

Autécologie des essences méditerranéennes

**LE PIN BRUTIA
EN FRANCE CONTINENTALE**

Daniel NOUALS
Bénédicte BOISSEAU

- Mars 1991 -

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	5
INTRODUCTION	6
CHAPITRE I - PRESENTATION DE L'ESSENCE	7
<u>1.1. Taxonomie</u>	7
<u>1.2. Morphologie</u>	7
<u>1.3. Aire géographique</u>	8
1.3.1. Pinus brutia subsp. brutia	8
1.3.2. Pinus brutia subsp. pithyusa	8
1.3.3. Pinus brutia subsp. stankewiczii	8
1.3.4. Pinus brutia subsp. eldarica	8
<u>1.4. Pinus brutia subsp. eldarica</u>	8
<u>1.5. Pinus brutia subsp. brutia</u>	11
1.5.1. Variabilité génétique	11
1.5.2. Eléments d'écologie de l'aire naturelle	11
<u>1.5.2.1. Les facteurs climatiques</u>	11
<u>1.5.2.2. Les facteurs édaphiques</u>	12
<u>1.5.2.3. Végétation</u>	12
1.5.3. Production ligneuse	13
<u>1.5.3.1. Accroissement en hauteur</u>	13
<u>1.5.3.2. Accroissement en volume</u>	13
1.5.4. Caractères technologiques et utilisation du bois	14
1.5.5. Ravageurs et maladies	15
CHAPITRE 2 - ETUDE DES BOISEMENTS FRANÇAIS DE PIN BRUTIA METHODOLOGIE ET MODE D'ÉCHANTILLONNAGE	16
<u>2.1. Méthodologie</u>	16
2.1.1. Zone d'étude	16
2.1.2. Choix des peuplements	17
2.1.3. Système d'échantillonnage	17
<u>2.2. Le protocole des relevés</u>	17
2.2.1. Le type de placette	18
2.2.2. Le relevé écologique	18
<u>2.2.2.1. Les facteurs stationnels</u>	18
<u>2.2.2.2. Les facteurs édaphiques</u>	18
<u>2.2.2.3. Les facteurs climatiques</u>	19
2.2.3. Le relevé floristique	19
2.2.4. Les relevés dendrométriques	19
<u>2.2.4.1. Mesure de l'âge</u>	19
<u>2.2.4.2. Mesures de hauteurs</u>	19
<u>2.2.4.3. Analyses de tiges</u>	19

2.2.5. Relevés relatifs à l'installation du peuplement	20
<u>2.3. Caractéristiques de l'échantillon obtenu</u>	20
2.3.1. Nombre de relevés	
le problème des sous-espèces et des provenances	20
2.3.2. Age des arbres mesurés	21
2.3.3. Situation géographique des relevés	21
2.3.4. Répartition climatique	21
2.3.5. Répartition selon le substrat	25
2.3.6. Conclusion sur la nature de l'échantillon	25
CHAPITRE 3 - ETABLISSEMENT D'UN MODELE DE CROISSANCE EN HAUTEUR	27
<u>3.1. Les données</u>	27
<u>3.2. La modélisation</u>	28
3.2.1. Utilisation des analyses de tiges	28
<u>3.2.1.1. Méthode de modélisation</u>	28
<u>3.2.1.2. Choix des analyses de tiges représentatives</u>	28
<u>3.2.1.3. Mise en forme des données</u>	28
<u>3.2.1.4. Choix du modèle</u>	30
<u>3.2.1.5. Ajustement du modèle aux données</u>	30
<u>3.2.1.6. Résultats</u>	31
<u>3.2.1.7. Valeur de prédiction du modèle</u>	31
<u>3.2.1.8. Utilisation du modèle</u>	34
3.2.2. Utilisation du nuage de points âge-hauteur	36
<u>3.3. Comparaison avec d'autres données dendrométriques</u>	36
CHAPITRE 4 - LA CROISSANCE DU PIN BRUTIA EN RELATION AVEC LES FACTEURS DU MILIEU	40
<u>4.1. Influence de chaque facteur considéré isolément</u>	40
4.1.1. Méthode d'étude : l'analyse de variance	40
4.1.2. Influence de la sous-espèce	41
4.1.3. Influence du climat	41
4.1.4. Influence des facteurs stationnels	41
4.1.5. Influence des facteurs édaphiques	43
4.1.6. Influence des facteurs anthropiques	46
4.1.7. Conclusions sur l'action des facteurs considérés isolément	47
<u>4.2. Influence des facteurs du milieu pris deux à deux</u>	49
<u>4.3. Hiérarchisation des facteurs physiques du milieu</u>	51
4.3.1. Choix d'une méthode : la segmentation	51
4.3.2. Mode opératoire de la segmentation	51
4.3.3. Résultats et commentaires	52
4.3.4. Critique de la méthode	52

