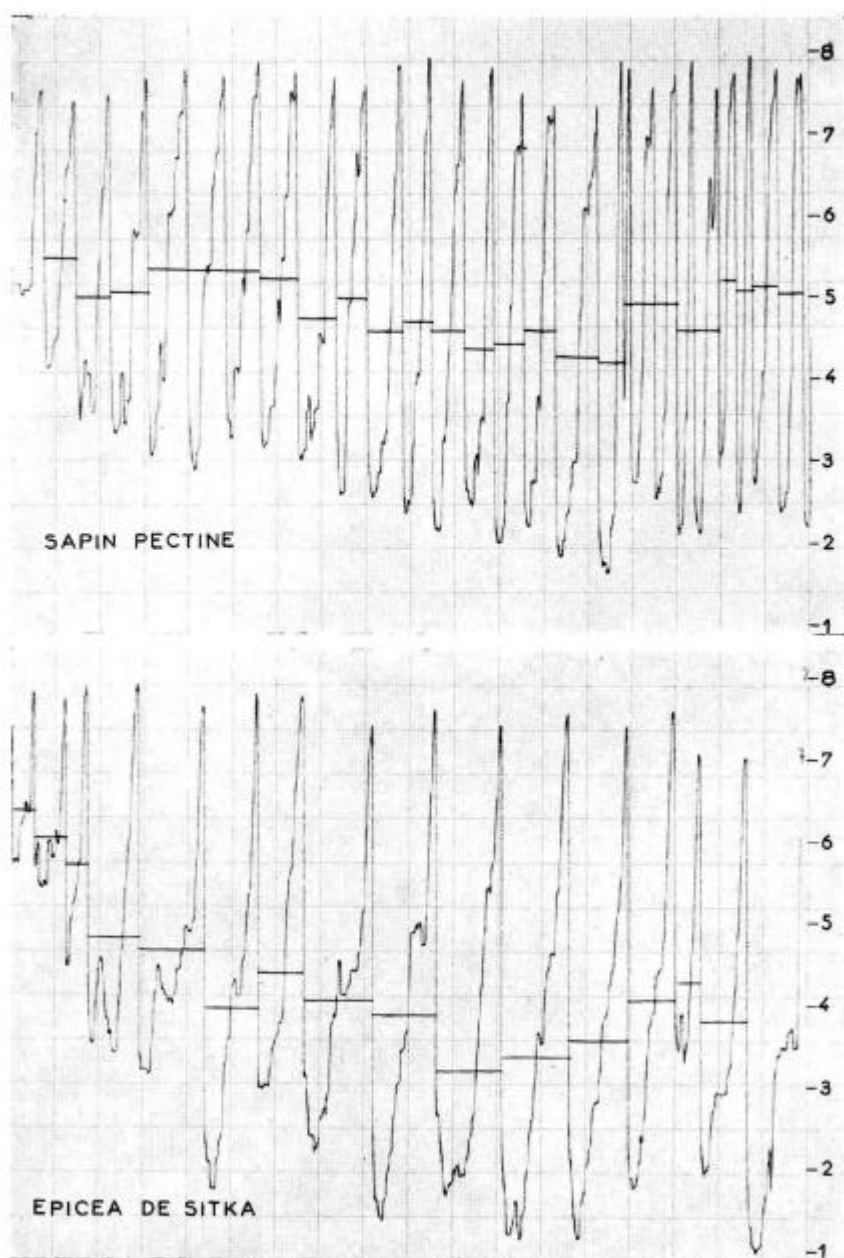


FIG. 35 e.

Profils densitométriques de bois juvénile (Sapin pectiné, Epicéa de Sitka).

Nous ne revenons sur cette question que pour présenter un positif de radiographie de bois juvénile concernant 8 espèces résineuses différentes (fig. n° 35 a) et les profils densitométriques correspondants.

On peut tout d'abord constater que le seul examen des images obtenues aux rayons X permet de distinguer certaines essences, comme le Pin Weymouth (*Pinus strobus* L.), aisément reconnaissable à sa faible densité, aussi bien dans le bois de printemps que dans le bois d'été, et au peu de contraste que l'on observe entre eux, comme le Mélèze du Japon (*Larix leptolepis* Murr.), qui présente les caractéristiques contraires à tous points de vue, ou comme les Epicéas de Sitka et commun, qui ont, tous deux, une faible texture, le premier se différenciant en outre du second par un bois de printemps moins dense.

Mais si l'on se reporte aux profils densitométriques (fig. n°s 35 b à e), sur lesquels les densités moyennes de chaque cerne ont été représentées par des traits horizontaux, on peut obtenir des informations supplémentaires intéressantes, notamment au sujet du bois juvénile : alors que ce dernier était surtout connu pour sa faible densité, on peut constater que celle des deux ou trois premiers cerne est, sur la plupart des graphiques, relativement élevée, puisqu'en particulier elle n'est plus atteinte à nouveau avant 12 ou 14 ans chez le Pin Weymouth ou l'Epicéa de Sitka ; ainsi se trouvent confirmées les observations faites à l'occasion du travail précité sur le Douglas.

Si l'on cherche à établir une règle générale susceptible de s'appliquer à toutes les essences étudiées, on peut dire que, durant la période juvénile, la caractéristique qui fait preuve de la plus grande variabilité d'une année à l'autre est la densité minimale du bois de printemps, en sorte que l'on peut souvent noter un parallélisme assez net entre ses variations et celles de la densité moyenne annuelle, surtout chez les essences où toutes deux subissent une décroissance initiale marquée.

Il en est tout autrement de la densité maximale du bois final qui, soit fluctue d'une façon apparemment assez aléatoire [Pin laricio (*Pinus laricio* Poiret Var. *corsicana* Loud.) - Pin Weymouth], soit augmente pendant quelques années avant de se stabiliser (Epicéa commun, Douglas, Mélèze du Japon, Pin maritime).

Le contraste de densité entre bois de printemps et bois d'été va le plus souvent en s'accroissant, ce qui n'empêche pas d'aboutir à une certaine stabilisation de la densité moyenne lorsque densité maximale et densité minimale évoluent en sens contraire, et que l'augmentation de l'une vient compenser la diminution de l'autre.

Le cas du Sapin pectiné mérite une mention spéciale : il ne figure à côté des échantillons des 7 autres essences (qui tous proviennent de plantations à croissance rapide et comportent par suite une zone plus ou moins étendue de bois juvénile) qu'à titre de comparaison,

pour montrer ce qu'on peut obtenir avec les méthodes de sylviculture traditionnelles; l'arbre en cause, qui se trouve en forêt domaniale d'Abreschviller, a eu une jeunesse privilégiée, en ce sens que, s'il n'a pas souffert d'un couvert dense et prolongé comme beaucoup de ses congénères, il ne s'est apparemment pas trouvé non plus isolé en pleine lumière; sa croissance initiale s'est, de ce fait, déroulée avec une régularité remarquable, se traduisant par des cernes ni trop larges ni trop étroits (l'échelle des abscisses est, sur le graphique original, de 2/1); la densité de son bois est, elle aussi, assez constante et le bois juvénile, au sens péjoratif du terme, est totalement absent.

Il convient enfin d'observer, sur les figures n°s 35 b à e, à quel point les profils diffèrent les uns des autres, non seulement au point de vue de la forme des courbes, mais aussi, et surtout, aux points de vue de leur situation d'ensemble par rapport à l'échelle des densités et de l'amplitude des variations qu'elles traduisent [bien entendu tous les profils ont été réalisés avec des conditions d'exploration identiques et, en particulier, avec un même coin de densité: celui de 2 (pente 0,087 D/cm)].

---

## CHAPITRE III

### LOCALISATION DANS LE BOIS D'ELEMENTS NE FAISANT PAS PARTIE INTEGRANTE DE LA MATIERE LIGNEUSE

---

#### 1 — L'eau.

Nous avons déjà rendu compte (POLGE, 1964 b) de l'utilisation possible de l'analyse densitométrique pour une délimitation de l'aubier et du bois de cœur basée sur leurs différences de teneur en eau.

Rappelons qu'il suffit d'isoler, à l'intérieur d'une gaine en polyéthylène parfaitement ajustée, un échantillon fraîchement prélevé dans un arbre vivant pour qu'il conserve à peu près intégralement l'eau qu'il contenait in situ. Grâce aux différences de noircissement dues à l'absorption supplémentaire que celle-ci occasionne, deux radiographies successives faites, la première aussitôt après sortie de l'enveloppe plastique, la deuxième après dessiccation totale, permettent de voir, par comparaison, où commence l'aubier, dont le taux d'humidité est généralement bien plus élevé que celui du bois de cœur; les courbes densitométriques correspondantes rendent bien entendu compte, avec une grande précision, du phénomène; c'est ainsi qu'ont pu être mis en évidence des cas d'inversion où la teneur en eau est plus élevée dans la partie duraminisée que dans celle qui ne l'est pas (comme chez *Carya alba* Nutt. et *Carya amara* Nutt.), des cas d'aubier dispersé et discontinu, et même des cas de décalage entre la limite de coloration du bois de cœur et celle du changement de teneur en eau.

Nous ne reviendrons pas sur ces problèmes relativement simples, mais sur les observations extrêmement troublantes qui ont pu être faites, de façon fortuite, à cette occasion, au sujet de la localisation de l'eau à l'intérieur même des cernes de l'aubier.

L'exemple donné dans le travail précité concernait l'Epicéa de Sitka; on pouvait voir que, pour cette essence, l'eau libre était très inégalement répartie à l'intérieur des accroissements annuels dans

EPICEA DE SITKA (grossissement 4 X)  
 Enregistrement n° 101 - Bras 4 - Objectif 4 - Fente 80 - Sensibilité 4,5 - Densité 3

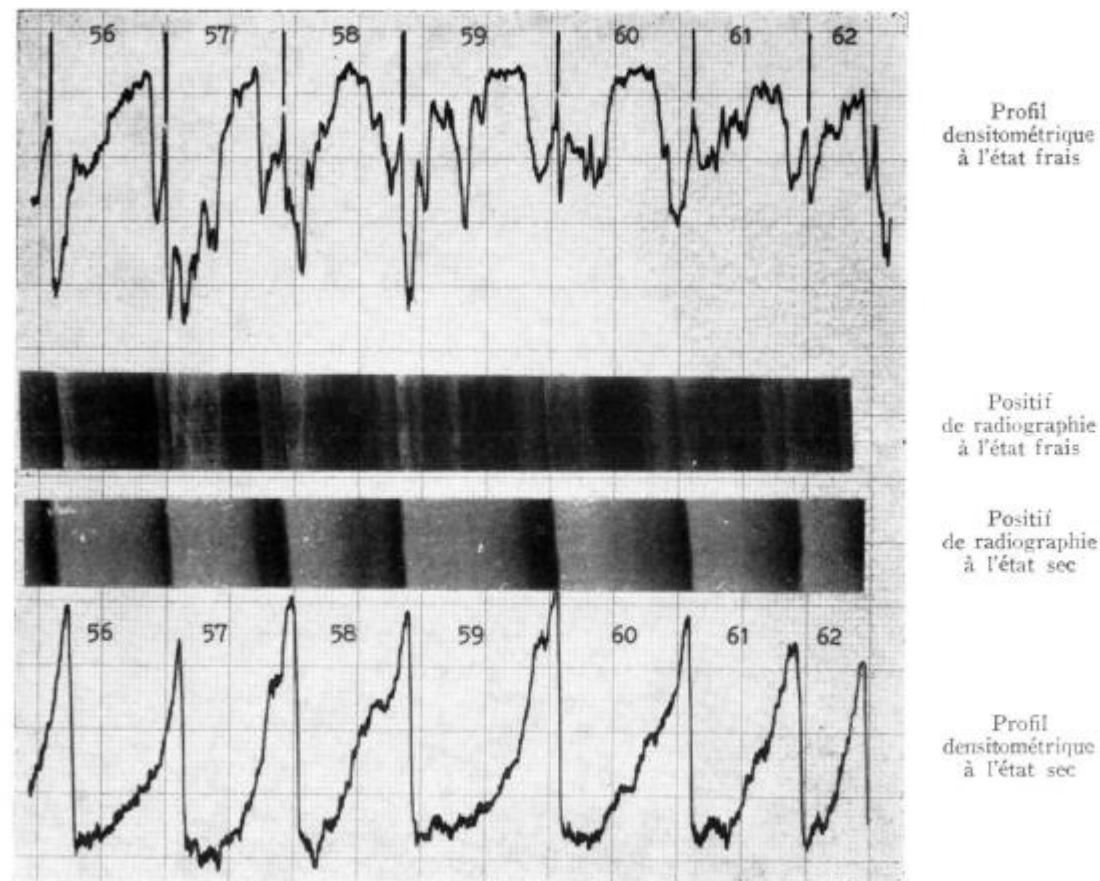


FIG. 36 a. — Localisation de l'eau dans les accroissements annuels.

la partie vivante de l'arbre : en règle générale, elle semblait à peu près absente dans le bois d'été, ce que peut expliquer le faible diamètre des cavités cellulaires et la forte épaisseur des membranes qui font que, dans l'absorption du rayonnement X, le rôle de l'eau susceptible de se trouver dans les lumens est négligeable par rapport à celui de la matière ligneuse, et ce d'autant que le bois final est produit généralement après l'arrêt de la pousse en hauteur, c'est-à-dire à un moment où la circulation de la sève est fortement ralentie.

Mais le début du bois initial dans l'aubier était également, certaines années tout au moins, à peu près aussi sec que dans la partie duraminisée, quoique cette zone à faible humidité corresponde, au point de vue anatomique, à la partie de l'accroissement annuel où la proportion entre la surface des cavités cellulaires et celle des membranes est la plus élevée et où, par suite, l'eau libre devrait, si elle était présente en quantité notable, apparaître le plus clairement sur les clichés radiographiques d'échantillons frais.

Depuis lors, des études analogues ont été entreprises sur d'autres essences résineuses ; elles confirment les premières observations faites sur *Epicéa* de Sitka, tout en conduisant à nuancer quelque peu la description rappelée ci-dessus.

Sur les figures n<sup>os</sup> 36, 37 et 38 se trouvent réunis les courbes densitométriques et les positifs de radiographies qui nous paraissent les plus caractéristiques à ce sujet.

Ce qui demeure, semble-t-il, bien établi, c'est que l'eau n'est que très exceptionnellement répartie de façon uniforme à l'intérieur des accroissements annuels de l'aubier. Pour le reste, on peut dire que les variations de l'humidité du bois d'une extrémité à l'autre des cernes diffèrent suivant les essences, et pour une même essence, suivant les arbres et les années.

Le premier exemple de la figure n<sup>o</sup> 36a, qui concerne un autre *Epicéa* de Sitka, n'est donné qu'à titre de rappel, pour montrer que le schéma décrit plus haut ne s'applique pas seulement à l'individu ayant servi à l'illustrer. Là encore, le Sitka est caractérisé par la chute verticale de la teneur en eau qui coïncide à peu près, certaines années tout au moins, avec le passage du bois initial au bois final, mais se produit beaucoup plus brutalement que celui-ci (voir cernes 1956, 1957 et 1958 de la figure).

Si l'on considère maintenant le cas de l'*Epicéa* commun (fig. n<sup>o</sup> 36b), on voit que le schéma d'ensemble demeure valable, mais la zone sèche du bois d'été est beaucoup plus étroite, et, de plus, apparaît, avec beaucoup de netteté, un phénomène assez déconcertant : la présence de raies, quelquefois très fines, à faible teneur en eau, à l'intérieur de zones humides (début du bois final des années 1959, 1960 et 1961).



EPICEA (grossissement 4 X)

Enregistrement n° 101 - Bras 4 - Objectif 4 - Fente 80 - Sensibilité 4,5 - Densité 3

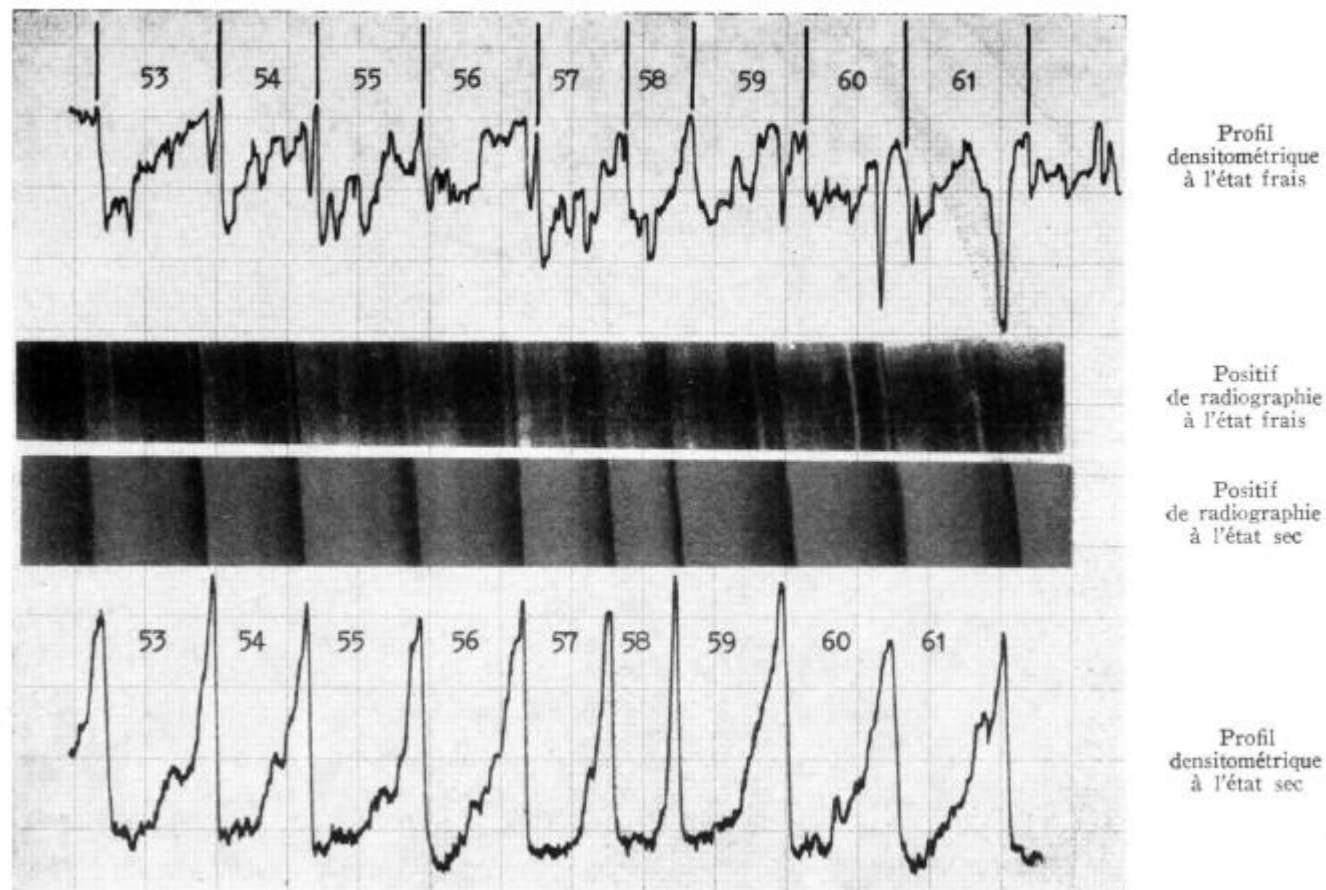


FIG. 36 b. — Localisation de l'eau dans les accroissements annuels.

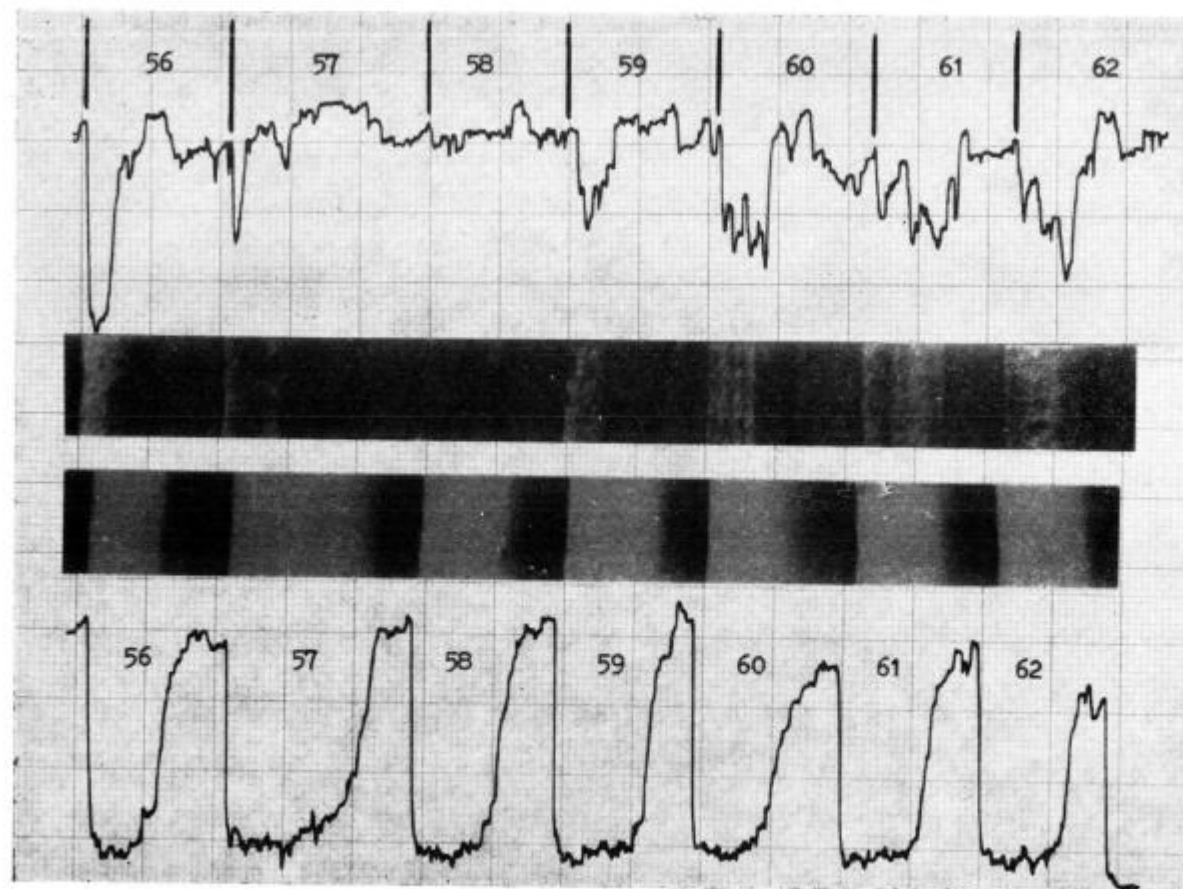
Profil  
densitométrique  
à l'état fraisPositif  
de radiographie  
à l'état fraisPositif  
de radiographie  
à l'état secProfil  
densitométrique  
à l'état sec

FIG. 37 a. — Localisation de l'eau dans les accroissements annuels

DOUGLAS 2 (grossissement 4 X)

Enregistrement n° 167 - Bras 4 - Objectif 4 - Fente 80 - Sensibilité 4,5 - Densité 3

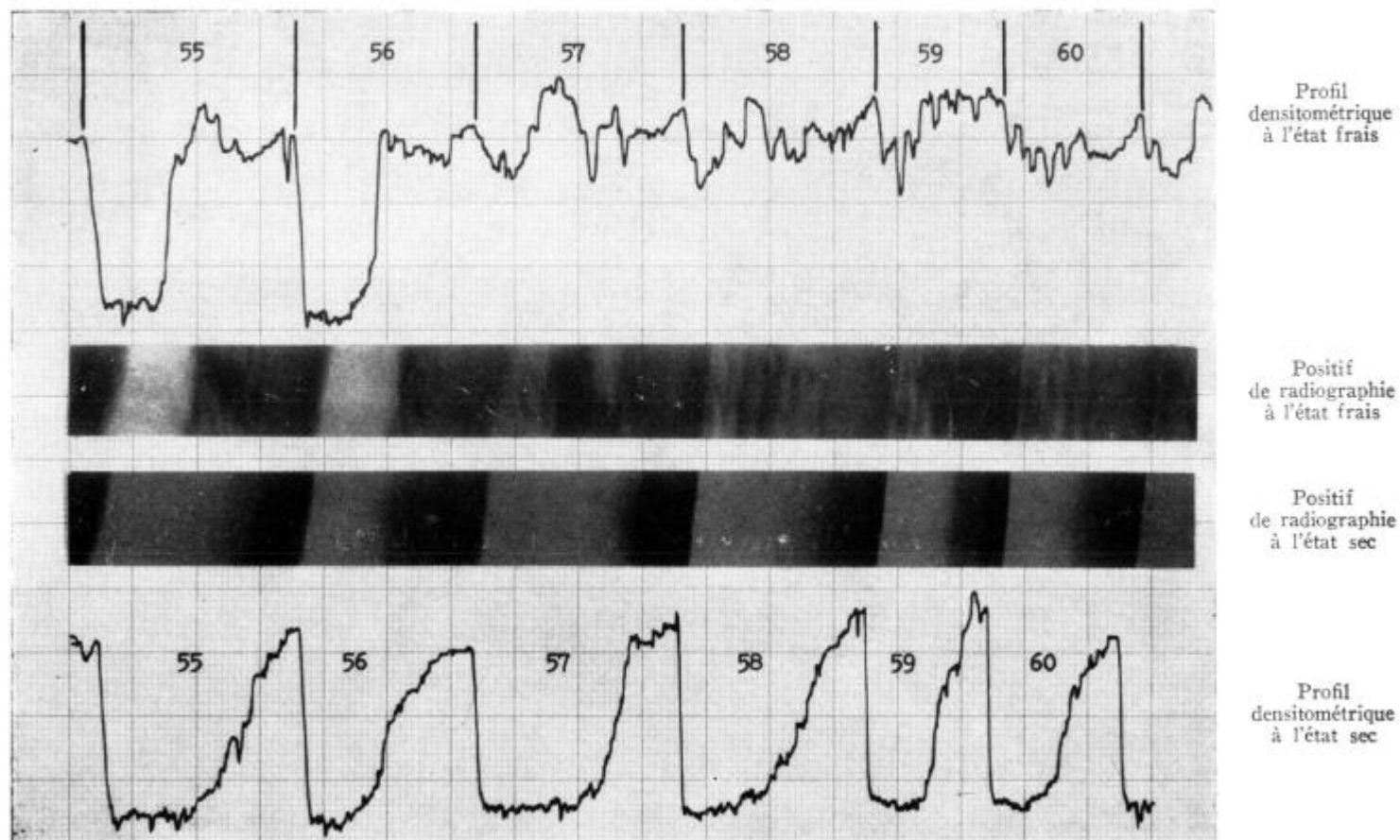


FIG. 37 b. — Localisation de l'eau dans les accroissements annuels.

ABIES GRANDIS 1 (grossissement 4 X)  
Enregistrement n° 101 - Bras 4 - Objectif 4 - Fente 80 - Sensibilité 4,5 - Densité 3

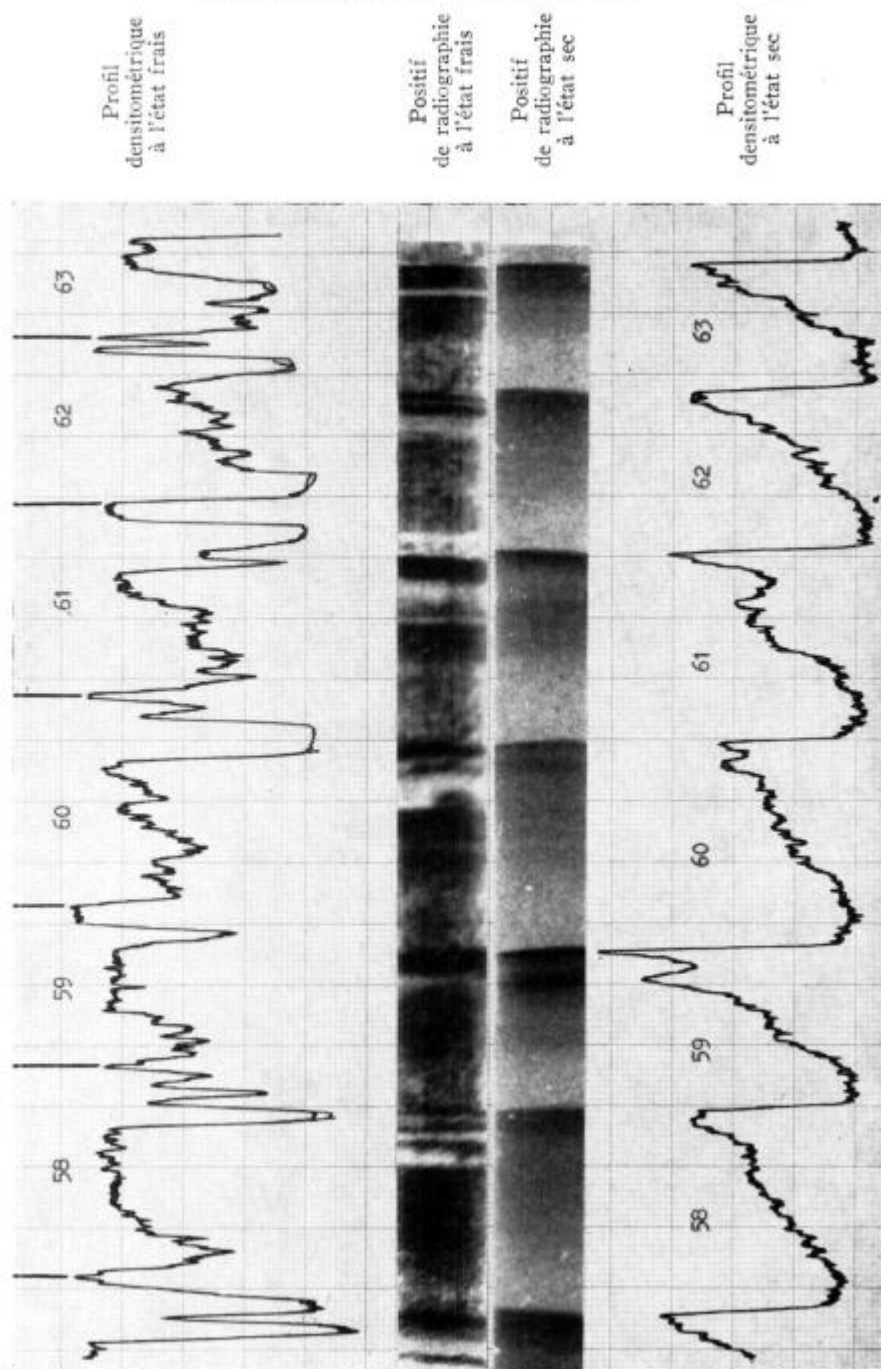


FIG. 38 a. — Localisation de l'eau dans les accroissements annuels.

ABIES GRANDIS 2 (grossissement 4 X)

a egistrement n° 167 - Bras 4 - Objectif 4 - Fente 80 - Sensibilité 4,5 - Densité 3

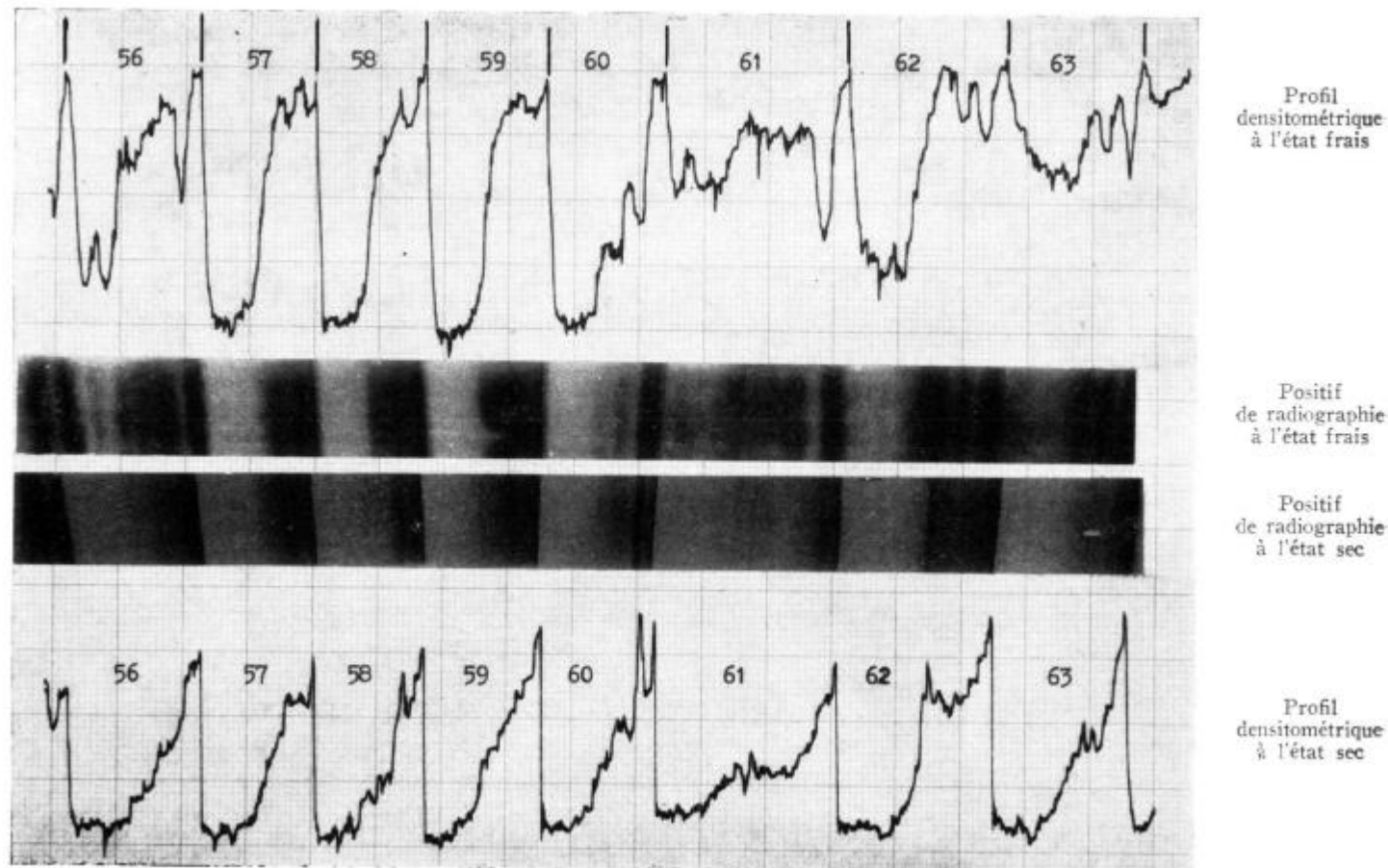


FIG. 38 b. — Localisation de l'eau dans les accroissements annuels.

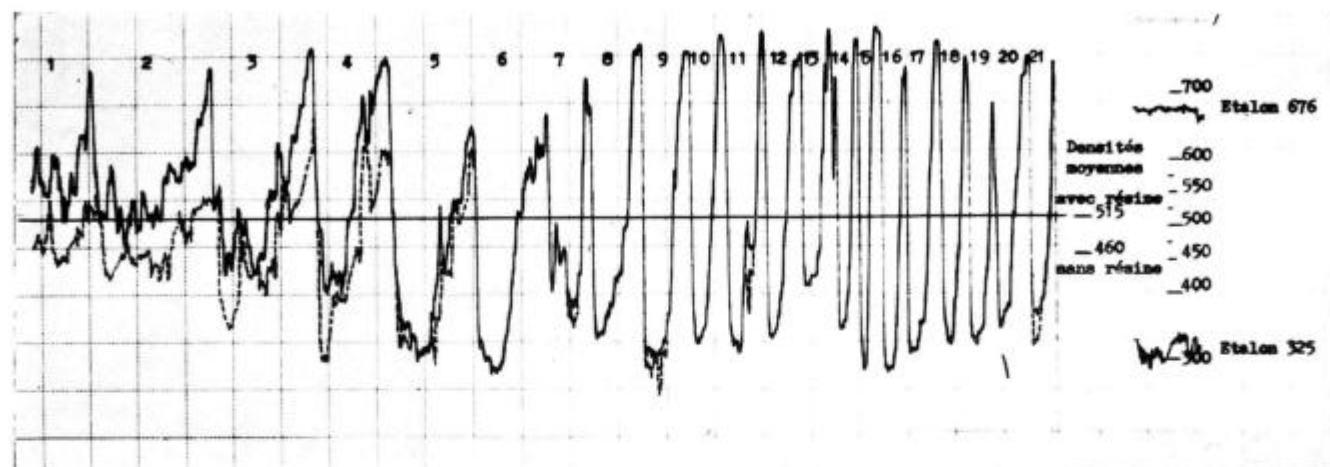
La caractéristique essentielle du Douglas (fig. n° 37) est sa teneur en eau, importante dans le bois initial, faible dans le bois final; ainsi l'un et l'autre en arrivent fréquemment à présenter des images radiographiques d'opacité voisine (années 1957 et 1958 des Douglas 1 et 2); on rencontre aussi assez souvent des portions de bois de printemps qui, soit sont absolument sèches (années 1955 et 1956 du Douglas 2), soit comportent seulement des raies d'humidité élevée (raies multiples de l'année 1960 pour l'un et l'autre des deux échantillons).

Chez *Abies grandis* (*Abies grandis* Dougl.) (fig. n° 38), la fin du bois d'été est rarement sèche, mais le phénomène des raies atteint son maximum d'ampleur, que ce soit des raies sèches à l'intérieur de zones humides (bois d'été des années 1958, 1962, 1963 de l'*Abies grandis* 1 et bois d'été des années 1956, 1960, 1961, 1962, 1963 de l'*Abies grandis* 2), ou des raies humides à l'intérieur de zones sèches (bois d'été 1960 de l'*Abies grandis* 1 et bois de printemps 1956 de l'*Abies grandis* 2).

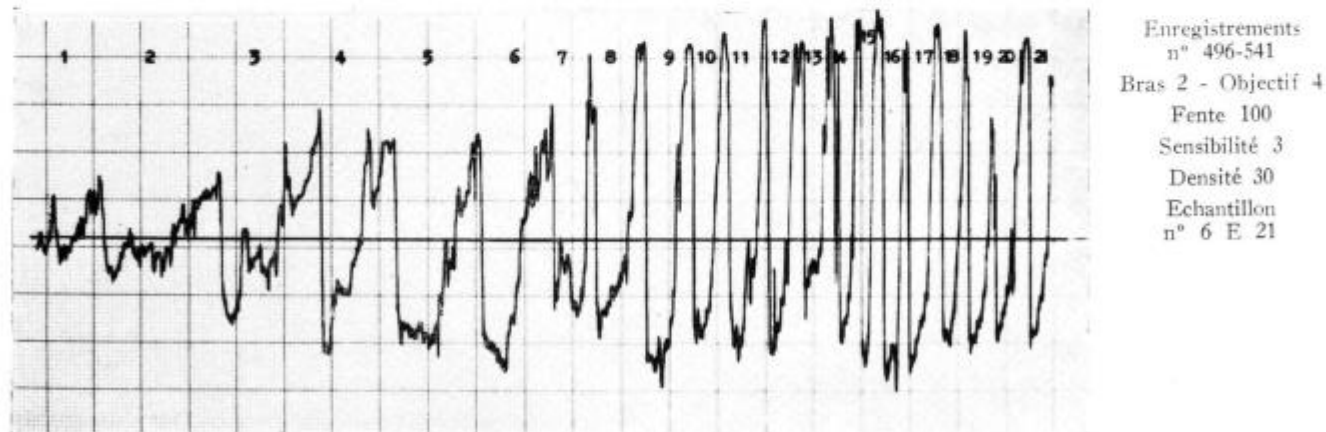
On voit que le problème n'est pas simple, et que de nombreuses recherches seront encore nécessaires avant d'entrevoir une solution; sans doute, l'arrêt de la pousse en hauteur à un moment où la croissance transversale n'est pas achevée peut-elle expliquer, en partie, l'existence de zones sèches en fin de saison de végétation, comme d'ailleurs l'antériorité de cette même croissance transversale par rapport au débourrement pourrait rendre compte, dans une certaine mesure, de la faible teneur en eau constatée au début du bois de printemps. Mais les différences que l'on observe d'un arbre à l'autre, pour une même année, tendent à montrer que cette répartition de l'eau à l'intérieur des cernes traduit, avant tout, une réponse de chaque individu aux facteurs de l'environnement: les réactions d'un arbre à une sécheresse momentanée par exemple, peuvent très bien dépendre, non seulement de son évapo-transpiration, mais aussi de ses possibilités d'alimentation en eau dans le sol, qui, elles-mêmes, sont fonction à la fois de la capacité de rétention de celui-ci et de l'ampleur de la concurrence entre tiges.

On peut constater que les variations de la teneur en holocellulose à l'intérieur des cernes, telles qu'elles ont été observées par WELLWOOD et WILSON (1965), suivent d'assez près le schéma d'ensemble décrit plus haut pour la localisation de l'eau, avec un taux qui est faible au début du bois de printemps, passe par un maximum à la fin de celui-ci, et diminue brutalement dans le bois d'été où il atteint sa valeur minimale. Si l'on tient compte de la très grande affinité de la cellulose pour l'eau, il peut y avoir là un rapprochement intéressant à faire.

Un autre problème se pose d'ailleurs: comment expliquer que ces différences de teneur en eau à l'intérieur des cernes se trouvent fixées en quelque sorte pendant des années (en fait, jusqu'à la



Avant extraction de la résine



Après extraction de la résine

Fig. 39. — Localisation de la résine



transformation en bois de cœur), alors que les communications entre trachéides sont censées être particulièrement aisées chez les résineux grâce aux ponctuations aréolées dont elles sont pourvues?

Quoi qu'il en soit, l'analyse densitométrique de clichés radiographiques, qui a permis de faire ces premières observations, devrait également fournir un moyen d'étude efficace, le jour où des recherches approfondies pourraient être entreprises dans ce domaine.

## 2 — La résine.

Aussi bien que la comparaison de deux radiographies successives d'une même carotte prises, l'une à l'état frais, l'autre à l'état sec, permettent de localiser l'eau à l'intérieur de la première, il est également possible, en utilisant un procédé analogue, de situer avec précision certaines substances extractibles, et en particulier la résine.

La figure n° 39 représente un exemple d'une telle application; on peut y voir, à la partie supérieure, le profil densitométrique d'un échantillon de Pin maritime simplement séché à l'air, et au-dessous, un autre profil du même échantillon après épuisement de la résine, poursuivi pendant 48 heures dans un soxhlet avec un mélange à 50 % d'alcool et de benzène.

En outre, sur le premier graphique ont été reportées, en trait interrompu, les parties du second qui différeraient le plus de l'enregistrement fait avant extraction (ailleurs, les changements sont beaucoup moins importants et se limitent à une simple translation de l'ordre de 1,5 mm, impossible à reproduire sous peine de rendre la figure illisible); on peut voir que la résine était répartie d'une façon à peu près uniforme au début du bois juvénile, avec cependant, dans certains cernes (cernes 3 et 4), une accumulation plus grande, d'une part, au début du bois de printemps, d'autre part, à la fin du bois d'été. Par contre, dans les quelques accroissements ultérieurs, pour lesquels des différences notables existent entre les deux profils, la partie intéressée est toujours le bois de printemps.

Mais on peut constater aussi que, sur toute l'étendue de l'échantillon, le profil après épuisement est beaucoup plus hachuré que l'autre; la raison en est que les canaux résinifères sont très peu marqués sur celui-ci, et apparaissent, au contraire, nettement sur celui-là; même lorsque l'on a affaire à un canal déjà peu rempli (comme celui situé à la fin du bois d'été du cerne 13), l'opération d'extraction a encore entraîné un départ notable de résine puisque le pic, en direction des faibles densités, est considérablement accentué sur le profil établi après épuisement.

Accessoirement, cet exemple a été utilisé pour voir si la comparaison des deux profils pouvait permettre un dosage, au moins approximatif, de l'extrait; à cette fin, les densités moyennes ont



été déterminées, à l'aide de l'intégrateur dont est muni le micro-densitomètre, et reportées sur les profils correspondants; en outre, la densité moyenne sans résine, obtenue sur le graphique inférieur, a également été rappelée sur l'autre; en se référant à la graduation de l'axe des ordonnées, on voit que la densité était d'environ  $515 \text{ g/dm}^3$  avec résine et de  $460 \text{ g/dm}^3$  sans résine, soit une différence de 12 %, alors que la teneur en extrait, calculée directement, était de 14,7 %; la concordance des résultats est assez bonne, compte tenu de la précision des mesures faites sur les profils densitométriques, et s'explique sans doute par le fait que résine et matière ligneuse ont des coefficients d'absorption massique assez voisins.

---

## CHAPITRE IV

### ETUDE DU RETRAIT ET DES PHENOMENES CONNEXES

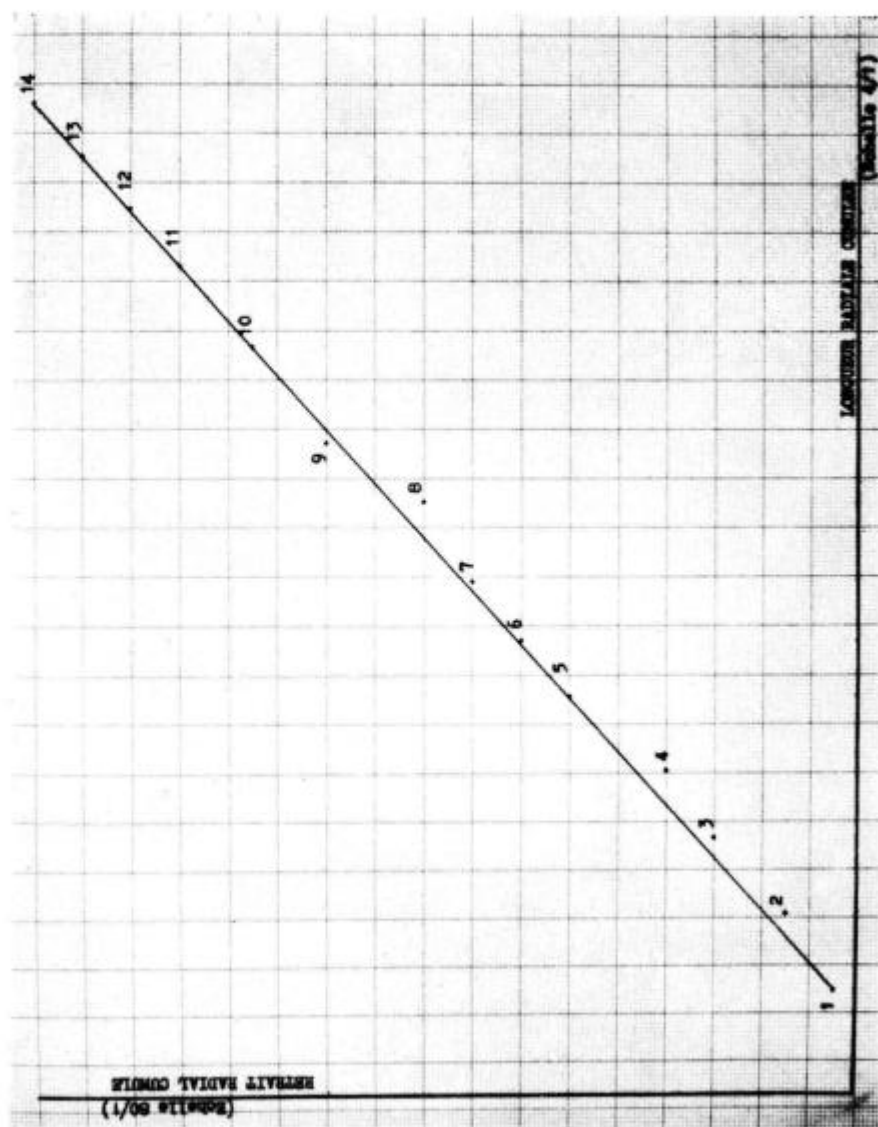
---

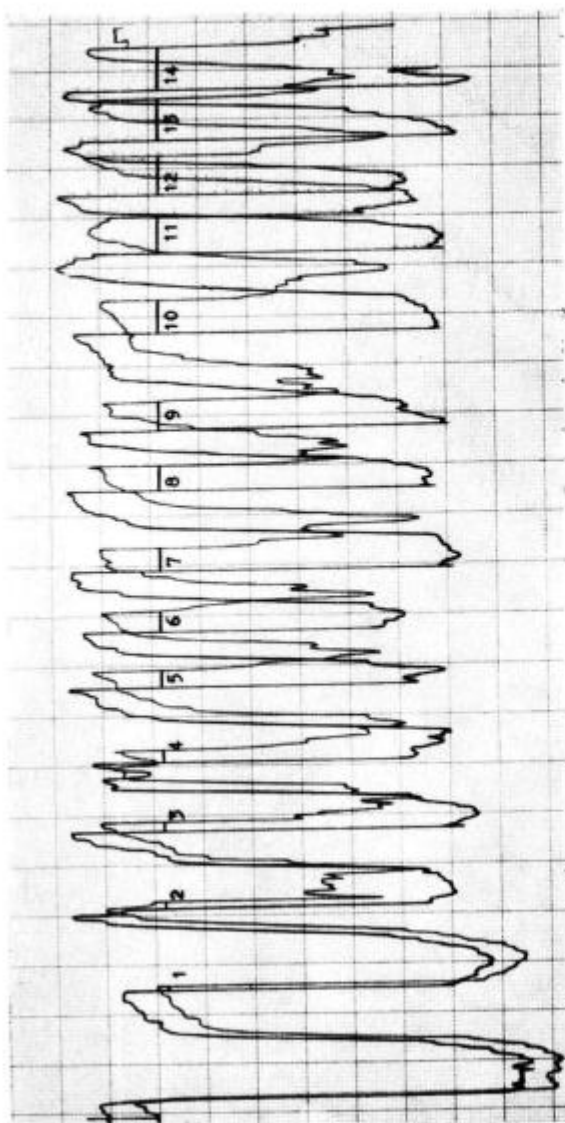
#### 1 — Le retrait.