<u>4.4. Etude de la végétation</u>	54
4.4.1. Choix d'une méthode	54
4.4.2. L'analyse factorielle des correspondances (AFC)	55
4.4.3. L'élaboration des groupes floristiques	56
4.4.4. Interprétation écologique des groupes	61
4.4.5. Relation groupes floristique-fertilité	61
<u>4.5. Hiérarchisation incluant la végétation</u>	63
4.5.1. Méthode utilisée	63
4.5.2. Résultats et discussion	63
4.5.3. Conclusions sur la valeur des résultats	65
<u>4.6. Approche synthétique milieu-végétation-fertilité</u>	66
4.6.1. Classement des relevés en fonction de la flore : diagonalisation	66
4.6.2. Construction d'unités phytoécologiques	68
4.6.3. Evaluation de la fertilité selon les unités phytoécologiques	72
4.6.4. Présentation des résultats	72
<u>4.7. Conclusion sur les relations facteurs du milieu-croissance du Pin brutia</u>	76
4.7.1. Les traitements des données utilisés	76
4.7.2. Aspects pratiques	76
4.7.3. Propositions méthodologiques	77
CHAPITRE 5 - COMPARAISON ENTRE PIN BRUTIA ET PIN D'ALEP	79
<u>5.1. Réponse aux principaux facteurs limitants</u>	79
5.1.1. Adaptation à la sécheresse	79
5.1.2. Adaptation au froid	80
5.1.3. Etages bioclimatiques	80
5.1.4. Conclusions relatives aux facteurs limitants	80
<u>5.2. Expériences internationales sur les provenances des pins du groupe halepensis</u>	82
5.2.1. Expérimentation italienne	82
5.2.2. Expérimentation française	82
<u>5.3. Sensibilité des peuplements vis à vis du feu</u>	83
<u>5.4. Le cas de Pinus brutia subsp. eldarica</u>	84
CONCLUSION GENERALE	85
BIBLIOGRAPHIE	
LISTE DES ANNEXES	

LISTE DES ILLUSTRATIONS

1 - Aire de répartition de <i>Pinus halepensis</i> et <i>Pinus brutia</i> subsp. <i>brutia</i>	9
2 - Aire naturelle de <i>Pinus brutia</i> subsp. <i>pithyusa</i>	9
3 - Aire naturelle de <i>Pinus brutia</i> subsp. <i>stankewiczii</i>	10
4 - Aire naturelle de <i>Pinus brutia</i> subsp. <i>Eldarica</i>	10
5 - Situation des boisements français de <i>Pin brutia</i>	22
6 - Répartition des indices climatiques dans la zone d'introduction du <i>Pin brutia</i>	24
7 - Analyses de tiges	29
8 - Comparaison des trois modèles de polynôme	32
9 - Faisceau des courbes estimées	33
10 - Vérification de la valeur prédictive du modèle	35
11 - Nuage âge-hauteur. Amplitude du faisceau	37
12 - Classes de croissance	38
13 - Comparaison des croissances du <i>Pin brutia</i> dans son aire avec celles des boisements français	39
14 - Action des facteurs du milieu considérés isolément sur la croissance du <i>Pin brutia</i>	48
15 - Croissance du <i>Pin brutia</i> en fonction des seuls facteurs du milieu	53
16 - Etude de la flore - Plan factoriel 1-3	57
17 - Etude de la flore - Plan factoriel 1-2	58
18 - Groupes floristiques	59
19 - Représentation des groupes floristiques dans le plan factoriel 1-2	60
20 - Croissance du <i>Pin brutia</i> en fonction des facteurs du milieu et de la végétation	64
21 - Tableau diagonalisé des groupes floristiques et des relevés	67
22 - AFC sur facteurs du milieu et "compositions floristiques" -	69
23 - Evolution de la croissance du <i>Pin brutia</i> par unité écologique en fonction du climat et de l'alimentation en eau	71
24 - Principaux résultats statistiques par unité écologique	73
25 - Distribution des indices de fertilité par unité écologique	73
26 - Moyenne des indices de fertilité par unité écologique avec intervalle de confiance à 95 %	74
27 - Intervalles de prédiction à 85 % des indices de fertilité par unité écologique	74
28 - Evaluation de la fertilité des stations pour le <i>Pin brutia</i>	75
29 - Aire de projection de <i>Pinus brutia</i> et <i>Pinus halepensis</i> sur le climagramme d'Emberger	81
30 - Utilisation du <i>Pin brutia</i> en France continentale	86

AVANT PROPOS

Cette étude s'inscrit dans le programme de recherche sur l'autécologie des essences forestières méditerranéennes, mené au groupement du CEMAGREF d'Aix-en-Provence depuis une dizaine d'années.

Pour sa réalisation, elle a bénéficié de financements des Programmes Intégrés Méditerranéens (CEE, Conseil Régional de Provence-Alpes-Côte d'Azur) et des crédits du Conservatoire de la Forêt Méditerranéenne.

Les observations de terrain ont été effectuées par :

Y. BERNIER, F. BINGGELI, L. GARDES, B. LEVOYER, D. NOUALS, R. OSTERMEYER,
C. RIPERT

et coordonnées par C. RIPERT.

La mise en forme des textes et graphiques a été assurée par D. BREIL.

INTRODUCTION

Depuis un dizaine d'années, l'effort consenti par la collectivité à l'égard de la forêt méditerranéenne a pris une importance considérable.

Dans une région où les investissements forestiers étaient jusqu'alors minimes, les gestionnaires locaux se sont vu dotés brusquement de gros moyens financiers, destinés à protéger, améliorer ou reconstituer cette forêt (de l'ordre de 5.000 hectares sont reboisés annuellement). Ils sont par contre souvent restés démunis sur le plan des connaissances scientifiques et techniques qui leur auraient permis d'utiliser au mieux ces moyens en fonction des spécificités méditerranéennes.

C'est pourquoi le CEMAGREF d'Aix-en-Provence a lancé un vaste programme d'études visant d'une part à améliorer le matériel végétal utilisé en reboisement, d'autre part à accroître la connaissance des essences et du milieu méditerranéens, afin de fournir aux forestiers des éléments techniques leur permettant d'orienter au mieux les investissements dans ce contexte écologiquement difficile.

Ainsi, à l'instar des travaux déjà réalisés (Pin pignon, Cyprès vert, Sapins méditerranéens, Pins laricio), la présente étude sur le Pin brutia, vise à préciser les exigences écologiques de cette essence et à fournir des éléments pratiques et d'usage facile pour permettre d'optimiser son utilisation dans les opérations de reboisement.

Le Pin brutia, originaire de Méditerranée orientale, a été introduit en France depuis une trentaine d'années, et, s'il occupe encore une faible surface, il est toujours fréquemment employé dans les départements côtiers des régions méditerranéennes, comme une des essences alternatives au Pin d'Alep.

De nombreux forestiers se demandent d'ailleurs si le Pin brutia procure réellement des avantages par rapport au Pin autochtone.

Nous nous attacherons donc, à travers une première étape bibliographique, à résumer les connaissances existantes sur l'autécologie de cette essence dans son aire naturelle.

Puis nous tenterons de tirer profit des enseignements fournis par les reboisements français en faisant notamment apparaître les facteurs du milieu qui ont eu le plus d'influence sur la bonne ou mauvaise croissance des peuplements.

Enfin, nous ferons le point sur l'ensemble de ces connaissances, en particulier par comparaison avec le Pin d'Alep, pour faire apparaître les principaux critères pour le choix de cette essence en reboisement.

CHAPITRE 1 - PRESENTATION DE L'ESSENCE

Le Pin brutia qui remplace le Pin d'Alep dans la région orientale du bassin méditerranéen, constitue en Grèce, au Liban, à Chypre, en Crète, mais surtout en Syrie et en Turquie, des forêts d'une grande valeur écologique et économique.

Cette première partie, qui présente l'espèce, reprend, pour la plus grande part, en la résumant, l'excellente synthèse publiée par I. NAHAL en 1983 dans la revue "Forêt Méditerranéenne". Il doit aussi beaucoup aux travaux de l'équipe de P. QUEZEL, qui a contribué à la connaissance de cette essence sur le plan phytosociologique dans son aire d'origine.

Signalons, avant d'aborder la classification botanique du Pin brutia, que celui-ci a été décrit pour la première fois en 1811 par un botaniste italien, qui lui a donné son nom, à partir d'une région de Calabre, le Brutium. Malheureusement, ce pin n'a jamais été trouvé en Italie, et il semble bien que l'échantillon décrit provenait du Moyen-Orient. Pour tout simplifier, remarquons qu'il constitue l'essentiel des forêts de la région d'Alep en Syrie, d'où le pin d'Alep est absent l...