La comparaison des profils densitométriques de deux radiographies prises, l'une à l'état saturé, l'autre à l'état sec à l'air ou à l'état anhydre, permet, sans aucune difficulté, de calculer, non seulement le retrait total de l'échantillon, mais aussi, en cas de besoin, les retraits partiels entre certains points remarquables, et notamment entre les limites des accroissements annuels.

Sur les diverses figures du chapitre précédent, paragraphe 1, les rapports d'agrandissement pour les positifs de radiographie ont été réglés de façon que les deux images photographiques aient une longueur identique dans le sens radial, égale à celle du profil à l'état sec (la radiographie à l'état frais, qui était plus longue, a donc été moins agrandie), mais un tel artifice n'est pas possible en ce qui concerne les enregistrements de la densité dont l'échelle des longueurs de cernes ne peut être modifiée que de façon discontinue; il s'ensuit que le profil à l'état frais est plus long que celui à l'état sec et la différence est égale au retrait radial.

Sur la figure n° 40, deux courbes densitométriques d'un même échantillon (Sapin de Douglas), d'abord saturé, puis stabilisé à 8 % d'humidité ont été reportées l'une sur l'autre à partir d'une même origine commune. Le retrait radial cumulé est représenté par les traits horizontaux épais qui joignent entre elles, deux à deux, les limites des accroissements annuels correspondants. Accessoirement, on a cherché à voir sur cet exemple si, comme on l'admet généralement, les retraits sont proportionnels aux longueurs auxquelles ils s'appliquent; dans ce but, a été dressé, à la partie supérieure de la figure, un graphique qui donne en abscisses les longueurs cumulées à l'état sec, à la même échelle que le profil densitométrique, et en ordonnées les retraits cumulés à une échelle 20 fois supérieure.





Enregistrement n° 743

Bras 4 - Objectif 4 - Fente 130 - Sensibilité 3 - Densité 3

Fig. 40.

Étude du retrait.

On peut voir que la linéarité est dans l'ensemble très satisfaisante; les points qui s'en écartent près de l'origine (cernes 2, 3 et 4) ne doivent guère inquiéter, car les erreurs relatives de mesure sont importantes tant que le retrait cumulé ne dépasse pas 2 mm au grossissement 4. Par contre, les écarts constatés aux cernes 8 et 9 sont réels et ont été confirmés à plus fort grossissement, mais il est difficile de leur trouver une explication sur le plan anatomique, aucune anomalie de structure ne pouvant être mise en évidence à cet endroit.

## 2 — Le collapse et le reconditionnement.

Le collapse est un phénomène qui se rattache par certains aspects au retrait tout en s'en distinguant fondamentalement: il s'agit en fait d'un effondrement des membranes cellulaires se produisant *au-dessus* du point de saturation des fibres, et qui commence lorsque leurs lumens sont encore pleins, alors que les cavités des vaisseaux sont, au contraire, vides. Au « point de remplissage » des cellules qui marque ainsi le début du collapse, la teneur en eau du bois est donc très élevée: 110 à 120 % pour l'Eucalyptus.

Le collapse se traduit, dans les sens radiaux et tangentiels, par une réduction des dimensions du bois beaucoup plus importante que celle occasionnée par le retrait normal et aussi beaucoup moins uniforme, en sorte qu'une pièce parallélépipédique collapsée en arrive à avoir une forme tout à fait irrégulière qui nécessiterait, s'il n'y était porté remède, un nouvel équarrissage avant de pouvoir être mise en œuvre.

Par ailleurs, le collapse s'accompagne souvent de la formation de fentes internes très importantes qui rendent les bois dans lesquels elles se produisent impropres à de nombreux usages. C'est donc un problème technologique très grave qui se pose surtout pour la plupart des espèces du genre Eucalyptus, mais existe également dans plusieurs autres genres pour lesquels, étant moins important, il est souvent confondu avec le retrait normal.

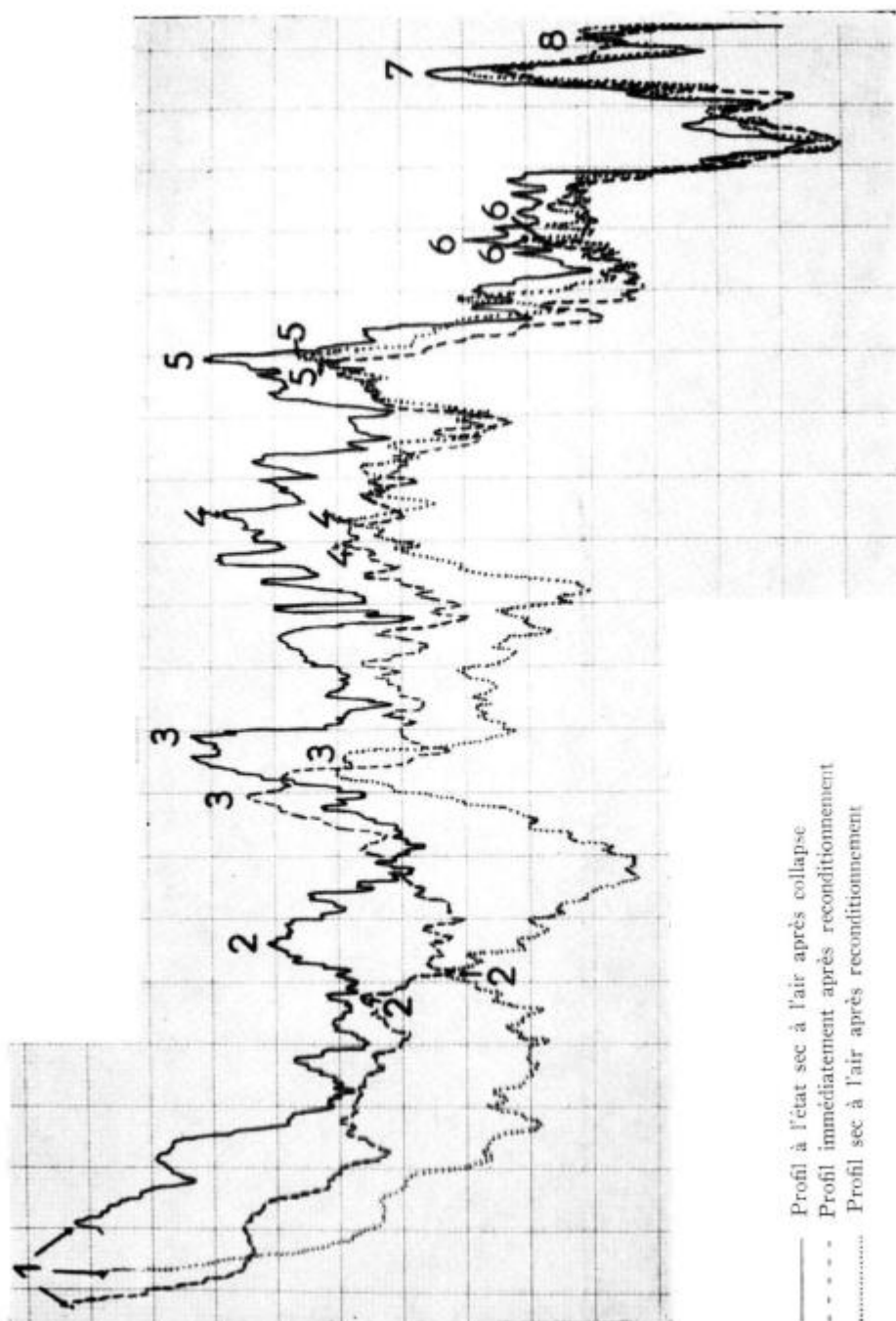
A l'heure actuelle, on ne sait pas éviter le collapse et on ignore encore, en grande partie, comment il se produit; on n'a notamment pas pu élucider les raisons pour lesquelles certaines espèces en sont affectées, alors que d'autres, dont les plans ligneux sont tout à fait semblables, sont épargnées. Il semble cependant que deux phénomènes physiques soient susceptibles de fournir une explication partielle: la tension capillaire qui s'exerce en cours de séchage, en l'absence de bulles, dans les cavités des fibres, et les contraintes que les zones extérieures dont l'eau s'échappe en premier lieu font peser sur les parties internes du bois au moment où leurs cellules constitutives présentent encore une certaine plasticité.

Fort heureusement, un traitement permettant d'éviter les conséquences les plus fâcheuses du *collapse* a été mis au point : c'est le reconditionnement qui, sans entrer dans les détails, consiste, après un séchage progressif, d'abord à l'air (durant 3 à 6 mois), puis en séchoir jusqu'à une humidité moyenne de 17 %, à traiter les bois pendant 3 à 6 heures à la vapeur à 100° ; ceci a pour effet de supprimer la majeure partie du *collapse* : le « *collapse* récupérable » ; les longueurs radiales et tangentielles, qui avaient fortement diminué, augmentent à nouveau pendant cette opération et de façon *irréversible*. Les dimensions de la pièce traitée ne diffèrent plus alors de celles qu'elle avait à l'état frais que par le retrait normal, égal à la somme du « retrait sans *collapse* » et du « *collapse* résiduel ».

Or, ce phénomène de récupération, qui intervient à la suite du reconditionnement, est lui aussi mal connu, et l'analyse densitométrique de clichés radiographiques paraît susceptible d'apporter une aide efficace aux nombreux chercheurs que le problème intéresse.

En effet, pendant le reconditionnement, le bois s'imbibe d'eau et subit en même temps un certain gonflement dans les sens radiaux et tangentiels ; au point de vue radiographie, il y a simultanément une augmentation de l'absorption due à l'humidité accrue du bois et une diminution tenant au fait que le poids de matière ligneuse à l'unité de surface devient, au contraire, plus faible. La comparaison des profils avant et après reconditionnement permet une appréciation globale du phénomène résultant ; mais on peut aussi faire la part de chacune des deux composantes : la juxtaposition du profil d'un échantillon *collapsed* sec à l'air et du même échantillon ramené à la même teneur en eau après reconditionnement donne une indication exacte de la baisse de densité superficielle en chaque point, donc des variations de la récupération ; de même, en comparant deux graphiques établis après reconditionnement, le premier immédiatement à la fin du traitement, le second à l'état sec à l'air, on peut avoir une image précise des modifications de l'imbibition par l'eau tout au long du ou des profils étudiés ; bien entendu, des explorations faites dans le sens radial et dans le sens tangentiel permettent de faire la part entre les changements qui interviennent dans ces deux directions fondamentales ; de plus, des radiographies prises à intervalles de temps réguliers pendant le reconditionnement rendent possible une étude dynamique du phénomène, en montrant la rapidité relative de la récupération et de l'imbibition en chaque point.

Les recherches sur le *collapse* font actuellement l'objet d'un travail en commun entre le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization d'Australie (qui est particulièrement intéressé à la question en raison de l'énorme importance économique de l'Eucalyptus dans ce pays) et le Laboratoire. D'ores et déjà,



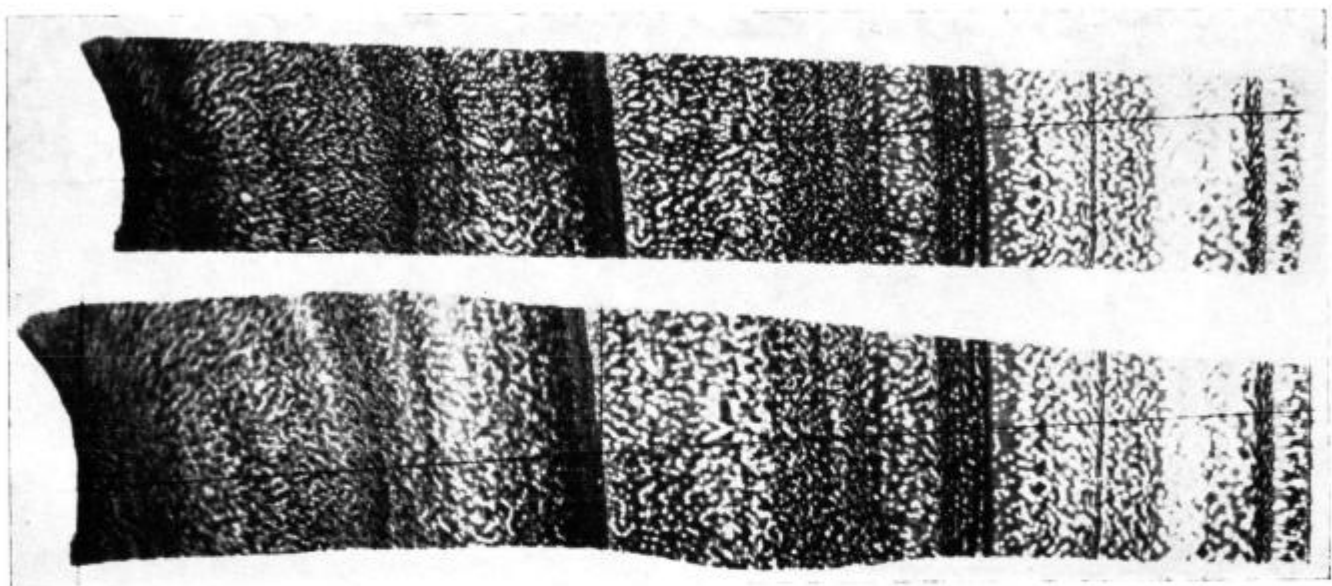


FIG. 41.

Etude du collapse et du reconditionnement.

Positifs de radiographie

— en haut: état sec à l'air après collapse

— en bas: immédiatement après reconditionnement.



KAUMAN (1966) a pu montrer, en travaillant sur des radiographies d'Eucalyptus français et sur les profils densitométriques correspondants que nous lui avons fait parvenir :

- que l'imbibition varie en raison inverse de la densité du bois,
- que la récupération, aussi bien en densité superficielle qu'en dimensions dans le sens radial et dans le sens tangentiel, est d'autant plus forte que l'imbibition est plus élevée,
- mais que des phénomènes d'interaction interviennent, le bois de printemps, qui est plus collapsé que le bois d'été par exemple, voyant ses possibilités de récupération limitées par le voisinage de ce dernier.

Ces recherches étant actuellement en cours, nous nous contenterons de donner ici (fig. n° 41) les positifs de deux radiographies d'un même échantillon d'Eucalyptus, la première prise à l'état sec à l'air après collapse et dressage des rives, la seconde après reconditionnement et stabilisation à une teneur en eau identique à la précédente. La comparaison de ces deux clichés permet de voir le gain de volume très important qui résulte du reconditionnement et les grandes variations du collapse d'un accroissement annuel à l'autre et à l'intérieur même d'un accroissement annuel.

Sur la même figure sont reportés trois profils densitométriques : le premier et le troisième correspondent dans l'ordre aux radiographies jointes, le second a trait à un cliché pris immédiatement après reconditionnement et permet de suivre les variations de l'imbibition. En raison des changements de dimensions dans le sens radial, 8 repères ont été portés sur les profils densitométriques de façon à fournir un certain nombre de points de correspondance.

La comparaison de ces trois profils confirme les observations de KAUMAN consignées ci-dessus.

---

## CHAPITRE V

### COMPARAISON DE PROVENANCES

---

L'analyse densitométrique, grâce aux multiples renseignements qu'elle fournit sur les diverses composantes de la densité du bois, procure un moyen d'investigation très efficace pour comparer entre elles diverses provenances d'une même essence.

Nous donnerons comme exemple d'une telle utilisation celui de deux placeaux de Douglas situés, l'un dans l'arboretum de Pézanin, l'autre dans celui de Royat, et dont nous avons déjà eu l'occasion de signaler qu'ils présentaient des caractéristiques très dissemblables au point de vue production de bois juvénile (POLGE, 1964 a, op. cit.).

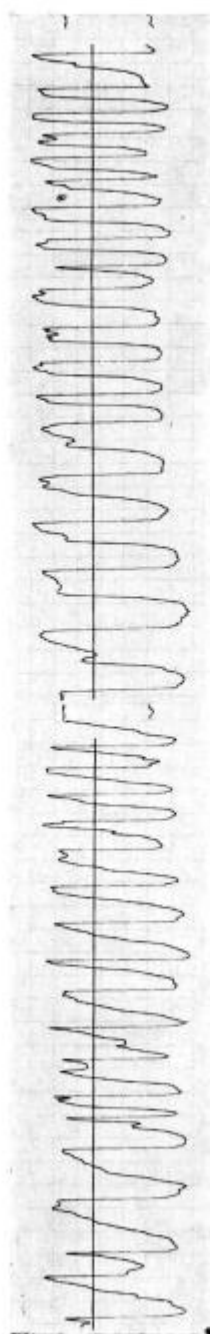
Les différences relevées dans leurs courbes de variations de densité sont au moins aussi marquées que celles qui avaient pu être mises en évidence pour le bois juvénile.

Les figures n<sup>os</sup> 42 a à d regroupent les profils densitométriques d'un certain nombre d'échantillons de l'une et l'autre de ces deux provenances, pris au hasard parmi ceux qui présentaient des séquences de cerne de largeurs équivalentes, et de même âge, de façon à éliminer l'influence perturbatrice de ces deux variables sur la densité du bois.

On peut voir que, du seul point de vue de la forme des courbes, des variations très nettes apparaissent puisque, d'une façon générale, les graphiques concernant les arbres de Royat ont une montée en densité assez progressive, donnant un profil concave vers le haut, alors que pour ceux de Pézanin, le passage bois initial - bois final est très brutal, en sorte que, souvent, ce dernier se trouve délimité par deux traits à peu près parallèles.

Pour nous assurer que ces observations subjectives correspondaient vraiment à des différences significatives entre les deux provenances, nous avons procédé à une analyse statistique sommaire portant sur 27 couples d'échantillons représentant au total 957 cerne, sur les courbes de variations de la densité desquels on a mesuré

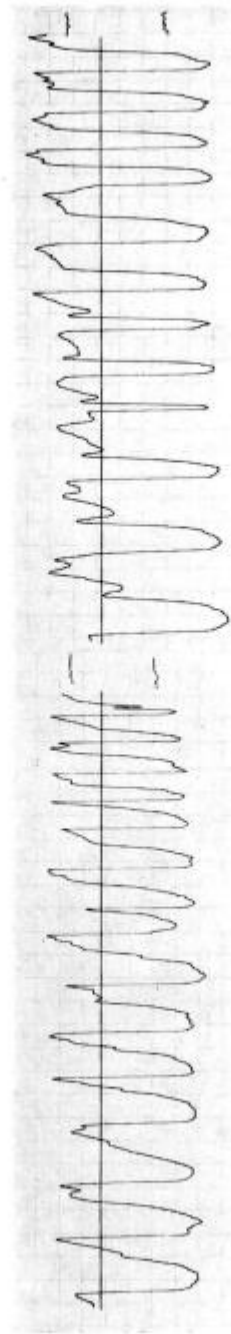
ROYAT



PEZANIN

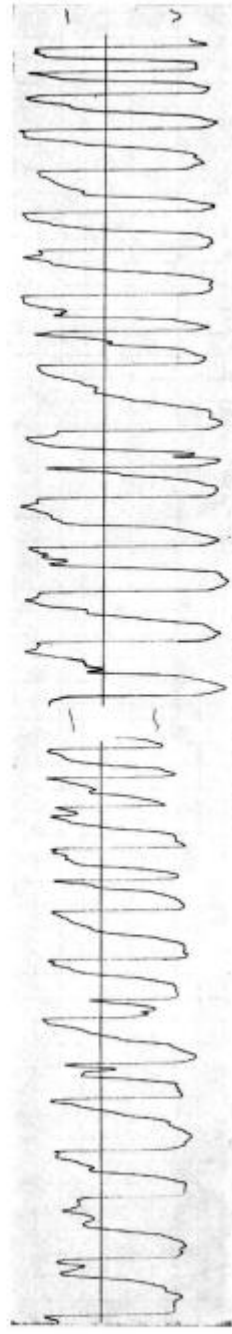
R 429

P 66



R 315

P 8



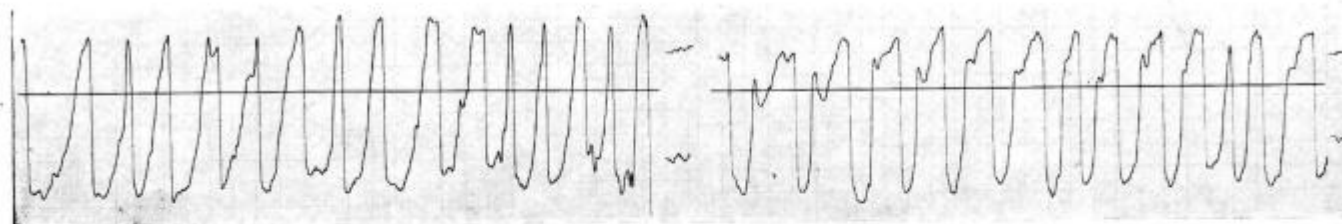
R 439

P 98

FIG. 42 a. — Comparaison de provenances de Douglas.

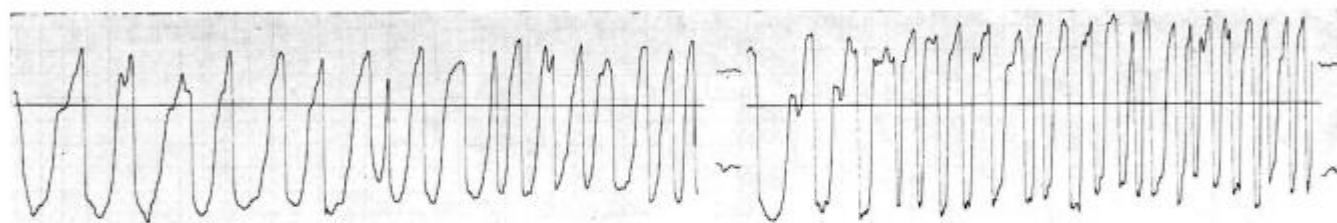
ROYAT

PEZANIN



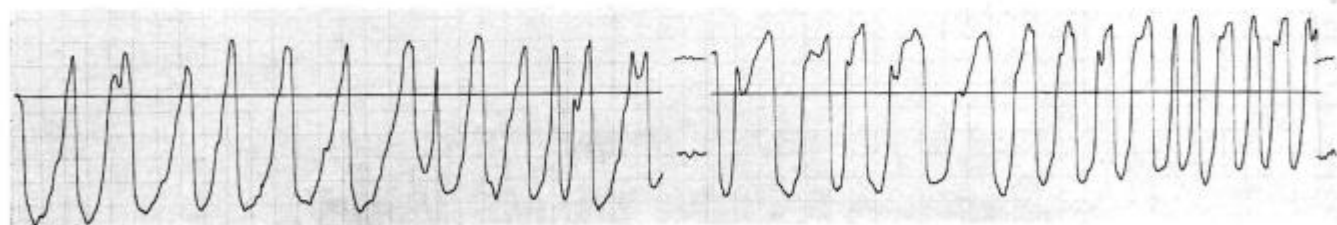
R 483

P 37



R 306

P 32



R 173

P 35

FIG. 42 b. — Comparaison de provenances de Douglas.

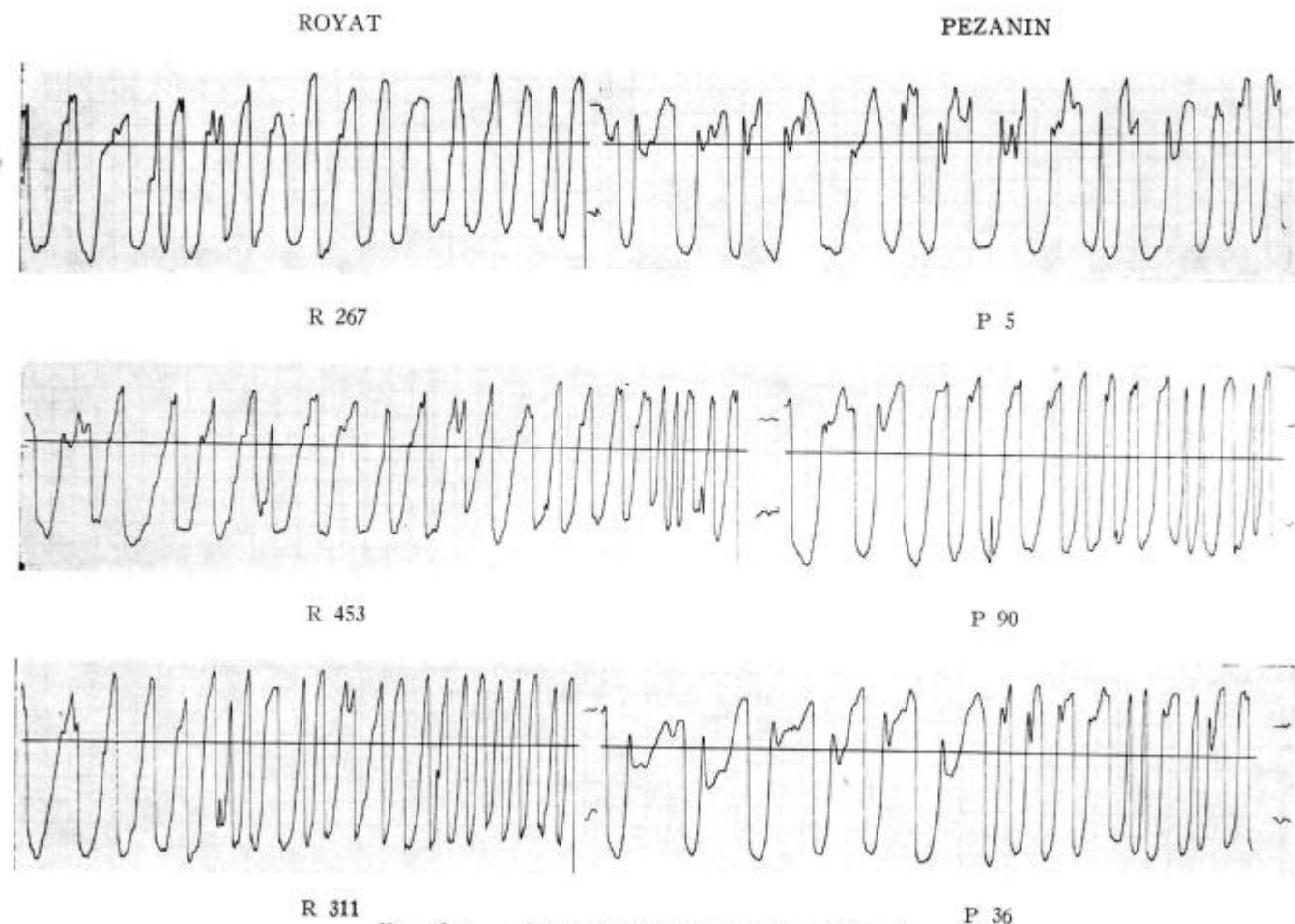
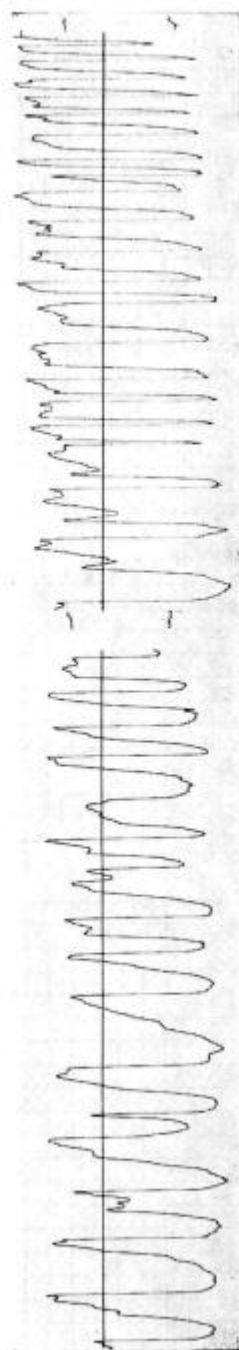


Fig. 42 c. — Comparaison de provenances de Douglas.

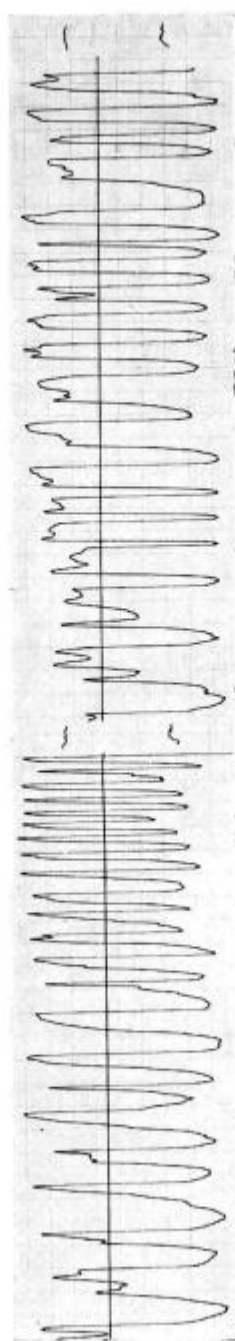
PEZANIN

ROYAT



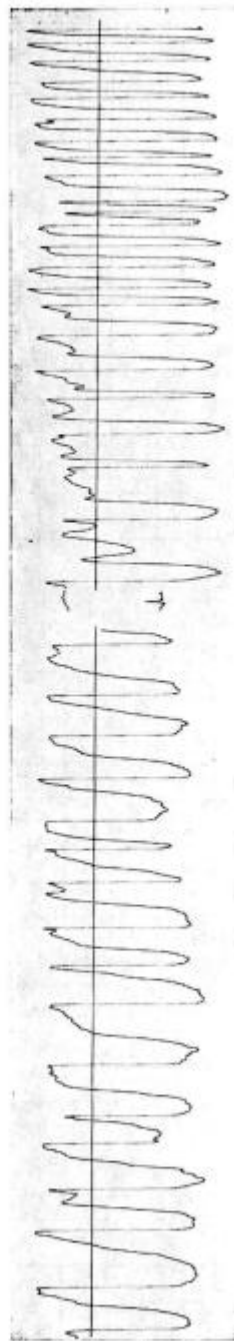
P 88

R 53



P 83

R 379



P 24

R 360

Fig. 42 d. — Comparaison de provenances de Douglas.

une caractéristique classique: le pourcentage moyen de bois d'été et deux caractéristiques inédites: la densité maximale moyenne annuelle et la densité minimale moyenne annuelle.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau n° 6 suivant:

TABLEAU n° 6  
Comparaison de provenances

	% Bois d'été		Densité maximale		Densité minimale	
	Royat	Pézanin	Royat	Pézanin	Royat	Pézanin
	38,06	54,44	787	757	248	144
	38,39	47,25	730	736	197	157
	40,57	55,39	768	801	205	225
	37,87	62,37	762	784	150	219
	47,18	49,33	752	783	212	231
	32,28	52,22	753	798	233	232
	26,06	54,85	713	750	161	155
	35,51	48,10	737	768	201	157
	27,36	55,46	704	737	193	162
	49,70	46,52	753	762	268	232
	42,28	61,10	717	775	259	298
	33,27	52,20	727	780	184	257
	35,93	46,17	707	774	224	261
	43,15	54,07	744	758	225	146
	39,89	45,68	758	808	197	218
	41,68	45,95	734	785	199	185
	36,95	60,63	739	786	192	237
	40,81	47,17	740	748	242	151
	42,67	50,17	719	772	214	175
	36,04	44,92	747	737	222	214
	33,30	50,07	700	764	180	236
	27,98	38,94	706	762	125	137
	37,37	42,11	714	786	196	276
	31,67	51,02	734	804	240	271
	42,63	49,28	725	794	203	187
	46,79	57,53	793	771	249	207
	35,20	45,94	736	741	189	227
Moyennes .....	$\bar{x} = 37,83$	$\bar{x}' = 50,70$	$\bar{x} = 737,00$	$\bar{x}' = 771,14$	$\bar{x} = 207,70$	$\bar{x}' = 207,29$
Différence .....	12,87		34,14		0,41	
Variance commune ..	34,36		513,38		1592,61	
Variance de la différence .....	2,55		58,03		117,97	
Ecart réduit t.....	8,07		5,53		0,04	

La comparaison des moyennes est faite en tenant compte de la faible taille de l'échantillon qui ne permet pas un calcul de la variance pour chaque provenance séparément (VESSEREAU, 1960). On estime donc la variance commune par la formule:

$$s^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 + \sum_i (x'_i - \bar{x}')^2}{2(N-1)}$$

où  $N$  est le nombre de paires de mesure, puis celle de la différence qui est égale à

$$\frac{2s^2}{N}$$

d'où un écart-type de

$$s\sqrt{\frac{2}{N}}$$

On en tire l'écart-réduit

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{x}'}{s} \sqrt{\frac{N}{2}}$$

Avec un nombre total d'échantillons supérieur à 30, la valeur de  $t$  au seuil de 0,001 est de 2,75; il n'y a donc pas une chance sur mille pour que les différences constatées entre les deux provenances étudiées, au point de vue pourcentage de bois d'été et densité maximale moyenne annuelle, soient l'effet du hasard. Par contre, il n'y a aucune différence significative entre les densités minimales moyennes annuelles.

Or, si l'on compare entre elles les conditions de station, on se rend compte qu'elles sont très semblables: en dépit d'une faible différence d'altitude (Royat: 750 m, Pézanin: 400 m), la pluviosité et la température moyenne annuelle sont très voisines (856 mm et 8° pour Royat, 887 mm et 8°75 pour Pézanin) et les sols sont, de plus, très comparables puisque, dans l'un et l'autre cas, la roche-mère est granitique. Par ailleurs, on a vu que les échantillons ont été choisis de façon telle que l'ordre de grandeur des largeurs de cernes soit le même, pour éviter une influence possible des facteurs sylvicoles (densité du peuplement, éclaircie, etc...).

Les autres causes principales de variations étant ainsi éliminées dans toute la mesure du possible, on peut penser que les différences constatées trouvent leur origine dans les patrimoines héréditaires des deux placeaux, et ce d'autant qu'ils sont également très dissimilaires, on l'a vu, au point de vue bois juvénile. De plus, des comparaisons, moins approfondies il est vrai, faites avec d'autres essences (*Abies grandis*, *Abies nordmanniana* Spach.) en provenance de ces mêmes arboretums n'ont fait apparaître aucune différence significative entre elles au point de vue densité du bois, ce qui tend à confirmer la similitude des conditions écologiques, et, par voie de conséquence, l'influence prépondérante du génotype pour expliquer l'opposition constatée entre les deux placeaux de Douglas. Malheureusement, l'origine des plants utilisés lors de leur création



n'est pas connue, et des prélèvements effectués récemment dans un test de provenances où figurait celle de Royat n'ont pas permis de conclure, puisque la provenance Pézanin n'y était pas représentée.

Quoi qu'il en soit, on peut, sur le plan pratique, essayer de prévoir, à partir des courbes de variations de densité, les utilisations les plus appropriées pour les bois des deux origines étudiées :

Une provenance telle que Pézanin convient à tous les emplois pour lesquels une densité élevée est un critère favorable (charpente, bois de mine, poteaux de ligne, ou même bois à fibres) ; par contre, le grand contraste de densité que l'on constate à l'intérieur même des cernes et le brusque passage du bois initial au bois final la rendent peu recommandable pour des utilisations nobles, telles que menuiserie fine ou déroulage.

Il en est tout autrement en ce qui concerne la provenance Royat : sa faible densité moyenne lui confère des caractéristiques mécaniques peu élevées, et s'oppose à un bon rendement en fibres lors d'utilisations papetières éventuelles ; mais sa moindre dureté, le passage progressif du bois de printemps au bois d'été et la faible différence de densité qui existe entre eux en font un bois plus homogène que celui de Pézanin, susceptible de prétendre aux emplois les plus nobles, pour peu, bien entendu, qu'un bon élagage de la bille de pied ait permis la formation d'une épaisseur suffisante de bois net de nœud.

---

## CHAPITRE VI

### ESSAIS DE DETERMINATION DE CARACTERISTIQUES NOUVELLES A PARTIR DES COURBES DE VARIATIONS DE LA DENSITE

---

#### 1 — Observations préliminaires.

Bien que l'on sache, depuis maintenant plus de 15 ans, enregistrer graphiquement les variations de la densité du bois par des méthodes variées (absorptiométrie  $\beta$  en Grande-Bretagne, Allemagne, U.S.A. et en Nouvelle-Zélande, photométrie sur coupes microscopiques au Canada, analyse de texture superficielle aux U.S.A.), il est assez surprenant de constater que les courbes obtenues ne servent qu'à la seule détermination de la densité moyenne ou de la texture, et n'ont, sauf erreur de notre part, jamais été utilisées jusqu'ici pour mesurer des caractéristiques nouvelles impossibles à obtenir à l'aide de méthodes traditionnelles.

La raison de cet état de choses assez surprenant doit sans doute être recherchée dans le fait que les autres procédés rappelés ci-dessus sont, soit trop lents, soit trop peu précis, pour permettre l'analyse fine d'un grand nombre d'échantillons, seule susceptible de rendre possible la mise en évidence de différences significatives entre certains points, ou certaines caractéristiques remarquables des courbes de variations.

Dans les paragraphes suivants, nous rendrons compte de deux essais de détermination de critères nouveaux obtenus par la méthode radiographique; dans un premier cas, qui se rattache à une recherche d'ordre technologique, le progrès qui en résulte pour la connaissance du phénomène étudié est réel mais faible; dans le second, par contre, consacré à une étude touchant à la physiologie de l'arbre, les nouvelles variables introduites permettent de rendre beaucoup mieux compte du phénomène analysé, que les caractéristiques classiques auxquelles elles sont comparées.

## 2 — Recherche de critères nouveaux utilisables pour une étude de résistance mécanique.

### 21 — Problème posé.

Il s'agit de savoir si un critère très important de résistance mécanique, la charge maximale de rupture en flexion statique en kg/cm<sup>2</sup> à 15 % d'humidité, dont on admet qu'elle est sous la dépendance étroite de la densité du bois, s'explique effectivement mieux par les variations de celle-ci que par celles d'autres caractéristiques susceptibles d'être relevées sur les courbes de variations de la densité.

Le matériel d'étude a été fourni par un lot de 23 bois de mine d'*Abies grandis* de 2,50 m de longueur et dont la circonférence variait de 33 à 59 cm, et les teneurs en eau de 13 à 22 %.

La variable à expliquer Y a été déterminée par calcul, à partir de la charge maximale de rupture au degré d'humidité H % des divers échantillons (CH) par application de la formule empirique suivante:

$$Y = C_H \times c' (H - 15)$$

dans laquelle c' est un coefficient de tenue à l'humidité supposé constant dans toute la gamme de teneurs en eau de l'échantillonnage. Les essais de rupture ont été réalisés sur une portée de 2 m à l'aide d'une presse hydraulique munie d'un dispositif maintenant la charge constante pendant la rupture, et les charges maximales ont été relevées, à la fois sur un manomètre indicateur et sur le graphique d'enregistrement établi par la machine.

Les variables explicatives sont:

\* X1: densité moyenne du billon à 15 % d'humidité, établie par calcul à l'aide de la formule:

$$D_{15} = D_H \frac{(1 - v)(H - 15)}{100}$$

dans laquelle v est le coefficient de rétractibilité du bois et D<sub>H</sub> la densité au degré d'humidité H, obtenue d'une façon assez grossière, par pesée et détermination du volume faite en assimilant les échantillons à des cylindres de même longueur ayant pour base un cercle dont la circonférence serait égale à la circonférence médiane sous écorce.

\* X2: densité moyenne des échantillons radiographiés, déterminée sur des éprouvettes radiales de 5 mm d'épaisseur, à l'état sec à l'air qui correspondait à une teneur en eau de 8 % (X2 est, en général, très différent de X1 car, contrairement au billon d'essai, ces éprouvettes radiales étaient nettes de nœuds et d'écorce, et, de

plus, les cernes les plus près de la moelle y étaient, à largeur égale, représentés par des volumes identiques aux cernes périphériques, alors que dans la réalité, ceux-ci occupent un volume beaucoup plus important que ceux-là).

\* X3: pourcentage de la longueur radiale ayant une densité supérieure ou égale à 600, obtenu sur les graphiques d'enregistrement en traçant une parallèle à l'axe des abscisses au point d'ordonnée 600, et en mesurant la longueur interceptée pour laquelle la courbe de variations de la densité se trouvait au-dessus de cette ligne de référence.

\* X4: pourcentage de la longueur radiale ayant une densité supérieure à 500, déterminé graphiquement comme le précédent.

\* X5: pourcentage de la longueur radiale ayant une densité supérieure à 400 (mesuré de la même façon).

\* X6: moyenne des densités maximales annuelles relevées sur les courbes de variations de la densité.

\* X7: moyenne des densités minimales annuelles.

\* X8: moyenne de X6 et X7.

## 22 — Résultats.

Les valeurs des diverses variables sont données par le tableau suivant:

TABLEAU n° 7

Valeurs de la variable à expliquer  
et des diverses variables explicatives.

N° Echan- tillon	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
1	19,32	416	395	18,20	30,00	46,30	720	180	450
2	22,20	411	379	18,90	30,60	46,40	730	170	450
3	24,39	389	458	21,82	33,99	49,07	700	180	440
4	24,07	381	363	14,18	27,82	40,91	690	170	430
5	19,87	394	377	15,08	24,76	39,94	720	180	450
6	17,24	332	409	19,75	40,12	53,75	700	130	415
7	27,28	507	456	26,87	45,00	62,03	730	240	485
8	18,54	491	424	19,83	38,27	51,67	720	230	475
9	6,09	397	411	16,49	30,10	47,12	710	210	460
10	13,92	445	436	13,22	33,86	59,25	730	210	470
11	15,63	375	356	11,87	17,31	28,40	710	190	430
12	18,07	376	381	16,39	24,86	34,41	700	190	445
13	23,60	388	390	15,98	25,42	39,35	710	190	450
14	22,20	400	393	18,98	32,37	43,56	750	160	455
15	21,78	421	369	17,98	26,88	35,62	750	190	470
16	14,09	358	348	9,31	19,12	31,12	690	140	415
17	28,14	471	391	20,75	37,73	48,37	750	210	480
18	21,00	412	392	14,79	26,05	41,06	740	180	460
19	27,20	492	438	25,57	38,88	65,49	730	220	475
20	16,23	397	368	10,54	24,16	33,16	660	180	420
21	19,49	411	469	15,20	23,40	43,00	710	180	445
22	13,92	381	384	7,63	24,30	38,19	660	220	440
23	12,62	379	409	9,45	23,31	35,13	660	200	430

L'exploitation statistique de ces résultats a été faite par la méthode de l'analyse de régression progressive (TOMASSONE, 1965).

Rappelons que, dans cette méthode, on commence par calculer les coefficients de régression simple pour toutes les variations explicatives essayées; on cherche l'équation linéaire qui ajuste le mieux la variable à expliquer à l'aide de la meilleure des variables explicatives. On détermine ensuite celle des autres variables explicatives qui fournit l'information *supplémentaire* maximale, et on calcule à nouveau la meilleure équation obtenue à l'aide de ces deux variables. A chaque palier, un test de SNEDECOR (Test F) permet de voir si l'introduction de la nouvelle variable est significative, ou non.

Les pourcentages de la variation de Y expliquée par les diverses variables X1 à X8 sont les suivants:

Variable	% de variation
—	—
X1	29,415
X2	6,286
X3	63,876
X4	31,459
X5	22,148
X6	35,010
X7	5,593
X8	30,560

La variable qui fournit, et de loin, la meilleure explication est le pourcentage de longueur totale de densité supérieure à 600 (X3), qui rend compte de 64 % de la variation de Y.

Celle qui vient en second lieu est la moyenne des densités maximales (X6); la densité du billon (X1) n'arrive qu'en 5<sup>e</sup> position, et la densité de l'éprouvette radiale (X2) en avant dernière.

La valeur de F (supérieure à 37) est très significative pour 1 et 21 degrés de liberté, ce qui montre que la variable X3 exerce effectivement une influence très marquée sur la résistance en flexion statique. La première équation de régression établie avec cette variable est la suivante:

$$Y = 0,741 X3 + 7,666$$

et le coefficient de corrélation, égal à la racine carrée du pourcentage de variation expliquée par X3, se chiffre à 0,80.

Au palier suivant, les autres variables rendent compte des pourcentages ci-dessous de la variation de Y non encore expliquée par X3:

Variable	% de variation
—	—
X2	4,478
X5	3,943
X4	3,621
X6	1,054
X8	0,395
X1	0,331
X7	0,003

La nouvelle variable qui fournit maintenant l'information la meilleure, après X3, est X2, suivie par X5 et X4; l'ordre est donc complètement bouleversé par rapport au palier précédent, ce qui ne doit pas surprendre, et prouve seulement que les variables qui étaient bien classées au premier palier et ne le sont plus maintenant étaient fortement liées à X3, et ne pouvaient donc pas, au niveau inférieur, apporter une information supplémentaire importante.

Le test F d'introduction de la nouvelle variable se chiffre à 2,87, c'est-à-dire que cette introduction n'apporte pas de progrès significatif pour expliquer la résistance en flexion statique.

La nouvelle équation de régression est:

$$Y = 0,866 X3 - 0,034 X2 + 19,178$$

Le test t de STUDENT, rapport des coefficients de régression à leur écart-type, est significatif pour X3, mais pas pour X2, ce qui confirme que, en supposant X2 fixé, on a des différences significatives pour X3, mais que l'inverse n'est pas vrai.

Le fait que, dans la nouvelle équation de régression, X2 soit affecté d'un coefficient négatif, bien que densité et flexion statique varient généralement dans le même sens, montre simplement qu'il y a une tendance (non significative, on l'a vu) pour que, lorsque X3 est fixé, la résistance en flexion statique diminue quand la densité augmente.

Le nouveau coefficient de corrélation multiple obtenu après introduction de X3 et X2 est de 0,684, en léger progrès par rapport à celui trouvé au premier palier.

En poursuivant l'analyse de régression progressive par l'introduction de nouvelles variables (la meilleure au palier suivant est X4), on trouve qu'il n'en résulte aucun progrès significatif pour

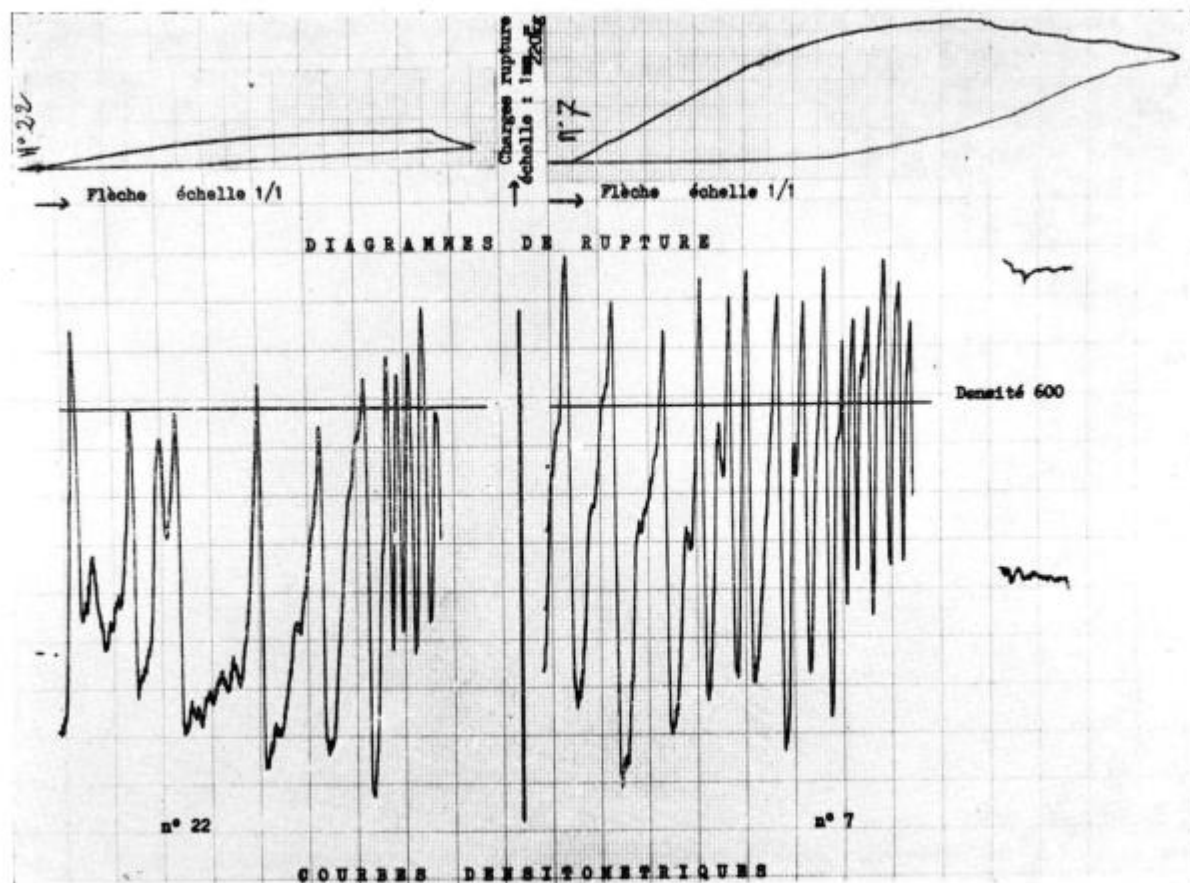


FIG. 43. — Diagrammes de rupture et profils densitométriques pour deux échantillons d'*Abies grandis*.

expliquer Y. Le coefficient de régression multiple augmente jusqu'à 0,700 à ce niveau, puis à 0,721 lorsqu'on introduit une 4<sup>e</sup> variable qui est X1, après quoi il reste pratiquement stationnaire.

On voit donc que seul le pourcentage de longueur totale de densité supérieure à 600 explique d'une façon significative la variable Y, mais qu'il l'explique très bien compte tenu du nombre relativement restreint d'échantillons étudiés.

Pour préciser un peu plus le phénomène, nous avons, après coup, essayé deux nouvelles variables encadrant X3, à savoir les pourcentages de longueur totale de densité supérieure à 550 et à 650. Ces variables ont fourni des coefficients de corrélation se chiffrant respectivement à 0,62 et à 0,78, correspondant à des pourcentages de variation expliquée de 0,38 et de 0,61. L'introduction de ces nouvelles variables n'aurait donc pas empêché X3 de donner le meilleur pourcentage de variation de Y au premier palier, et n'aurait sans doute rien changé à la suite de l'analyse de régression progressive, étant donné qu'elles sont, selon toute vraisemblance, très fortement liées à X3.

Or, si l'on cherche à voir où se situe la limite bois initial - bois final suivant la définition de MORK par rapport aux valeurs de densité retenues pour caractériser X3, X4 et X5, on constate qu'elle correspond à très peu près à une densité de 550, c'est-à-dire que la texture, au sens traditionnel du terme, a une valeur qui est assez voisine de celle de X3, mais rend moins bien compte qu'elle du phénomène étudié.

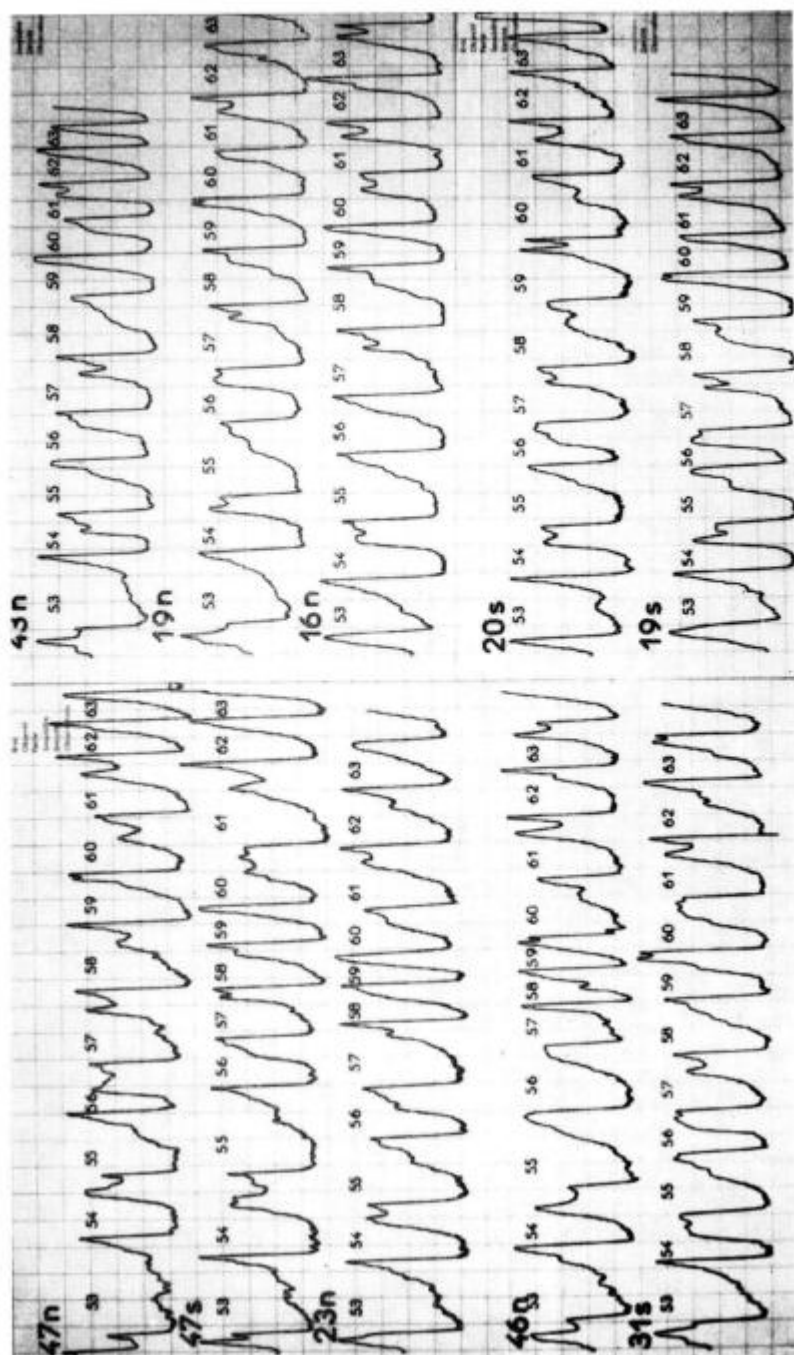
La figure n° 43 montre l'étroite corrélation qui existe entre la résistance en flexion statique et le pourcentage de la longueur radiale dont la densité est supérieure à 600 g/dm<sup>3</sup>; elle regroupe en haut les graphiques de rupture, en bas les courbes densitométriques de deux échantillons de caractéristiques très opposées: pour le n° 22 (à gauche de la figure), de nombreux accroissements annuels ont une densité maximale qui n'atteint pas ou dépasse de très peu 600, et le diagramme d'essai en flexion statique laisse apparaître une charge de rupture extrêmement faible; l'échantillon n° 7, au contraire, présente chaque année un fort pourcentage de bois de densité supérieure à 600, et en même temps sa charge de rupture est particulièrement élevée; la concordance est frappante entre les deux séries de graphiques, obtenus cependant par des méthodes n'ayant entre elles aucun point commun.

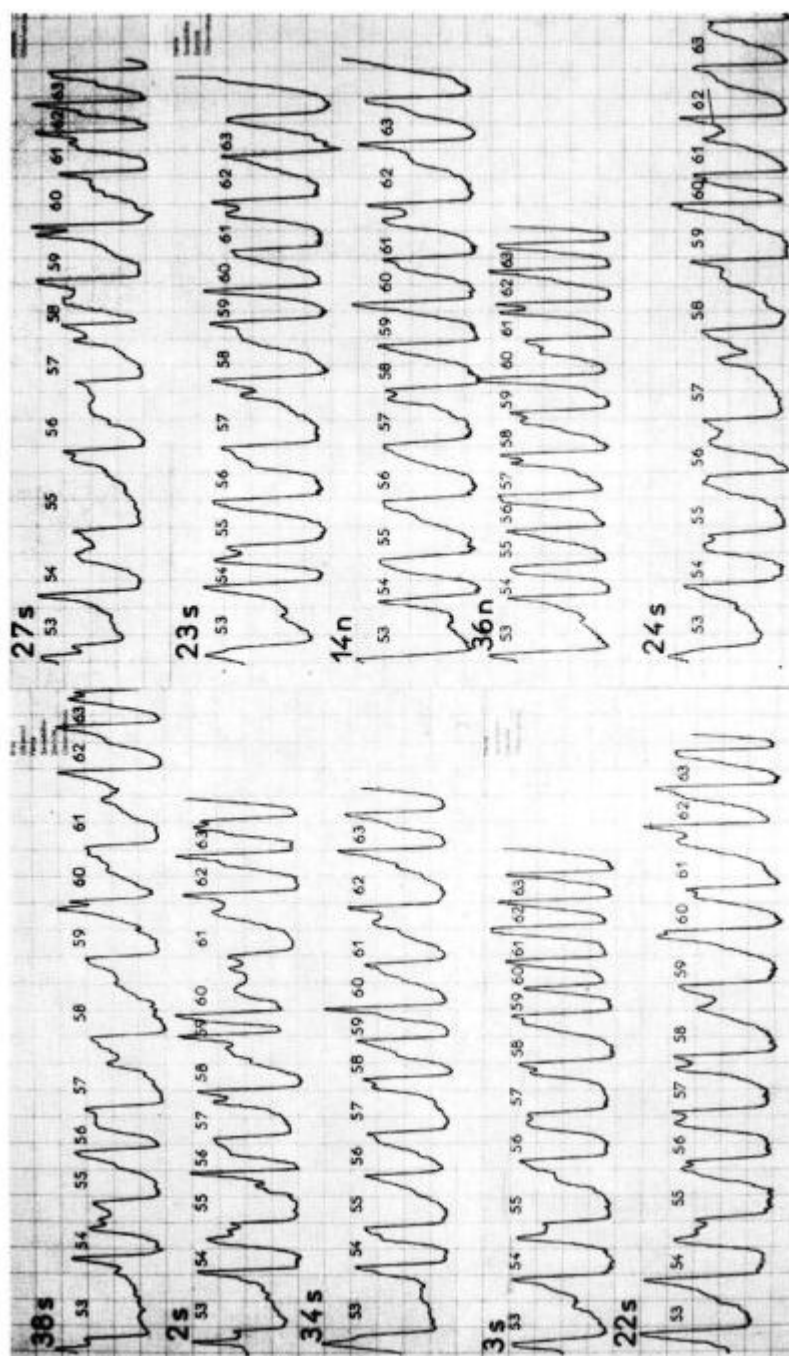
### 3 — Utilisation de caractéristiques nouvelles tirées des courbes de variations de densité pour une étude se rapportant à la physiologie de l'arbre.

#### 31 — *Considérations générales.*

Les courbes de variations de la densité fournissent, en quelque sorte, une synthèse des transformations qui se produisent dans la



Fig. 44 a. — Courbes de variations de densité d'*Abies grandis*.


 Fig. 44 b. — Courbes de variations de densité d'*Abies grandis*.

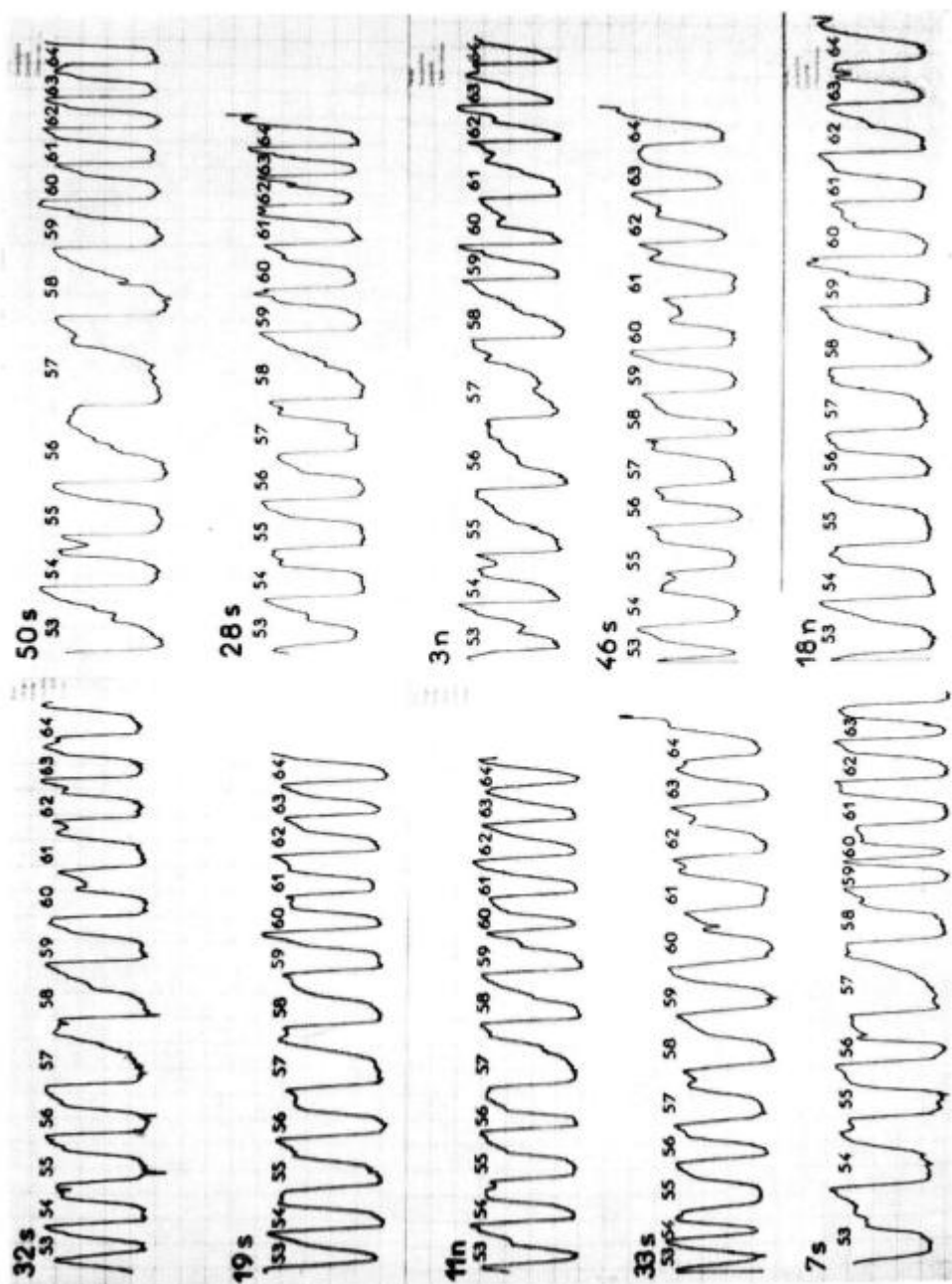


Fig. 45 a. — Courbes de variations de densité de Douglas.

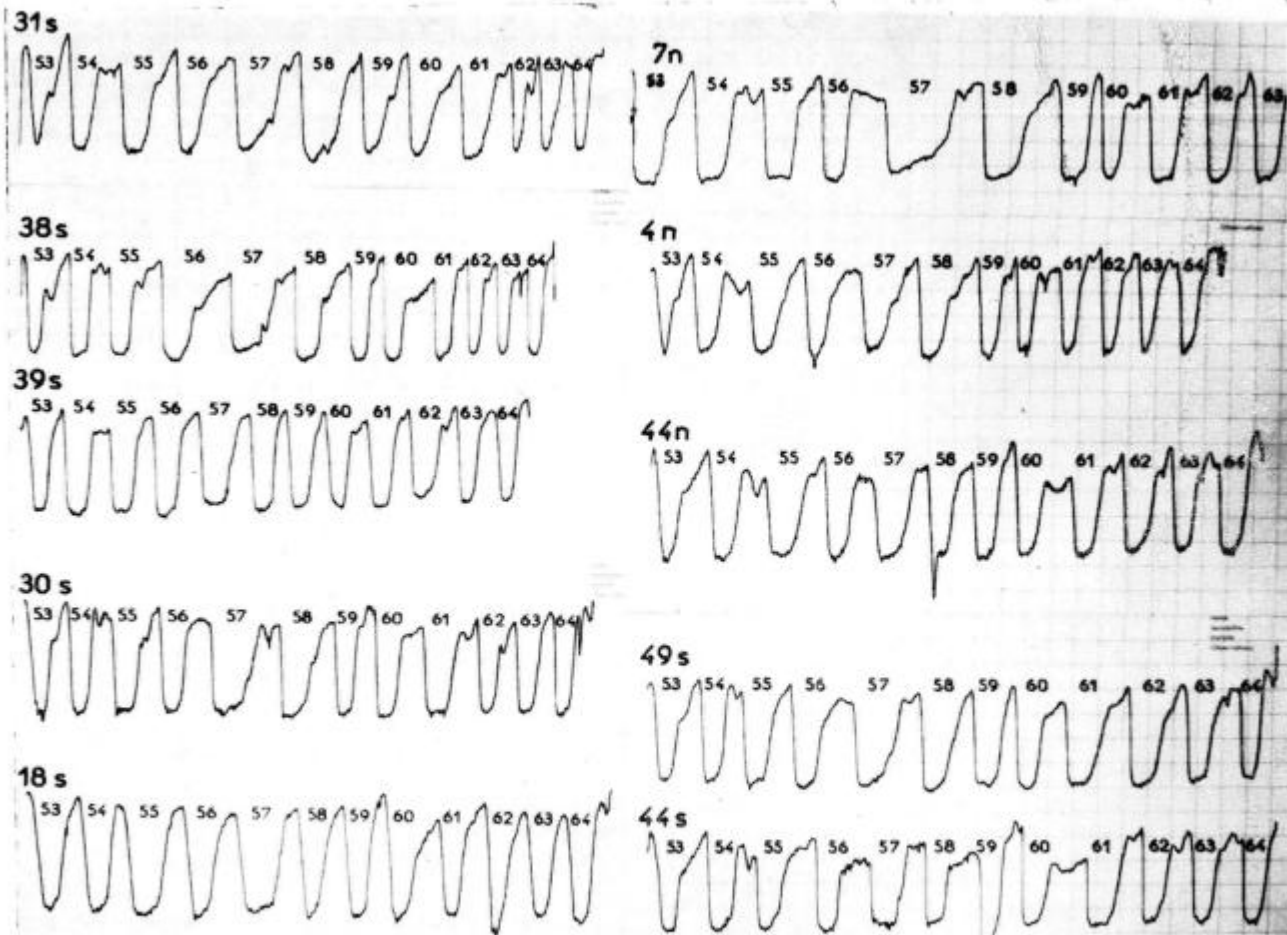


FIG. 45 b. — Courbes de variations de densité de Douglas.

structure anatomique du bois, qui elles-mêmes traduisent les réactions de l'arbre aux diverses modifications de son équilibre physiologique.

Quand aucun changement notable n'intervient dans la concurrence vitale (réduction du nombre de tiges à l'hectare à la suite d'opérations d'éclaircie par exemple), ou dans la nutrition organique ou minérale des divers individus du peuplement (élagage de branches vivantes, fertilisation, etc...), les seuls facteurs importants de variations de la densité du bois sont les facteurs climatiques qui conditionnent aussi bien l'approvisionnement en eau que la transpiration ou la synthèse chlorophyllienne.

L'analyse densitométrique de clichés radiographiques, qui permet d'obtenir rapidement les courbes de variations de densité d'un grand nombre d'arbres par des procédés non destructifs, peut, dans de telles conditions, être mise à profit pour déterminer l'influence des facteurs du climat sur les diverses composantes de la densité du bois.

C'est dans cet esprit qu'a été entreprise une analyse des variations de densité, relevées de 1953 à 1963 inclusivement, sur 100 échantillons d'*Abies grandis* et 100 échantillons de Douglas. Les arbres étudiés faisaient partie d'un peuplement unique, de 34 ans environ, non éclairci durant la période considérée, en sorte que se trouvaient éliminées à la fois les influences de l'âge, de la station, et des changements de rythme de croissance liés à une réduction de la compétition entre individus au niveau des cimes aussi bien que des racines. Les prélèvements ont été exécutés (à la tarière de Pressler de 5 mm), moitié sur la face nord des troncs, moitié sur la face sud, de façon à pouvoir mettre en évidence les effets d'un changement possible de microclimat suivant l'orientation.

### 32 — *Observations relatives à la forme des courbes de variations de densité.*

Les figures n° 44 a et b et 45 a et b regroupent, pour chacune des 2 essences étudiées, les photographies des graphiques densitométriques de 20 échantillons pris au hasard parmi les 100 prélèvements effectués, sur lesquels ont été indiquées les années de production des divers accroissements annuels successifs.

Un examen rapide de cette série de courbes permet de constater que les différents profils d'une même année ont, tout au moins pour une même essence, des silhouettes le plus souvent très semblables :

Pour le Douglas :

— en 1953, les montées en densité sont d'abord assez rapides, puis se ralentissent, ce qui donne souvent un profil convexe du bois d'été agrémenté d'une petite bosse à mi-cerne,

— pour 1954, la densité augmente brutalement, puis se stabilise, et dans le bois d'été apparaît un replat qui comporte un nombre variable de pics, le plus souvent 2 ou 3,

— les courbes de 1955, comme d'ailleurs, à quelques nuances près, celles de 1958, ont généralement une forme de sinusoïde étirée se terminant par une pointe assez marquée,

— les profils de 1956 sont caractérisés par une forme convexe pour le passage du bois initial au bois final, mais, fait relativement rare, l'année se termine quelquefois par une baisse de densité à la fin du bois d'été,

— en 1957, la densité croît d'une façon assez linéaire, et le bois d'été comporte 2 pics assez prononcés; il en est de même pour 1959, à la nuance près que ce double pic est moins marqué,

— les profils de 1960 sont surtout caractérisés par une zone à faible pente moyenne dans le bois d'été qui présente parfois une concavité vers le haut,

— en 1961, la montée en densité est progressive, et le bois d'été comporte 2 pics, dont le premier est généralement moins élevé que le second,

— en 1962, les profils ressemblent aux précédents, mais la première indentation de la courbe est souvent estompée,

— enfin, durant l'année 1963, la densité a augmenté rapidement puis s'est stabilisée, donnant un replat assorti de 2 ou 3 pics de hauteur variable.

#### *Pour Abies grandis:*

— l'année 1953 se distingue par une courbe concave se terminant par une pointe très acérée,

— le profil de 1955 est assez semblable au précédent, mais sa concavité est moins prononcée, et, de plus, une légère bosse apparaît assez souvent dans le bois initial,

— l'année 1954 se caractérise par une montée brutale en densité qui fait que les limites antérieures et postérieures du bois d'été sont à peu près parallèles; de plus, la courbe forme à sa partie supérieure un replat qui est presque toujours agrémenté de plusieurs indentations,

— les graphiques de l'année 1956 rappellent ceux de 1954, mais sont, en général, plus effilés,

— l'année 1957, année à double cerne, est représentée par des profils très caractéristiques avec deux pics particulièrement visibles dont le premier est, le plus souvent, plus petit que le second,

— il en est de même pour 1959, à la différence près que les deux pics sont beaucoup plus rapprochés, donnant à la courbe une allure nettement moins massive,

— en 1958, on observe souvent une première pointe au milieu du bois de printemps remplacée, lorsqu'elle est absente, par une protubérance plus ou moins marquée, etc...

On constate ainsi que, malgré certaines différences (voir en particulier les années 1953 et 1958), les analogies prédominent lorsqu'on compare entre eux les profils des deux essences étudiées; la forme des courbes varie surtout, et considérablement, d'une année à l'autre, au point que, dans certains cas, elle permet à elle seule de retrouver l'âge des cerne; cependant, ces critères morphologiques ne fournissent que des appréciations plus ou moins subjectives, qu'il y a lieu de compléter, si possible, par des estimations chiffrées susceptibles de servir de base à une interprétation statistique.

### 33 — Recherche de critères quantitatifs nouveaux d'identification des accroissements annuels.

Les caractéristiques des divers accroissements annuels couramment étudiées jusqu'ici se limitaient à leur largeur, leur pourcentage de bois d'été, et, quelquefois, leur densité individuelle moyenne. Grâce aux courbes densitométriques, il doit maintenant être possible d'ajouter à cette liste d'autres données quantitatives, et notamment deux particulièrement faciles à mesurer: la *densité minimale* du bois de printemps et la *densité maximale* à la fin du bois d'été.

Si l'on se reporte en effet aux figures n° 44 et 45, on constate que ces deux critères sont, aussi bien que la forme elle-même des courbes, caractéristiques des années de production des divers cerne. Pour ne citer que quelques exemples, on peut observer que chez les Douglas, les maxima de 1953 et de 1959 sont, à de très rares exceptions près, les plus élevés de toute la période considérée, alors que ceux de 1954 et 1956 sont, au contraire, particulièrement bas; il en est de même pour *Abies grandis*, sauf en ce qui concerne l'année 1953, qui ne se distingue pas des autres par un maximum de densité particulièrement fort. Pour l'une comme pour l'autre essence, l'année la plus typique est l'année 1960, dont la densité maximale est exceptionnellement faible, étant notamment, pour 198 échantillons sur 200, inférieure à celles de l'année précédente et de l'année suivante.

Les différences concernant la densité minimale paraissent moins nettes, mais on peut observer, par exemple, que, sur les courbes de variations de densité du Douglas, celles de 1956 et de 1960 sont généralement faibles, et presque toujours moins élevées que pour les années voisines.

Ceci conduit à penser que les maxima et minima de densité annuelle, ainsi éventuellement que certaines combinaisons entre les uns et les autres, peuvent fournir de nouvelles variables susceptibles de caractériser d'une façon satisfaisante les divers accroissements successifs.



34 — *Analyse statistique.*

Pour voir jusqu'à quel point il est légitime de tenir compte, pour l'identification des cernes, de ces critères nouveaux, les maxima et minima de densité ont été déterminés, sur courbes densitométriques, pour chacun des échantillons nord et sud des 50 *Abies grandis* et 50 Douglas de l'expérience, et pour les 11 années comprises entre 1953 et 1963, soit un total de 2 200 valeurs de densité maximale et 2 200 valeurs de densité minimale. Les moyennes par position et par année pour chacune des essences sont consignées sur les tableaux 8 et 9, en même temps que les largeurs de cernes, les largeurs de bois d'été, les pourcentages de bois d'été, et une dernière caractéristique égale à la différence entre la densité maximale de l'année N et la densité minimale de l'année  $N + 1$ , qui, lors d'une étude préliminaire, avait paru intéressante à chiffrer.

Les tableaux 10 et 11 indiquent, pour chacune des 6 variables étudiées et pour chaque essence séparément, les années qui sont apparues comme étant significativement différentes les unes des autres, au seuil de 5 % d'une part, et de 1 % d'autre part, suivant le test de DUNCAN (années non comprises dans une même parenthèse).

Le seul examen de ces documents permet d'ores et déjà de constater que densités maximales et minimales diffèrent beaucoup plus d'une année à l'autre que le pourcentage de bois d'été auquel on se réfère généralement; en outre, ces deux critères paraissent assez indépendants de l'âge de l'assise génératrice, alors qu'au contraire, en dehors de toute considération de climat, la texture tend à augmenter et la largeur des cernes à diminuer au fur et à mesure que celle-ci vieillit.

Pour préciser dans quelle mesure les caractéristiques nouvelles étudiées peuvent être considérées comme plus discriminantes que les anciennes, des analyses de variance ont été faites, tout d'abord pour chaque essence prise isolément; les résultats de ces analyses sont résumés dans les tableaux 12 et 13 sur lesquels on peut faire les commentaires suivants:

La variance résiduelle est, pour toutes les variables retenues, plus importante pour l'*Abies grandis* que pour le Douglas, ce qui tend à prouver que la variabilité interne du second est sensiblement plus faible que celle du premier.

Le test F (SNEDECOR, 1956) permet en outre de faire certaines constatations assez surprenantes:

En ce qui concerne l'effet position par exemple, on peut voir que, pour le Douglas, il existe des différences très significatives, au seuil de 1 %, entre les côtés nord et sud pour toutes les caractéristiques, sauf la largeur des cernes pour laquelle l'écart constaté n'est pas significatif, au sens statistique du terme; la situation est presque



TABLEAU n° 8  
Moyennes par position et par année pour 3 variables traditionnelles et 3 variables nouvelles  
*Abies grandis*

	X1 Largeur des cernes (en 1/10mm)	X2 Largeur de bois d'été	X3 % de bois d'été	X4 Densité Maximale (en gr/dm <sup>3</sup> )	X5 Densité Minimale (en gr/dm <sup>3</sup> )	X6 N - (N + 1)
<u>Facteur Position</u> : DS →	*	NS	NS	NS	NS	NS
NORD .....	56,5	7,3	15,6	600,2	119,2	485,2
SUD .....	52,3	7,5	17,2	616,3	121,7	499,7
<u>Facteur Année</u> : DS →	**	**	**	**	**	**
1953 .....	68,0	7,5	12,2	645,7	153,7	523,2
1954 .....	53,0	7,8	17,5	563,7	123,5	440,0
1955 .....	61,0	6,6	12,5	578,0	126,7	446,2
1956 .....	51,8	7,6	17,7	564,5	131,7	440,7
1957 .....	60,9	6,9	13,5	587,0	123,7	485,0
1958 .....	62,6	6,3	12,9	578,0	102,0	469,7
1959 .....	46,8	8,6	20,1	680,2	107,2	553,5
1960 .....	49,7	4,7	13,5	541,0	126,7	429,2
1961 .....	56,3	10,3	21,2	664,2	111,7	564,2
1962 .....	47,7	7,7	18,1	670,2	111,5	565,0
1963 .....	40,6	7,9	21,1	618,0	106,2	500,0
<u>Moyenne Générale</u> : ....	54,4	7,4	16,4	608,2	120,4	492,4

X6 = Densité maximale de l'année N — Densité minimale de l'année N + 1.

TABLEAU n° 9

Moyennes par position et par année pour 3 variables traditionnelles et 3 variables nouvelles

*Pseudotsuga menziesii*

	X1 Largeur des cernes (en 1/10mm)	X2 Largeur de bois d'été	X3 % de bois d'été	X4 Densité Maximale (en gr/dm <sup>3</sup> )	X5 Densité Minimale (en gr/dm <sup>3</sup> )	X6 N - (N + 1)
<u>Facteur Position :</u> DS,	NS	**	**	**	**	**
NORD .....	40,7	12,9	33,4	759,1	121,5	635,4
SUD .....	40,3	15,1	38,9	799,5	140,1	658,8
<u>Facteur Année :</u> DS,	**	**	**	**	**	**
1953 .....	39,3	14,2	37,1	827,2	140,0	695,2
1954 .....	42,3	15,4	37,9	750,0	132,0	628,0
1955 .....	45,5	15,7	35,5	786,0	124,0	675,7
1956 .....	43,6	15,1	36,2	727,7	110,2	592,7
1957 .....	52,1	15,2	29,9	768,2	135,0	663,7
1958 .....	44,6	13,8	32,0	775,0	104,5	652,2
1959 .....	43,1	11,3	35,0	826,2	122,7	698,7
1960 .....	37,7	11,2	32,2	702,5	127,5	568,0
1961 .....	41,3	15,6	39,7	806,2	134,5	660,2
1962 .....	35,2	13,0	38,5	805,0	146,0	642,2
1963 .....	30,9	13,3	43,5	798,2	162,7	641,5
<u>Moyenne Générale :</u> ..	40,5	14,0	36,1	779,3	130,8	647,1

X6 = Densité maximale de l'année N - Densité minimale de l'année N + 1.

TABLEAU n° 10

Comparaison des moyennes (Test de DUNCAN) - *Abies grandis*

Différences significatives au seuil de 5%	X1	Largeur des Cernes	1953	1958	1955	1957	1961	1954	1956	1960	1962	1959	1963
	X2	Largeur de Bois d'été	1961	1959	1963	1954	1962	1956	1953	1957	1955	1958	1960
	X3	Pourcentage de Bois d'été	1961	1963	1959	1962	1956	1954	1957	1960	1958	1955	1953
	X4	Densité Maximale	1959	1962	1961	1953	1963	1957	1955	1958	1956	1954	1960
	X5	Densité Minimale	1953	1956	1955	1960	1957	1954	1961	1962	1959	1963	1958
	X6	N - (N + 1)	1962	1961	1959	1953	1963	1957	1958	1955	1956	1954	1960
Différences significatives au seuil de 1%	X1	Largeur des Cernes	1953	1958	1955	1957	1961	1954	1956	1960	1962	1959	1963
	X2	Largeur de Bois d'été	1961	1959	1963	1954	1962	1956	1953	1957	1955	1958	1960
	X3	Pourcentage de Bois d'été	1961	1963	1959	1962	1956	1954	1957	1960	1958	1955	1953
	X4	Densité Maximale	1959	1962	1961	1953	1963	1957	1955	1958	1956	1954	1960
	X5	Densité Minimale	1953	1956	1955	1960	1957	1954	1961	1962	1959	1963	1958
	X6	N - (N + 1)	1962	1961	1959	1953	1963	1957	1958	1955	1956	1954	1960

TABLEAU n° 11

Comparaison des moyennes (Test de DUNCAN) - *Pseudotsuga menziesii*

Différences significatives au seuil de 5%	X1 Largeur des Cernes	1957	1955	1958	1956	1954	1961	1953	1960	1962	1959	1963
	X2 Largeur de Bois d'été	1955	1961	1954	1957	1956	1953	1958	1963	1962	1959	1960
	X3 Pourcentage de Bois d'été	1963	1961	1962	1954	1953	1956	1955	1959	1960	1958	1957
	X4 Densité Maximale	1953	1959	1961	1962	1963	1955	1958	1957	1954	1956	1960
	X5 Densité Minimale	1963	1962	1953	1957	1961	1954	1960	1955	1959	1956	1958
	X6 $N - (N + 1)$	1959	1953	1955	1957	1961	1958	1962	1963	1954	1956	1960
Différences significatives au seuil de 1%	X1 Largeur des Cernes	1957	1955	1958	1956	1954	1961	1953	1960	1962	1959	1963
	X2 Largeur de Bois d'été	1955	1961	1954	1957	1956	1953	1958	1963	1962	1959	1960
	X3 Pourcentage de Bois d'été	1963	1961	1962	1954	1953	1956	1955	1959	1960	1958	1957
	X4 Densité Maximale	1953	1959	1961	1962	1963	1955	1958	1957	1954	1956	1960
	X5 Densité Minimale	1963	1962	1953	1957	1961	1954	1960	1955	1959	1956	1958
	X6 $N - (N + 1)$	1959	1953	1955	1957	1961	1958	1962	1963	1954	1956	1960

TABLEAU n° 12  
Analyse de variance - *Abies grandis*.

	Degré de liberté	X1 Largeur des cernes (en 1/10mm)	X2 Largeur de Bois d'été	X3 % de Bois d'été	X4 Densité Maximale (en gr/dm <sup>3</sup> )	X5 Densité Minimale (en gr/dm <sup>3</sup> )	X6 - N - (N + 1)
<u>CARRE MOYEN</u>							
A (arbre) .....	49	3 201,87	320,22	1 817,39	94 113,09	26 524,35	60 070,62
B (position) .....	1	5 188,75	9,04	729,36	72 718,85	2 384,10	57 752,29
C (année) .....	10	6 622,06	200,40	1 269,79	257 752,36	22 142,50	272 778,32
AB .....	49	1 092,53	114,50	724,10	47 983,23	20 241,28	26 810,79
CA .....	500	167,30	18,82	93,98	3 588,59	1 012,51	3 377,82
ERREUR .....	500	88,90	11,95	64,00	1 981,57	692,84	1 972,16
<u>TESTS F</u> (effet arbre aléatoire)							
A .....		36,02**	26,80**	28,40**	47,49**	38,28**	30,46**
B .....		4,75*	0,08	1,01	1,52	0,12	2,15
C .....		39,58**	10,65**	13,51**	71,83**	21,87**	80,76**
AB .....		12,29**	9,58**	11,31**	24,21**	29,21**	13,59**
CA .....		1,88**	1,58**	1,47**	1,81**	1,46**	1,71**

Nota: X6 = Densité maximale de l'année N - Densité minimale de l'année N + 1.

TABLEAU n° 13  
Analyse de variance - *Pseudotsuga menziesii*.

	Degré de liberté	X1 Largeur des cernes (en 1/10mm)	X2 Largeur de Bois d'été	X3 % de Bois d'été	X4 Densité Maximale (en gr/dm <sup>3</sup> )	X5 Densité Minimale (en gr/dm <sup>3</sup> )	X6 N - (N + 1)
<u>CARRE MOYEN</u>							
A (arbre) .....	49	2 242,03	303,58	1 185,36	65 303,80	21 851,82	45 529,03
B (position).....	1	62,03	1 333,75	8 070,33	448 036,36	95 046,02	151 281,81
C (année) .....	10	3 741,83	269,02	1 491,62	158 490,11	26 051,59	159 140,45
AB .....	49	735,03	118,25	464,73	29 665,53	12 677,05	18 493,08
CA .....	490	98,39	22,80	91,15	2 004,49	908,73	2 785,51
ERREUR .....	490	42,35	10,15	48,11	1 106,73	552,53	1 443,19
<u>TESTS F</u> (effet arbre aléatoire)							
A .....		52,94**	29,92**	24,64**	59,00**	39,55**	31,55**
B .....		<1 NS	11,29**	17,37**	15,10**	7,50**	8,18**
C .....		38,03**	11,80**	16,36**	79,07**	28,67**	57,13**
AB .....		17,36**	11,65**	9,66**	26,80**	22,94**	12,81**
CA .....		2,32**	2,25**	1,89**	1,81**	1,64**	1,93**

Nota: X6 = Densité maximale de l'année N - Densité minimale de l'année N + 1.

exactement inversée pour l'*Abies grandis*, puisque, pour celui-ci, la seule différence significative est celle qui a trait à la largeur des cernes (différence au seuil de 5 % seulement).

Cette constatation est importante car elle montre qu'il conviendrait, dans chaque cas, de procéder à une analyse préliminaire pour connaître le nombre d'échantillons à prélever par arbre, ce nombre pouvant varier suivant l'essence et suivant la caractéristique que l'on désire étudier; dans le cas particulier, un seul prélèvement aurait pu suffire pour une analyse des caractéristiques physiques d'*Abies grandis* ou de la largeur des accroissements annuels du Douglas, alors qu'un minimum de deux prélèvements opposés s'avère nécessaire pour l'étude de la densité (et des facteurs qui s'y rapportent) chez le Douglas, et dans une moindre mesure, pour des recherches concernant la largeur des cernes d'*Abies grandis*.

Pour déterminer quelles sont les caractéristiques les plus aptes à permettre une différenciation entre années, il suffit de voir celles pour lesquelles le facteur F est le plus élevé; le tableau 14 suivant fournit, pour les deux essences sur lesquelles a porté l'expérience, la hiérarchie des diverses variables rangées suivant un ordre de F décroissant.

TABLEAU n° 14

Extrait de l'analyse de variance pour la différenciation des années chez *Abies grandis* et *Pseudotsuga menziesii*.

DOUGLAS		ABIES GRANDIS	
Caractère	F	Caractère	F
D max. ....	79.07	N — (N + 1) ....	80.76
N — (N + 1) ....	57.13	D max. ....	71.83
Cerne ....	38.03	Cerne ....	39.58
D min. ....	28.67	D min. ....	21.87
% BE ....	16.36	% BE ....	13.51
BE ....	11.80	BE ....	10.65

On peut tout d'abord observer que les rapports F ont, pour une même caractéristique, des valeurs généralement assez voisines pour le Douglas et pour l'*Abies grandis*, ce qui indique que le caractère discriminant des divers critères ne varie guère lorsque l'on passe d'une essence à l'autre.

Mais on voit surtout que les deux premières places sont occupées par deux caractéristiques nouvelles; les valeurs de F pour la meilleure des deux sont, dans chaque cas, environ le double de celles trouvées pour la largeur des cernes, et 5 à 6 fois supérieures à

	Degré de liberté	X1 Largeur des cernes	X2 Largeur de Bois d'été	X3 % de Bois d'été	X4 Densité Maximale	X5 Densité Minimale	X6 N - (N + 1)
<u>CARRE MOYEN</u>							
D (essence) ...	1	106 648,06	23 416,56	214 535,00	16 095 719,00	59 734,00	1 316 094,80
C (année) .....	10	8 665,84	304,74	2 209,70	367 723,60	23 300,10	336 917,00
B (position)...	1	3 102,31	792,00	3 849,00	408 408,00	63 402,00	198 018,00
AD .....	98	2 721,95	311,90	1 501,38	79 708,45	24 188,08	52 799,93
ABD .....	98	913,73	116,37	594,41	38 824,38	16 459,17	22 651,94
ACD .....	980	132,84	20,81	92,57	2 796,54	960,62	3 081,67
DB .....	1	2 148,47	550,80	4 950,68	112 347,21	34 028,12	519 631,00
DC .....	10	1 698,05	164,68	551,71	48 518,88	24 893,99	95 001,78
ERREUR .....	1000	65,66	11,02	55,96	1 539,14	626,76	1 197,52
<u>TESTS F</u>							
D .....		39,18**	75,08**	142,89**	201,93**	2,45NS	249,26**
C .....		131,98**	27,64**	39,47**	238,91**	37,18**	281,35**
B .....		47,25**	71,84**	68,76**	265,34**	101,16**	165,36**
AD .....		41,46**	28,29**	26,82**	51,79**	38,59**	44,09**
ABD .....		13,92**	10,56**	10,62**	25,22**	26,26**	18,92**
ACD .....		2,02**	1,88**	1,65**	1,82**	1,53**	2,57**
DB .....		2,35NS	4,73*	8,33**	2,89	2,07	22,94**
DC .....		12,78**	7,91**	5,96**	17,35**	25,91**	30,83**

X6 = Densité maximale de l'année N — Densité minimale de l'année N + 1.



celles obtenues pour cette autre caractéristique classique qu'est le pourcentage de bois d'été; on peut également constater que même la densité minimale annuelle, qui est la moins bien classée des trois variables nouvelles essayées, arrive encore avant la texture, ou la largeur du bois d'été.

La valeur discriminante des différentes caractéristiques nouvelles étudiées est d'autant mieux établie que l'analyse de variance a été faite dans l'hypothèse la plus pessimiste où l'effet arbre est considéré comme aléatoire (HENRY SCHEFFE, 1963); la valeur des rapports  $F$ , et, par suite, le caractère significatif des différences relevées auraient été beaucoup plus élevés si l'effet arbre avait été supposé fixe.

Les interactions n'appellent pas de commentaires particuliers, et confirment seulement que l'influence de l'orientation ou de l'année n'est pas la même suivant les arbres.

Les deux analyses de variance du Douglas et d'*Abies grandis* ont été regroupées dans une nouvelle analyse d'ensemble, dont les résultats sont consignés sur le tableau 15, et où l'essence est considérée comme une variable supplémentaire  $D$ .

On peut voir que les 3 caractéristiques nouvelles fournissent encore les valeurs de  $F$  les plus élevées pour différencier entre elles, aussi bien les sources de variations (essence, année ou position) que les diverses interactions; la différence entre la densité maximale de l'année  $N$  et la densité minimale de l'année  $N + 1$ , c'est-à-dire le contraste de densité de part et d'autre des limites de cernes, arrive 5 fois en tête de liste et apparaît particulièrement apte à différencier les essences et les années.

On peut déduire de ce qui précède que les critères nouveaux susceptibles d'être facilement chiffrés sur les courbes de variations de densité du bois diffèrent beaucoup plus suivant les années, les essences et les positions que les critères traditionnels dont on devait se contenter jusqu'ici; ceci laisse à penser qu'ils sont davantage qu'eux sous la dépendance des divers facteurs de l'environnement, et que leur étude doit, par suite, être particulièrement utile pour en analyser l'influence.

### 35 — Corrélations avec les facteurs climatiques.

Une étude de corrélation faisant intervenir des facteurs climatiques simples (pluviosité, température moyenne ou durée d'insolexion mensuelles) est à priori une entreprise hasardeuse car les phénomènes naturels ne se plient guère au découpage du calendrier; de plus, le stock d'eau dans le sol, pour ne citer que lui, peut très bien modifier le délai au bout duquel l'arbre réagit à un événement météorologique donné par un changement de structure du bois élaboré.

En outre, des phénomènes de seuils sont susceptibles de se produire, la température estivale par exemple, pouvant exercer une action positive sur une certaine caractéristique lorsque l'approvisionnement en eau est suffisant, et négative dans le cas contraire.

Malgré ces difficultés, et bien que le nombre d'années étudiées soit extrêmement faible, nous avons recherché les facteurs du climat les plus aptes à rendre compte des variations des densités maximales et minimales annuelles; ces deux critères paraissent en effet régis par des données climatiques différentes, si bien que l'écart entre maximum de l'année  $N$  et minimum de l'année  $N + 1$ , pour discriminant qu'il soit, ne semble pas pouvoir être relié aisément à des caractéristiques météorologiques simples.

Pour la densité maximale du Douglas, le facteur le plus important est la pluviosité des mois d'août, septembre et octobre qui, avec 10 degrés de liberté, fournit un coefficient de corrélation très significatif de  $-0,89$ ; elle est suivie par le nombre d'heures d'insolation cumulées de juillet à octobre avec un coefficient de  $+0,79$ , également significatif au seuil de 1 %; la densité maximale de l'*Abies grandis*, au contraire, est avant tout sous la dépendance de cette même insolation estivale et du début de l'automne avec un coefficient toujours très significatif de  $+0,81$ , et la caractéristique pluviométrique la meilleure, qui ne vient qu'au second rang avec un coefficient, significatif au seuil de 1 %, de  $-0,77$ , n'est plus celle des trois mois d'août, septembre et octobre, mais celle des deux premiers seulement.

La densité minimale, pour sa part, semble assez bien liée à la pluviosité de mars, avril et mai chez *Abies grandis*, le coefficient obtenu étant de  $-0,78$ , toujours significatif au seuil de 1 %.

Par contre, la densité minimale du Douglas ne paraît pas dépendre de facteurs climatiques faciles à mettre en évidence, puisque, en corrélation simple, le meilleur coefficient est celui, non significatif, de  $-0,46$ , qui a été trouvé entre elle et les précipitations de décembre à mai inclus.

Les figures n<sup>os</sup> 46 a et b regroupent les graphiques représentatifs des variations des diverses données ayant permis d'aboutir aux coefficients de corrélations les plus élevés.

Il ne faut cependant pas s'illusionner outre mesure sur le caractère universel des liaisons qui apparaissent ainsi entre facteurs climatiques et critères nouveaux tirés des courbes de variations de la densité du bois; nous avons en effet bénéficié, pour cette étude, de certaines circonstances favorables: cernes généralement larges et bien marqués, renseignements météorologiques relativement sûrs à une douzaine de kilomètres de l'Arboretum, absence durant toute la période considérée d'années exceptionnelles qui auraient pu déclencher des phénomènes de seuil auxquels il est fait allusion plus haut, ou d'interventions sylvicoles susceptibles d'entraîner des mo-

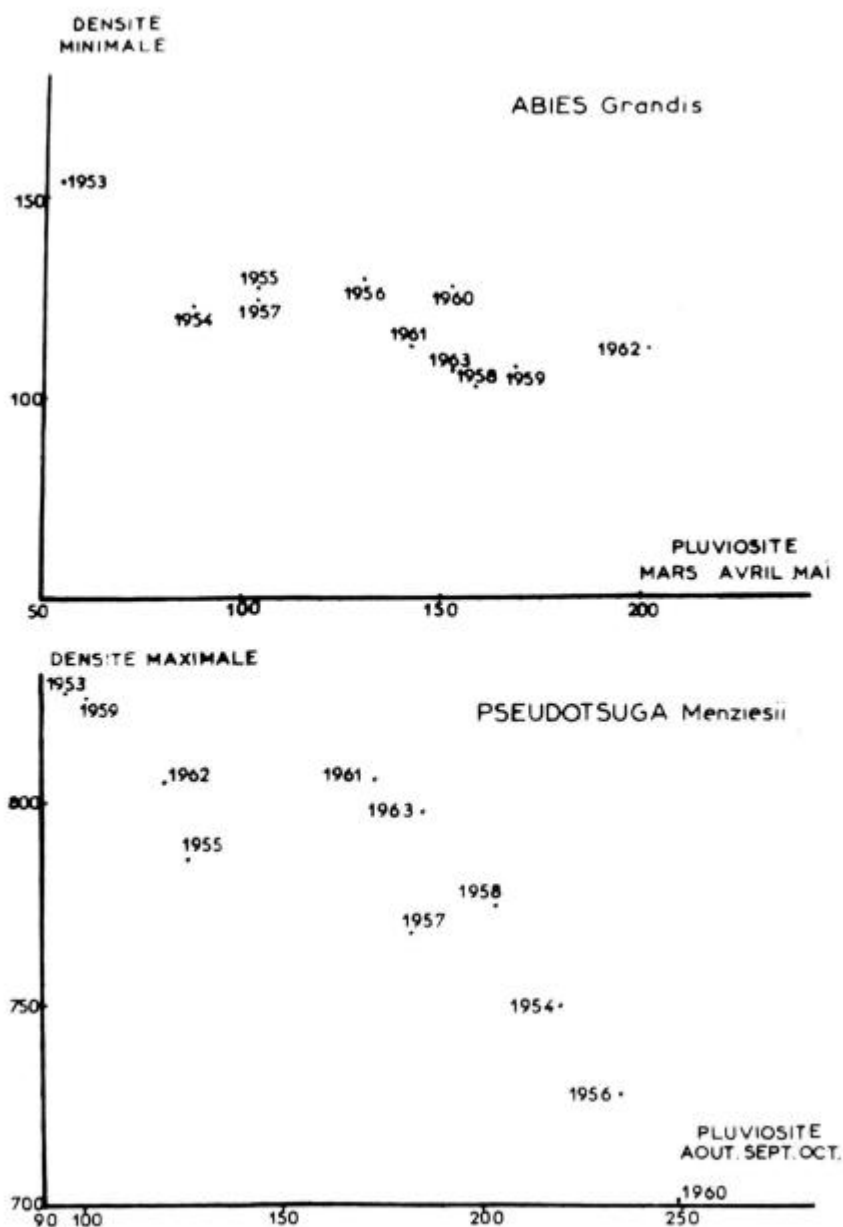


FIG. 46 a.

Etude des corrélations entre facteurs climatiques et caractéristiques relevées sur les courbes de variations de densité.

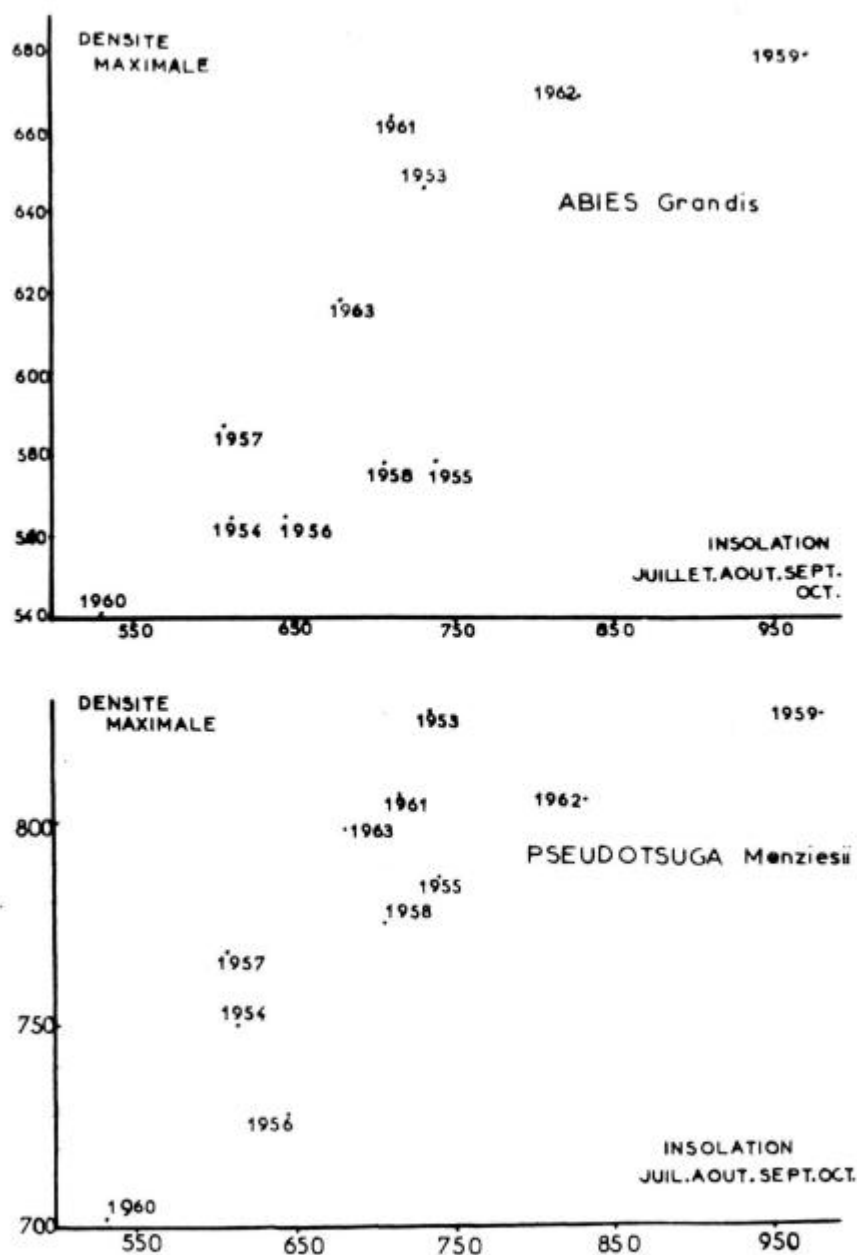


FIG. 46 b.

Etude des corrélations entre facteurs climatiques et caractéristiques relevées sur les courbes de variations de densité.

difications de structure du bois interférant avec celles dues aux seules variations du climat.

Il n'en reste pas moins que les relations étroites mises en évidence à cette occasion peuvent fournir un point de départ utile pour des recherches analogues portant sur un plus grand nombre d'années ou sur des cas rendus plus complexes par les variations concomitantes de plusieurs facteurs de l'environnement.

D'ores et déjà, les différences sensibles relevées entre Douglas et *Abies grandis* sont à retenir en tout état de cause; elles devront notamment être prises en considération pour toute étude visant à comparer le comportement physiologique de ces deux essences, tout particulièrement du point de vue de leurs besoins en eau et en chaleur.

Mais les observations dont il est rendu compte ci-dessus sont susceptibles d'applications encore plus importantes: on sait en effet qu'une véritable science s'est développée depuis quelques décennies pour étudier les possibilités de « dater » un morceau de bois à l'aide d'observations portant uniquement sur une caractéristique de croissance de l'arbre: la largeur des accroissements annuels; c'est la dendrochronologie.

Or, on a vu que les années varient beaucoup plus entre elles par la densité maximale du bois élaboré et par le contraste de densité de part et d'autre des limites de cernes que par la largeur des zones d'accroissement. On doit logiquement en conclure qu'une « xylochronologie » basée sur l'étude de ces critères nouveaux pourrait, sinon se substituer à la dendrochronologie, tout au moins la compléter utilement, en permettant des « datations » plus faciles et plus précises.

---

## CONCLUSION

---

La radiographie d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants et l'exploration densitométrique des images ainsi obtenues ont, à l'origine, été entreprises dans le seul but de fournir une méthode nouvelle et non-destructive d'étude des variations de la densité du bois en vue de recherches à caractère technologique.

Les résultats atteints semblent, de ce point de vue, satisfaisants, puisque ce procédé, à la fois rapide et précis, permet la réalisation, dans des délais relativement courts, d'un grand nombre de courbes sur lesquelles on peut relever aisément de multiples données utiles à l'appréciation de la qualité du bois.

Mais l'analyse densitométrique, initialement cantonnée au domaine de la technologie, a vu son champ d'action s'étendre progressivement, notamment dans celui de la physiologie de l'arbre; elle y a trouvé des applications imprévues, comme l'étude des variations de la teneur en eau à l'intérieur des cernes annuels, ou celle des corrélations entre les caractéristiques des courbes densitométriques et certains facteurs du climat, qui n'avaient pu être entreprises par d'autres méthodes.

Les six têtes de chapitre de la 3<sup>e</sup> Partie de ce travail constituent ainsi autant de directions dans lesquelles des résultats intéressants peuvent être espérés.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- ÅKE WIKSTEN. — Methodik vid Matning av Åsringens Varved och Hostved genom Fargning. Meddel. från Statens Skogsforsöksanstalt 34, p. 476 à 488, mai 1954.
- BARBOTIN P. — La Technique Photographique en Radiographie. Cours conférences 1941-1942, Centre de Perfectionnement Technique.
- BECKER G., BURMESTER A. — Veränderung von Holzeigenschaften durch  $\gamma$ -Strahlung. Materialprüf 4, 1962, n° 11, 20 novembre.
- BELFORD D.S. — X-ray spectographic analysis. A new technique in wood preservation research. B.W.P.A. Annual Convention, 1961.
- BELL G.E. — The photographic action of X-rays. British journal of radiology, IX, septembre 1936.
- BERTHOLD, GLOCKER. — Ann. d. Phys. 76, p. 409, 1925.
- BOUVAREL P., LEMOINE L. — L'examen des graines forestières aux rayons X. Revue Forestière Française, nos 8-9, 1959, p. 618 à 624.
- BRAATHE P., ØKSTAD T. — Omsetning av trevirke basert på veiing og torrstoffbestemmelser, Meddeleiser fra det norske skogforsøksvesen n° 72, bind XX, Hefte 1, Vollebekk 1964.
- BREUIL P. — Appareils nouveaux pour l'essai des bois et spécialement des bois pour l'aéronautique. Extrait du Génie Civil des 13 et 20 mai 1922.
- BÜSGEN M. — Zur Bestimmung der Holzärte. Z.f.F. und Jgdw., H 9, 39/1904.
- CAMERON G.F., BERRY P.F., PHILLIPS E.W.J. — Holzforschung 13, 78, 1959.
- CANTIN M. — The machining properties of 16 eastern canadian woods. Department of Forestry Publication n° 1111, 1965.
- CLARK W. — Standard development. Photographic J., 1925, 49, p. 76-89.
- CLARK G.L. — Medical, biological and industrial applications of monochromatic radiography and microradiography. Radiology, 49, 483, 1947.
- CLARK G.L. — Les rayons X et leurs applications, p. 296-297, 1961.
- CLARKE S.H. — On estimating the mechanical strength of the wood ash. Forestry 7, 1933, p. 26-31.
- COMSTOCK G.L. — Longitudinal permeability of green eastern hemlock. Forest Products Journal, octobre 1965, vol. XV, n° 10, p. 441-449.
- DAY et TAYLOR. — J. Research Nat. Bur. Standard, 40, 393, 1950.
- DESTRIAU G. — Physique appliquée des installations à rayons X. Production et dosimétrie, p. 65, 1945.
- DINWOODIE J.M. — Variation in tracheid length in *Picea sitchensis* Carr., Forest Products Research, Special Report n° 16, septembre 1963.
- ECHOLS R.M. — Variation in tracheid length and wood density in geographic races of scotch pine. Bull. Yale. Sch. For., n° 64, 1958, p. 52.
- EDLIN H.L. — Summerwood - Springwood ratio in conifers - How it arises varies and affects end use for timber, board, and paper. Forestry, vol. XXXVIII, n° 1, p. 91-112, 1965.

- FKLUND. — Skogsforsningsinstitutets arrangs mättningsmaskiner. Derastill-komst, konstruktion och användning. Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut, tome 38, 1950, fascicule 5, 77 p.
- ETHINGTON R.L. — Structural property estimation from density samples for western woods. *Forest Products Journal*, octobre 1965, vol. XV, n° 10, p. 422-425.
- FISCHER R.C. et TASKER H.S. — The detection of wood boring insects by means of X-rays. *Ann. Appl. Biology*, 1940, 27, n° 1, p. 92-100.
- FRY G. et CHALK L. — Variation of density in the wood of *Pinus patula* grown in Kenya. *Forestry* n° 30, vol. XXX, p. 29-45, 1957.
- GREEN H.V. et WORRALL J. — Wood quality studies. I - a Scanning micro-photometer for automatically measuring and recording certain wood characteristics. *Tappi*, vol. 47, n° 7, juillet 1964, p. 419-427.
- HILDEBRANDT G. — The effect of growth conditions on the structure and properties of wood. *Proceedings Fifth World Forestry Congress*, vol. 3, août-septembre 1960, p. 1348-1353.
- JACQUIOT C. — L'utilisation des rayons X dans les recherches et les essais sur les insectes xylophages. *Corrosion et anticorrosion*, vol. 9, n° 3, p. 74-79, mars 1961.
- KAUMAN W.G. — Correspondance particulière non publiée, 19 janvier 1966.
- KAYE G.W.C. et BINGS W. — The emission and transmission of X and gamma radiation. *British Journal of Radiology*, T. XIII, juin 1940, p. 193-212.
- KELSEY K.E. — *For. Prod. J.*: 6: 441, 1956.
- KELLWERTH R. — Ein Beitrag zur qualitativen Zuwaghanalyse Holz - Roh u. Werkstoff. Vol. 12, n° 3, p. 77-83, 1954.
- KLEM. — *Med. Norske Skogforsoksvesen* 31 (9), p. 127, 1945.
- KNIGGE W. et KOLTZENBURG C. — Bestimmung der Frühholz - Spätholz-grenze in Nadelholzjährringen mit Hilfe eines Teilchengrößen - Analysators. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd 22, 1964, p. 249-245.
- KOCH P. — Maximizing wood failure. *Forest Products Journal*, vol. XV, n° 9, septembre 1965, p. 355-362.
- LAKATOS B.K. — Application of radioactive isotopes in controlling the quality of wood. *Wood Processing Industry*, 1956, n° 10.
- LEGRAND C. — Sur quelques applications des rayons X à l'étude des bois et leurs dérivés. *Congrès International pour l'Exploitation et l'Utilisation rationnelles du bois*, 1946, p. 29-31.
- LENZ O. — L'utilisation de la radiographie pour l'examen des couches d'accroissement. *Mitteilungen*, vol. 33, fasc. 5, 1957.
- MARIAN J.E. et STUMBO D.A. — A new method of growth ring analysis and the determination of density by surface texture measurements. *Forest Science*, vol. 6, n° 3, 1960, p. 276-291.
- MAYER WEGELIN H. — Der Härtetaster. *Allgemeine Forst. und Jagdzeitung* 122, Jg n° 1, 1950.
- MITCHELL et WHEELER. — Wood quality of Mississippi's Pine resources. U.S. Forest Service, février 1959, report n° 2143.
- MORK E. — Die Qualität des Fichtenholzes unter besonderer Rücksichtnahme auf Scheif- und Papierholz. *Papierfabrikant*, 1928, 26, n° 48, p. 741-747.
- MÜLLER-OLSEN C. et SIMAK M. — X-ray photography employed in germination analysis of Scots Pine (*Pinus silvestris* L.). *Medd fr. Statskogsforskn. inst.*, bd 44, n° 6, 1954.
- MÜLLER-STOLL W. — Photometrische Holzstruckuruntersuchungen. *Planta*, 35 (3/4), 1947, p. 397-426.
- NEWLIN J.A. et WILSON T.R.C. — *Bull. U.S. Depart. Agric.*, n° 676, 1919.



- NICHOLLS J.W.P. et DADSWELL H.E. — Tracheid length in *Pinus radiata* D. Don. Division of Forest Products, Technological Paper n° 24, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, 1962.
- NYLINDER P. et HAGGLUND E. — Effect of site and tree properties on yield and quality of Norway spruce sulphite pulp. Medd. Skogsforskn. Inst. Stockh. 44 (11), 1954, p. 184.
- PAUL B.H. et MARTS R.O. — Controlling the proportion of summerwood in Longleaf pine. Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. Report n° 1988, juin 1954.
- PAUL B.H. — The application of silviculture in controlling the specific gravity in wood. Technical Bulletin n° 1288, juillet 1963, U.S. Department of Agriculture.
- PHILLIPS E.W.J. — The beta ray method of determining the density of wood and the proportion of summer wood. Journal of the Institute of Wood Science, n° 5/8, 1960.
- PHILLIPS E.W.J., ADAMS E.H. et HEARMON R.F.S. — The measurement of density variation within the growth rings in thin sections of wood using beta particles. Journal of the Institute of Wood Science, n° 10, novembre 1962, p. 11-29.
- POLGE H. — Recherches sur l'utilisation de prélèvements effectués à la tarière de Pressler pour l'étude des propriétés physiques et mécaniques des bois. Revue Forestière Française, octobre 1962.
- POLGE H. (a). — Contribution à l'étude de la qualité du bois des principales essences résineuses exotiques utilisées dans les reboisements français. Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences, tome XX, fascicule 3, 1963.
- POLGE H. (b). — Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois: l'analyse densitométrique de clichés radiographiques. Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences, tome XX, fascicule 4, 1963.
- POLGE H. (a). — Le bois juvénile des conifères. Revue Forestière Française, n° 6, juin 1964.
- POLGE H. (b). — Délimitation de l'aubier et du bois de cœur par analyse densitométrique de clichés radiographiques. Annales des Sciences forestières, tome XXI, fascicule 4, 1964.
- ROGERS T.H. — High-intensity radiation from beryllium window X-ray tubes. 32<sup>e</sup> annual meeting of the radiological Society of North America, Chicago III, décembre 1946.
- RULEBOOK. — 14. West Coast Lumbermen's Association.
- SANDERMANN W., SCWEERS W. et HOHEISEL H. — Über Dichteuntersuchungen an Holz und Holzwerkstoffen mit  $\beta$ -Strahlen. Sonderdruck aus *Paperi ja puu* n° 12, 1963, p. 1-6.
- SCHEFFE H. — The analysis of variance. Wiley, XXI, 477 p., 1963.
- SMITH D.M. — Effect of growth zone on specific gravity and percentage of summerwood in wide ringed Douglas fir. Forest Products Laboratory, Forest Service U.S. Department of Agriculture, report n° 2057, juin 1956.
- SNEDECOR G.W. — Statistical methods. 1956, 5<sup>e</sup> édition, Iowa State College, Press XIII + 534 p.
- SPOULL W.T. — X-rays in practice. Mac graw Hill Book Company Inc. 1946, p. 39.
- STAMM A.J. — Density of wood substance, adsorption by wood, and permeability of wood. Jour. of Physical Chem., vol. 33, p. 398-414, 1929.
- STANKO BADUN. — Primjena radiaktivnih izotopa u tehnologiji ji drva. Drvena industrija, 10 (5/6), p. 86-93, 1959.
- TELLEZ-PLASENCIA. — Manuel de photographie scientifique, 1956.

- TOMASSONE R. — L'analyse de régression progressive. Note interne C.N.R.F. 1965.
- VENET J. — Etude de la résistance mécanique des bois de mine en fonction des facteurs de la production forestière, thèse, Université de Nancy, 25 juillet 1957.
- VESSEREAU A. — Recherches et expérimentation en Agriculture. Tome II: Méthodes statistiques en Biologie et en Agronomie, 1960.
- VICTOREEN. — Medical Physics. Vol. II, p. 891, 1950, Chicago.
- VON PECHMANN H. — Untersuchungen über Gebirgsfichtenholz. Forstwissenschaft. Centralblatt 73 Jg, 1954.
- VON WEDEL K. — Hydrostatische Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte von Holzproben. Holz als « Roh- und Werkstoff », Bd 20, 1962, p. 360-364.
- WANGAARD P.F. — Research on quality of wood in relation to its utilization as fibre for papermaking. Norsk. Skogind. 12 (8), 1958, p. 286-295.
- WATSON A.J. et DADSWELL H.E. — Influence of fibre morphology on paper properties, part II: Early wood and late wood. A.T.I.P. 35 817, mai 1962.
- WELLWOOD W. et WILSON J.W. — The growth increment as a guide to properties in coniferous woods. (Presented at Meeting of I.U.F.R.O., Section 41, octobre 1965).
- WILSEY R.B. — The photographic photometry of roentgen rays. American journal of roentnology radium therapy and nuclear medicine (XXXII, 1934).
- WORSCHITZ F. — L'utilisation des rayons X en vue de l'étude de la qualité des bois. Congrès de Nancy de l'Union Internationale des Instituts de Recherches Forestières. 1932, p. 459 à 489.
- YOUNG H.E., STRAND L. et ALTENBERGER R. — Preliminary fresh and dry weight tables for seven tree species in Maine. Technical Bulletin 12, novembre 1964, Maine Agricultural Experiment Station.
- ZAHNER R., LOTAN J.E. et BAUGHMAN W.D. — Earlywood-latewood features of Red Pine grown under simulated drought and irrigation. Forest Science, vol. 10, n° 3, sept. 1964.
-

## RESUME

---

La densité du bois, qui est en elle-même un critère de qualité essentiel, est, de plus, liée par des corrélations étroites à beaucoup d'autres caractéristiques technologiques; ainsi s'expliquent les nombreuses recherches consacrées, non seulement à la densité globale, mais aussi à la texture et aux variations de la densité.

Dans la méthode décrite, on cherche à obtenir une représentation graphique de ces variations, en radiographiant directement des échantillons bruts prélevés à la tarière de Pressler sur des arbres vivants, et en explorant leur image à l'aide d'un microdensitomètre enregistreur.

Après quelques rappels concernant les rayons X et les multiples applications qui en ont déjà été faites en matière de recherches forestières, sont exposés les principes fondamentaux du procédé utilisé: dans une carotte de sondage, l'épaisseur est constante le long d'un plan diamétral et, par suite, l'absorption des rayons X se fait suivant une loi exponentielle en fonction de la seule densité du bois; or la densité optique de la radiographie (logarithme décimal de l'opacité) est, dans certaines conditions, à peu près proportionnelle au logarithme de la dose de rayonnement reçue, d'où une relation linéaire possible entre elle et la densité du bois.

L'utilisation de l'effet photographique des rayons X a été retenue de préférence aux méthodes directes d'enregistrement des variations de la dose de rayonnement (compteur Geiger-Müller, compteur proportionnel ou compteur à scintillation) car elle permet des vitesses d'exploration plus élevées et rend plus facile la solution des problèmes posés par les échantillons non rectilignes et non perpendiculaires au fil du bois, ou par la présence de défauts ou d'anomalies internes indécélables au terme d'un simple examen superficiel. De plus, ces procédés directs, déjà employés pour l'étude des variations de la densité du bois par absorptiométrie  $\beta$ , n'atteignent un pouvoir de résolution suffisant qu'à condition d'utiliser des coupes microscopiques, ce qui est incompatible avec la simplicité recherchée.

L'étude théorique de la méthode nécessite la connaissance, d'une part, des phénomènes généraux de l'absorption des rayons X, et notamment de ses variations en fonction du poids atomique des éléments constitutifs du matériau irradié et de la longueur d'onde du rayonnement incident, d'autre part, celle des effets photographiques des rayons X qui, par certains aspects, s'apparentent, mais par

d'autres, diffèrent notablement, de ceux de la lumière sur les couches photosensibles. A ce titre, sont passées en revue les caractéristiques des diverses courbes de noircissement, les anomalies de ce même noircissement, l'équivalence entre dose et temps d'exposition, et enfin l'influence de la qualité du rayonnement sur l'effet photographique obtenu.

Au point de vue pratique, les principaux problèmes à résoudre sont ceux du contraste, de l'uniformité du fond des radiographies et de la linéarité.

Celui du contraste est facilement soluble, puisqu'il est notamment possible d'augmenter à volonté la différence entre les doses transmises pour une même différence de densité du bois, en abaissant convenablement la tension accélératrice et en augmentant corrélativement l'intensité d'émission.

Le problème de l'uniformité du fond des radiographies comporte deux aspects : uniformité de la dose reçue sur toute la surface du film et uniformité du noircissement pour une même dose reçue ; celui-ci est un problème purement photographique qui trouve sa solution dans des techniques appropriées de développement, et notamment dans une agitation manuelle continue du révélateur ; le premier, par contre, nécessite une étude approfondie : l'intensité d'émission n'est, en effet, pas uniforme dans toutes les directions, et, de plus, l'axe d'intensité maximale n'est pas perpendiculaire à l'axe du tube, d'où l'intérêt qu'il y a à incliner celui-ci par rapport au plan d'irradiation. En outre, la dose reçue en différents points d'un même film varie comme le cube de la distance qui les sépare de la source ; il est par suite important, de ce seul point de vue, d'adopter une grande distance d'exposition.

Le problème de la linéarité peut être théoriquement résolu de plusieurs façons (emploi d'écrans renforceurs, utilisation de forts noircissements pour lesquels il y a à peu près proportionnalité entre la densité optique et le logarithme de la dose reçue), mais, dans beaucoup d'applications, il n'est pas nécessaire d'arriver à une linéarité parfaite ; lorsque celle-ci est requise, le meilleur moyen de l'obtenir consiste à utiliser un rayonnement assez dur et convenablement filtré, pour avoir un coefficient d'absorption peu élevé (auquel cas la fonction exponentielle ne diffère guère d'une fonction linéaire), et à travailler dans une zone de faible opacité, ce qui permet d'avoir une proportionnalité rigoureuse entre la densité optique et la dose reçue.

Au point de vue conditions pratiques de réalisation, sont étudiés les effets perturbateurs possibles de l'enveloppe des films, de l'anisotropie du bois et de sa teneur en eau, qui ne soulèvent pas de problèmes difficiles ; il en est autrement de l'incidence des flous de diverses origines (défauts de ponctualité de la source, épaisseur du film et excentricité des échantillons) dont le dernier est de beaucoup le plus important, et qui, tous trois, sont d'autant plus faibles

que le film est plus éloigné de la source; c'est là une raison supplémentaire pour adopter la grande distance d'exposition de 2,50 m qui a été choisie pour le travail de routine; une autre possibilité de flou existe lorsque les prélèvements ne sont pas perpendiculaires au fil du bois, mais on peut l'éviter en inclinant les échantillons sur le film pendant la radiographie.

Le choix de l'appareil émetteur est important: en raison de la faible densité du bois, il faut que la paroi du tube soit aussi transparente que possible pour les rayonnements de grande longueur d'onde, d'où l'intérêt considérable d'une fenêtre en béryllium; par ailleurs, pour éviter une dégradation de la source due aux longues expositions, elles-mêmes liées à la distance d'irradiation retenue, il est nécessaire de prévoir un refroidissement énergétique par circulation d'eau; transparence élevée de la fenêtre et refroidissement du tube sont encore plus indispensables lorsqu'on désire radiographier des échantillons d'épaisseur inférieure au diamètre des carottes de sondage, puisque, toutes choses égales par ailleurs, la durée de l'exposition est paradoxalement d'autant plus grande que l'épaisseur traversée est plus faible.

Quant à l'appareil d'enregistrement de la densité optique, il doit être du type microdensitomètre, pour pouvoir procéder à l'exploration des images radiographiques en suivant rigoureusement leur axe, condition indispensable pour que l'épaisseur traversée par le rayonnement soit absolument constante.

La méthode proposée est doublement non destructive, pour l'arbre étudié et pour l'échantillon radiographié; elle est également rapide (le temps de travail effectif total ne dépasse pas 2 minutes pour une carotte de sondage de 10 cm de longueur); sa reproductibilité est tout à fait satisfaisante et son pouvoir de résolution élevé, puisqu'il est possible d'obtenir, sur les courbes densitométriques, le profil d'éléments aussi fins que des canaux résinifères d'Epicéa de 50 microns de diamètre. Elle permet de déterminer sans aucune difficulté les valeurs de la densité moyenne, de la densité instantanée et du pourcentage de bois d'été en radiographiant, en même temps que les échantillons à étudier, deux étalons de poids superficiel connu (étalons de bois, ou mieux, étalons de cellophane), et en graduant directement, par simple extrapolation, les graphiques d'enregistrement obtenus en densités du bois.

Dans la dernière partie sont donnés divers exemples d'utilisation des courbes de variations de la densité: appréciation de la qualité du bois, recherche sur certains bois anormaux (bois de compression ou bois juvénile), étude du retrait, du collapse et surtout du reconditionnement (qui se traduit par des modifications de densité superficielle aisément observables sur les courbes de variations de la densité), comparaisons entre caractéristiques des profils densitométriques pour des provenances différentes d'une même essence.

La méthode par exploration densitométrique de clichés radiographiques permet de localiser à l'intérieur du bois certaines substances extractibles comme la résine ; il est également possible d'étudier, grâce à elle, la répartition de l'eau dans un arbre vivant, base d'une nouvelle méthode de délimitation de l'aubier et du bois de cœur ; on a pu montrer, à cette occasion, que la teneur en eau varie considérablement le long d'un même accroissement annuel, et mettre en évidence des zones sèches au début du bois de printemps et à la fin du bois d'été, et même des raies très fines à faible teneur en eau à l'intérieur de portions de cernes à humidité élevée.

Enfin, deux applications particulières des courbes de variations de densité font l'objet de développements plus importants :

Dans la première, il est montré, à l'aide de l'analyse statistique, que le pourcentage de bois de densité supérieure à 600, qu'on ne peut évaluer que sur de telles courbes, rend mieux compte de la résistance mécanique d'*Abies grandis*, que le traditionnel pourcentage de bois d'été, dont la limite correspond, au cas particulier, à une densité de 550.

Dans la seconde, on a pu établir, d'une part, que la forme des profils densitométriques est caractéristique de l'année de production des cernes, d'autre part, que certains critères nouveaux (densité maximale annuelle, densité minimale annuelle, contraste de densité de part et d'autre des limites de cernes), qu'on ne pouvait obtenir jusqu'ici par d'autres méthodes, permettent de distinguer plus facilement entre elles les essences, les années et les positions (orientation du bois à l'intérieur de l'arbre), que les critères anciens, largeur de cernes et pourcentage de bois d'été notamment. Ces caractéristiques nouvelles paraissent, plus que les autres, sous la dépendance directe des facteurs de l'environnement et, en particulier, des facteurs du climat, avec lesquels des corrélations très significatives ont pu être mises en évidence. Les courbes de variations de densité peuvent ainsi servir de base à une xylochronologie, c'est-à-dire à une méthode de datation du bois susceptible de compléter et de rendre plus facile ou plus sûre la dendrochronologie qui ne repose que sur les caractéristiques de croissance des arbres.

## SUMMARY

---

Wood density, which is already an essential criterion of quality, is also in close relationship with many other technological characteristics; this is the reason why research deals very often not only with bulk density, but also with latewood percentage and density variations.

The objective of the described method is to represent the variations graphically, by means of direct radiographs of undressed samples taken with a Pressler auger on living trees, and of investigations of the negatives with a recording microdensitometer.

First we briefly make a survey of X-rays and of their numerous applications in forest research. Then we comment the main principles of the procedure: in an increment core the thickness is constant along a diametral plane and thus X-rays are absorbed according to an exponential law, what depends only on wood density; now optical density of the radiograph (decimal logarithm of opacity) is, under definite conditions, almost proportional to the logarithm of the X-ray intensity received; therefore a linear relation may exist between optical density and wood density.

The use of photographic effect of X-rays has been given the preference over direct methods of recording the variations of rays intensity (Geiger-Müller counter, proportional counter, scintillation counter) for it allows higher speeds of scanning, and makes easier the solution of problems due to samples which are not rectilinear or not perpendicular to the grain, or due to defects or to internal anomalies which a mere superficial observation cannot reveal. Besides these direct procedures, already used to study the variations of wood density by  $\beta$ -absorptiometry, are not enough resolute, unless microtome sections are used, and this would be incompatible with the aimed simplicity.

For the theoretical study of the method, it is necessary on one hand to have a general knowledge of the absorption of X-rays, especially of its variations in function of atomic weight of the elements of irradiated material, and of wave-length of incident ray, on the other hand it is necessary to know the photographic effects



of X-rays which, for some reasons, are much like, but for other reasons most unlike the effects of light on photosensitive emulsions. In this regard we examine the characteristics of different blackening curves, the anomalies of blackening, the equivalence between intensity and time of exposure, and finally the influence of rays quality upon photographic effect.

From practical point of view the main difficulties to overcome concern contrast, uniformity of background of radiographs, and linearity.

The problem of contrast is easy to remove, since it is in particular possible to increase at will the difference between transmitted intensity for the same difference of wood density, if accelerative tension is properly reduced and emission intensity correlatively increased.

The problem of uniformity of radiographs background is double: uniformity of the intensity transmitted to the whole film surface, and uniformity of the blackening for the same transmitted intensity. This one is a pure photographic problem which can be solved through appropriate methods of development, and particularly through the continuous hand-agitation of the developer. But the former problem requires a detailed study: emission intensity is not uniform in each direction, and, besides, the axis of maximal intensity is not perpendicular to the axis of the tube, therefore there is an advantage of inclining it to the irradiation plane. Besides the quantity received in different places of a film varies as the cube of the distance to the source; it is therefore important, only from that point of view, to choose a long exposure distance.

Theoretically there are several ways of solving the problem of linearity (use of intensifying screens, and of high blackenings for which optical density and the logarithm of received intensity are almost proportional), but in many applications it is not necessary to obtain a perfect linearity; if necessary, the best a way to reach it is to use hard-rays and properly filtered, in order to have a low absorption coefficient (in which case the exponential function does not differ much from a linear function), and to work in a zone of low opacity, what allows to obtain a strict proportionality between optical density and received intensity.

As concerns the practical conditions of carrying out, we examine the possible disturbing effects of the film cover, of anisotropy of wood and of its water content, which do not raise difficult problems. It is quite different as to the influence of blurring which has diverse causes (defects in the punctuality of the source, thickness of the film and excentricity of samples) — the last one is by far the most important, and the greater the distance between the film and the source, the weaker the blurring. That is a reason more to adopt the great exposure distance of 2,50 m which has been chosen



for routine work. Blurring may also occur if cores are not perpendicular to the grain, but this can be evaded if samples are inclined to the film during the exposure.

The choice of emitting apparatus is important: owing to the low density of wood, the tube wall has to be as transparent as possible to the long wave radiations, and it is therefore most profitable to have a beryllium window. Besides, to avoid a degradation of the source due to long exposures, which depend on the chosen irradiation distance, it is necessary to provide for an efficient cooling through circulation of water. High transparency of the window and cooling of the tube are still more essential when the thickness of radiographed samples is smaller than the diameter of increment cores, since, all things being equal, the exposure is paradoxically the greater as the scanned thickness decreases.

The recording apparatus of optical density must be of the microdensitometer type, in order to be able to scan the radiographs along their axis, what is a necessary condition when the penetrated thickness must be strictly constant.

The proposed method is twice nondestructive, with regard to the examined tree and to the radiographed sample; it is also fast (the total active operating time does not exceed 2 minutes for a 10 cm long increment core). Its reproductibility is quite satisfactory and it has a high resolution power, since it is possible to obtain, on the densitometric curves, the cross-section of elements as thin as resin-canals of Spruce, with a diameter of 50 microns. It enables to determine very easily the values of average density, of instantaneous density, and of summerwood percentage if, at the same time as the samples to be examined two gauging samples of known superficial weight are radiographed (wood gauging samples, or better, of cellophane), and if through extrapolation we make a direct graduation of the records obtained for wood density.

In the last part are described as examples several applications of the curves of density variation: estimation of wood quality, research on some abnormal kinds of wood (compression wood, juvenile wood), study of shrinkage, of collapse, and above all of reconditionning (which results in changes of superficial weight, easily noticeable from the curves of density variation), comparisons between the characteristics of densitometric profiles for different provenances of a single species.

The method of densitometric scanning of radiographs allows to locate inside the wood certain extractable substances, as resin. It is also possible by that mean to study the distribution of water in a living tree, which is the basis of a new method of determining the limit of sapwood and heartwood. On that occasion it could be shown that the water content varies considerably along one growth ring, and stated that dry areas appear at the beginning of spring-

wood and in late summerwood, and even very thin stripes with small water content within some sections of rings with high moisture content.

Finally two special applications of curves of density variation are more substantially handled:

First we show that, by means of statistical analysis, the proportion of wood of density above 600 — which can be calculated only from these curves — is a more valuable criterion for mechanical strength of *Abies grandis* than the usual percentage of summerwood, the limit of which corresponds, in the particular case, to a density of 550.

In the second application, it could be established on the one hand that the outline of densitometric profiles is characteristic for the year of production of each increment, on the other hand, that some new criteria (maximum annual density, minimum annual density, contrast of density on both sides of the limit of rings) which could not be as yet provided by other methods — allow an easier distinction of species, years and position (direction of wood within the tree), than the former criteria, width of rings and percentage of summerwood in particular.

These new characteristics seem to be, more than the others, directly related to the environmental factors, and particularly to the climatic factors, for which very significant correlations have been established. The curves of density variation can thus serve as the basis of « xylochronology », i.e. of a method of dating wood, capable of complementing and making easier or more reliable dendrochronology, which is based only on the growth characteristics of trees.

---

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Die Dichte des Holzes stellt für sich allein bereits ein wesentliches Kriterium der Holzqualität dar; es bestehen aber des weiteren enge Korrelationen mit vielen anderen technologischen Eigenschaften. Daraus erklären sich auch die zahlreichen Forschungsarbeiten die sich nicht nur mit der Gesamtdichte sondern auch mit der Textur und den Variationen der Dichte beschäftigen.

Mit Hilfe der beschriebenen Methode versucht man eine graphische Darstellung dieser Variationen zu erzielen, indem man von mit dem Pressler'schen Zuwachsbohrer an stehenden Bäumen entnommenen unbehandelten Holzproben Röntgenaufnahmen anfertigt und diese Aufnahmen mit einem registrierenden Mikrodensitometer abtastet.

Nach einer kurzen wiederholenden Aufzählung der bereits bekannten vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Röntgenstrahlen in der forstlichen Forschung, werden die wesentlichen Grundlagen der verwendeten Methode dargestellt.

Die Dicke eines Bohrspanes ist entlang einer diametralen Ebene konstant; die Absorption der Röntgenstrahlen erfolgt daher nach einer Exponentialfunktion und hängt ausschliesslich von der Holzdichte ab. Desweiteren ist unter bestimmten Bedingungen die optische Dichte der Röntgenaufnahme (Logarithmus der Opazität) annähernd proportional dem Logarithmus der empfangenen Strahlungsmenge. Daraus folgt eine lineare Beziehung zwischen der Strahlungsmenge und der Holzdichte.

Die Anwendung der photographischen Wirkung der Röntgenstrahlen wurde einer direkten Registrierung der Strahlungsmenge (Geiger - Müller Zählrohr, Proportionalitätszähler oder Szintillationszähler) vorgezogen, da sie eine raschere Auswertung ermöglicht und Fehler und Anomalien im Bohrspan erkennen lässt, welche bei einer einfachen, oberflächlichen Untersuchung nicht entdeckt werden können. Ausserdem erlaubt diese Methode eine Korrektur bei Bohrspänen die nicht geradlinig oder nicht normal zur Faserrichtung sind.

Direkte Strahlungsmessmethoden, die bereits zur Untersuchung der Dichtevariationen durch Betastrahlenabsorption verwendet wurden, erreichen nur dann ein genügendes Auflösungsvermögen, wenn mikroskopische Schnitte verwendet werden. Dies erscheint jedoch mit der angestrebten Einfachheit der Methode nicht vereinbar.

Das theoretische Studium der Methode verlangt einerseits entsprechende Kenntnisse der allgemeinen Phänomene der Röntgenstrahlenabsorption, vor allem der Variationen der Absorption in Abhängigkeit des Atomgewichtes der den bestrahlten Körper bildenden Elemente, sowie der Wellenlänge der einfallenden Strahlung; anderseits muss man die photographische Wirkung der Röntgenstrahlen kennen, die zum Teil jener des Lichtes auf einer photosensiblen Schichte entspricht, in gewissen Punkten jedoch merklich davon abweichen kann. Aus diesem Grunde werden die verschiedenen Schwärzungskurven, die Anomalien der Schwärzung, die Äquivalenz zwischen Strahlungsmenge und Bestrahlungszeit und der Einfluss der Strahlungsqualität auf die erzielte photographische Wirkung, näher besprochen.

Für die praktische Anwendung müssen folgende grundlegende Probleme einer Lösung zugeführt werden: Kontrast, Gleichförmigkeit der Schwärzung des Grundes der Röntgenaufnahme, Linearität.

Das Kontrastproblem ist leicht zu lösen, da es möglich ist die Differenz zwischen den Emissionsmengen nach Wunsch zu erhöhen — bei gleichbleibenden Dichteunterschied des Holzes — indem man in angemessener Weise die Beschleunigungsspannung heruntersetzt und die Emissionsintensität entsprechend erhöht. Bei der Gleichförmigkeit der Schwärzung der Röntgenaufnahme ergeben sich zwei Gesichtspunkte: die gleichmässige Verteilung der Strahlungsmenge auf die gesamte Filmfläche und die Einheitlichkeit der Schwärzung bei gleicher Strahlungsmenge. Dieser zweite Punkt ist ein rein photographisches Problem und kann durch ein geeignetes Entwicklungsverfahren und vor allem durch ständige manuelle Agitation des Entwicklers einer Lösung zugeführt werden, während der erste Punkt eines eingehenden Studiums bedarf. Tatsächlich ist die Emissionsintensität nicht auf alle Richtungen gleichmässig verteilt und weiters ist auch die Achse der Maximalintensität nicht normal zur Achse der Strahlungsquelle; es ist daher angezeigt die Achse der Strahlungsquelle gegen die Bestrahlungsebene zu neigen. Überdies variiert die Strahlungsmenge die auf verschiedenen Punkten des Filmes auftrifft mit dem Kubus des Abstandes von der Strahlungsquelle; es erscheint aus diesem Grunde wesentlich einen grossen Aufnahmeabstand zu wählen.

Das Problem der Linearität kann theoretisch auf verschiedene Art gelöst werden (Verwendung von Verstärkerschirmen, Erzielung einer starken Schwärzung für welche nahezu Proportionalität zwischen optischer Dichte und dem Logarithmus der empfangenen Strahlungsmenge besteht). Bei vielen Anwendungsgebieten ist es jedoch nicht notwendig eine vollkommene Linearität zu erzielen; falls dies jedoch notwendig erscheint, erweist sich die Verwendung von verhältnismässig « harten » und entsprechend gefilterten Röntgenstrahlen als besonders günstig um einen niederen Absorptions-

koeffizienten zu erzielen (— in diesem Fall unterscheidet sich die Exponentialfunktion nur wenig von einer linearen Funktion —) und weiters in einer Zone geringer Opazität zu arbeiten, welche eine strenge Proportionalität zwischen optischer Dichte und empfangener Strahlungsmenge ergibt.

Bezüglich der praktischen Durchführung der Aufnahmen, werden eine Anzahl von möglichen Störungsquellen besprochen, wie zum Beispiel die Lichtschutzhülle des Filmes, die Anisotropie des Holzes und der Wassergehalt des Holzes, die jedoch keine besonderen Schwierigkeiten bereiten. Anders verhält es sich jedoch mit den verschiedenen Ursachen der Unschärfe z.B. Fehler der Punktualität der Strahlungsquelle, Filmdicke und Exzentrizität der Holzprobe, wobei letzterer die grösste Bedeutung zukommt. In allen drei Fällen nimmt die Unschärfe jedoch mit wachsender Aufnahmeentfernung ab; es ergibt sich somit ein weiterer Grund für Routinearbeiten eine grosse Aufnahmeentfernung von 2,5 m zu wählen. Eine zusätzliche Ursache der Unschärfe stellen die nicht normal zur Faserrichtung entnommenen Bohrspäne dar; eine entsprechende Neigung der Bohrspäne auf dem Röntgenfilm während der Aufnahme erlaubt jedoch diese Unschärfe zu verhindern.

Die Wahl eines entsprechenden Röntgenapparates ist von besonderer Bedeutung. Auf Grund der geringen Dichte des Holzes muss die Hülle der Strahlungsquelle für langwellige Strahlen äusserst durchlässig sein und ein Fenster aus Beryllium besitzen. Um eine Degradation der Strahlungsquelle bei langen Aufnahmezeiten — die sich durch den gewählten grossen Aufnahmeabstand ergeben — zu verhindern, muss eine entsprechende Kühlung der Strahlungsquelle durch eine Wassenumlaufpumpe erfolgen. Hohe Transparenz und Kühlung der Strahlungsquelle werden um so unentbehrlicher, wenn man Röntgenaufnahmen von Holzproben mit einem geringeren Durchmesser als jenen der Bohrspäne machen will, da, unter sonst gleichen Bedingungen, die Aufnahmedauer paradoxerweise mit abnehmender Probendicke entsprechend länger wird.

Um die Röntgenaufnahmen der Bohrspäne mit Präzision in ihrer Längsachse auswerten zu können, — die Konstanz der von den Röntgenstrahlen durchquerten Probendicke ist eine unerlässliche Voraussetzung — muss das Registriergerät der optischen Dichte dem Typ eines Mikrodensitometers entsprechen.

Die vorgeschlagene Methode ist in zweierlei Hinsicht nicht destruktiv, weder für den Baum noch für die entnommene Holzprobe; sie ist weiters sehr schnell (die effektive Gesamtarbeitszeit für einen Bohrspan von 10 cm Länge beträgt nicht mehr als 2 Minuten).

Die Reproduktionsmöglichkeit dieser Methode ist in jeder Hinsicht zufriedenstellend. Das Auflösungsvermögen ist sehr hoch, da man an den Dichtekurven das Profil von äusserst kleinen Bauelementen wie z.B. die Harzkanäle der Fichte (50 Mikron Durchmesser), entnehmen kann. Desweiteren erlaubt diese Methode ohne

jede Schwierigkeit die Bestimmung der mittleren Dichte, der momentanen Dichte und des Spätholzanteils, indem man gleichzeitig mit der zu untersuchenden Holzprobe eine Röntgenaufnahme von zwei Normalmaszstäben (Étalon) bekannter Oberflächendichte (Holzproben oder vorteilhafter Zellophanproben) durchführt; dies erlaubt durch einfache Extrapolation eine direkte Graduation der Registrierkurven in Einheiten der Holzdichte.

Im letzten Abschnitt werden eine Anzahl verschiedener Anwendungsbeispiele von Dichtevariationskurven gegeben: Bewertung der Holzqualität, Untersuchungen von gewissen Holzabnormitäten (Druckholz, Holz im Jugendstadium) die Schwindung, der Zellkollaps und insbesondere seine Rückbildung (diese Rückbildung äussert sich in Veränderungen der Oberflächendichte die an Hand der Dichtevariationskurven leicht festgestellt werden kann), sowie der Vergleich bestimmter Charakteristika von Dichteprofilen für verschiedene Provenienzen ein und derselben Holzart.

Die Methode der Dichtemessung an Hand von Röntgenaufnahmen mit einem Mikrodensitometer erlaubt im Inneren des Holzkörpers extrahierbare Substanzen (Harze usw.) festzustellen und die Verteilung des Wassers im lebenden Baum zu untersuchen; sie stellt daher die Grundlage einer neuen Methode zur Bestimmung der Splint- und Kernholzgrenze dar. In diesem Zusammenhang konnte man aufzeigen, dass der Wassergehalt im Inneren eines Jahrringes bedeutende Veränderungen aufweisen kann, dass am Anfang der Frühholzzone und am Ende der Spätholzzone Bereiche relativer Trockenheit bestehen und dass weiterhin sehr schmale Streifen mit geringem Wassergehalt innerhalb von Jahrringteilen mit hoher Feuchtigkeit auftreten.

Schliesslich werden zwei spezielle Anwendungen der Dichtevariationskurven eingehender besprochen. Der erste Fall betrifft die Dichtevariation und die mechanischen Widerstandseigenschaften von *Abies grandis*. Mit Hilfe von statistischen Methoden konnte gezeigt werden, dass der prozentuelle Anteil des Holzes mit einer Dichte von über 600, den man nur mit Hilfe Dichtevariationskurven feststellen kann, bessere Schlüsse auf die mechanische Widerstandsfähigkeit des Holzes erlaubt, als der allgemein verwendete prozentuelle Spätholzanteil dessen Grenze im speziellen Fall einer Dichte von 550 entspricht. Der zweite Fall betrifft den Zusammenhang zwischen Dichtevariationskurven und der jeweiligen Jahrringbildung. Hierbei konnte festgestellt werden, dass einerseits die Form der Dichtekurven für das Jahr der Ringbildung charakteristisch ist und dass andererseits bestimmte neue Kriterien, wie die maximale und minimale jährliche Dichte und der Dichtekontrast an der Grenze der Jahrringe, die bisher mit anderen Methoden nicht zu ermitteln waren, eine leichtere Unterscheidung zwischen Holzarten, Jahren und Positionen (Verteilung des Holzes auf Himmelsrichtungen) erlauben als die bisherigen Kriterien, wie vor allem

Jahrringbreite und Spätholzanteil. Diese neuen Charakteristika scheinen weit mehr als alle anderen von den Umweltfaktoren abzuhängen, insbesondere den Klimafaktoren, mit welchen hochsignifikante Korrelationen aufgezeigt werden konnten. Die Dichtekurven können daher als Grundlage für eine Xylochronologie dienen d. h. eine Alterbestimmung des Holzes und sie scheinen daher geeignet, die Dendrochronologie, die nur die Zuwachsscharakteristika des Baumes berücksichtigt, zu vervollständigen und einfacher und sicherer zu gestalten.

(Traduction OSWALD.)

---