1.1. Taxonomie

Le Pin brutia (*Pinus brutia* Ten.) appartient au genre *Pinus*, à la section halepensis, au groupe halepensis, de la famille des Pinaceae (GAUSSEN 1961).

Le groupe halepensis comprend *Pinus halepensis* Mill. et *Pinus brutia* Ten.

Sans entrer dans le détail, si la première des deux espèces est reconnue comme une entité, l'espèce *Pinus brutia* a quant à elle été divisée en plusieurs unités, et, à l'heure actuelle, Flora Europaea n'a pris à leur sujet aucune position précise.

Nous retiendrons donc la classification la plus communément admise, établie par NAHAL, basée sur des critères morphologiques et anatomiques, ainsi que des critères tirés de la biochimie, de la géographie, de l'écologie et de la palynologie.

Cette classification s'établit ainsi :

- a - *Pinus brutia* est une espèce bien définie et nettement distincte de *Pinus halepensis* Mill.
- b - *Pinus brutia* est considéré comme une espèce complexe formée des sous-espèces suivantes :
 - . *Pinus brutia* Ten. subsp *brutia*
 - . *Pinus brutia* Ten. subsp *eldarica* (Medw) NAHAL
 - . *Pinus brutia* Ten. subsp *pithyusa* (Stevenson) NAHAL
 - . *Pinus brutia* Ten. subsp *stankewiczii* (Sukaczew) NAHAL

1.2. Morphologie

Voir clé de détermination en annexe 1

1.3. Aire géographique

Le Pin *brutia sensu lato* se rencontre dans les régions suivantes :

1.3.1. *Pinus brutia* subsp. *brutia* (fig. 1)

- . Grèce (Thrace, Rhodes, Crète).
- . Turquie (Nord-Ouest, Ouest et Sud-Ouest : côte de la Mer Noire, la Mer de Marmara, la Mer Egée, la Mer Méditerranée, le Taurus et l'Amanus).
- . Syrie (Montagnes côtières du Baer-Bassit et des Alaouites, Montagnes des Kurdes au Nord d'Alep).
- . Liban (Mont Liban et spécialement sur le versant occidental, et en particulier dans les régions de Akkar, Liban central, Bkassine dans le Sud. Les peuplements de Pin *brutia* dans le Sud du Liban représentent la limite la plus méridionale dans l'aire géographique de ce Pin).
- . Irak (partie septentrionale, région de Zawita).
- . Chypre (Chaîne des montagnes du Nord, région de Paphos et de Trodos (FINLAYSON, 1971).

1.3.2. *Pinus brutia* subsp. *pithyusa* (fig. 2)

Stations littorales de la région de Pitsound, sur la côte orientale de la Mer Noire en Union Soviétique (KOLESNIKOV, 1963). D'après ALLEGRI, 1973, il existerait en Turquie, sporadiquement çà et là.

1.3.3. *Pinus brutia* subsp. *stankewiczii* (fig. 3)

Crimée méridionale, au Cap Aya et près de Soudak en Union Soviétique.

1.3.4. *Pinus brutia* subsp. *eldarica* (fig. 4)

Azerbaïdjan Soviétique, près du désert d'Eldar dans le massif de Eller Oukhi.

Azerbaïdjan d'Iran, de Tabriz à la Mer Caspienne, près de la frontière avec l'U.R.S.S. (in, ALLEGRI, 1972).

Les aires géographiques des sous-espèces *pithyusa*, *stankewiczii* et *eldarica* ne sont pas bien explorées, et, par conséquent, sont encore mal connues. D'après KOLESNIKOV, 1963, les aires géographiques de ces Pins en Union Soviétique sont, à l'heure actuelle, relativement bien connues, mais, il n'en est pas de même en dehors de l'Union Soviétique.

Les reboisements français de Pin *brutia* sont constitués, pour leur majorité (et même leur totalité pour les plus anciens) par la sous-espèce *brutia*. La sous-espèce *eldarica* représente le reste des boisements, et a été utilisée plus récemment (voir chap. 2.3.2.).

A notre connaissance, les autres sous-espèces n'ont été introduites qu'en arboretum.

Nous ne nous intéresserons donc, dans ce qui va suivre qu'aux sous-espèces *brutia* et *eldarica*.

1.4. *Pinus brutia* subsp *eldarica*

Les éléments qui concernent l'aire naturelle de la sous-espèce *eldarica* sont pratiquement inexistantes dans la bibliographie.

Certains auteurs sont d'ailleurs d'avis divergents pour ce qui concerne la situation de cette aire naturelle.

**FIGURE 1 - Aires de répartition de *Pinus halepensis*
et *Pinus brutia* subsp. *brutia***

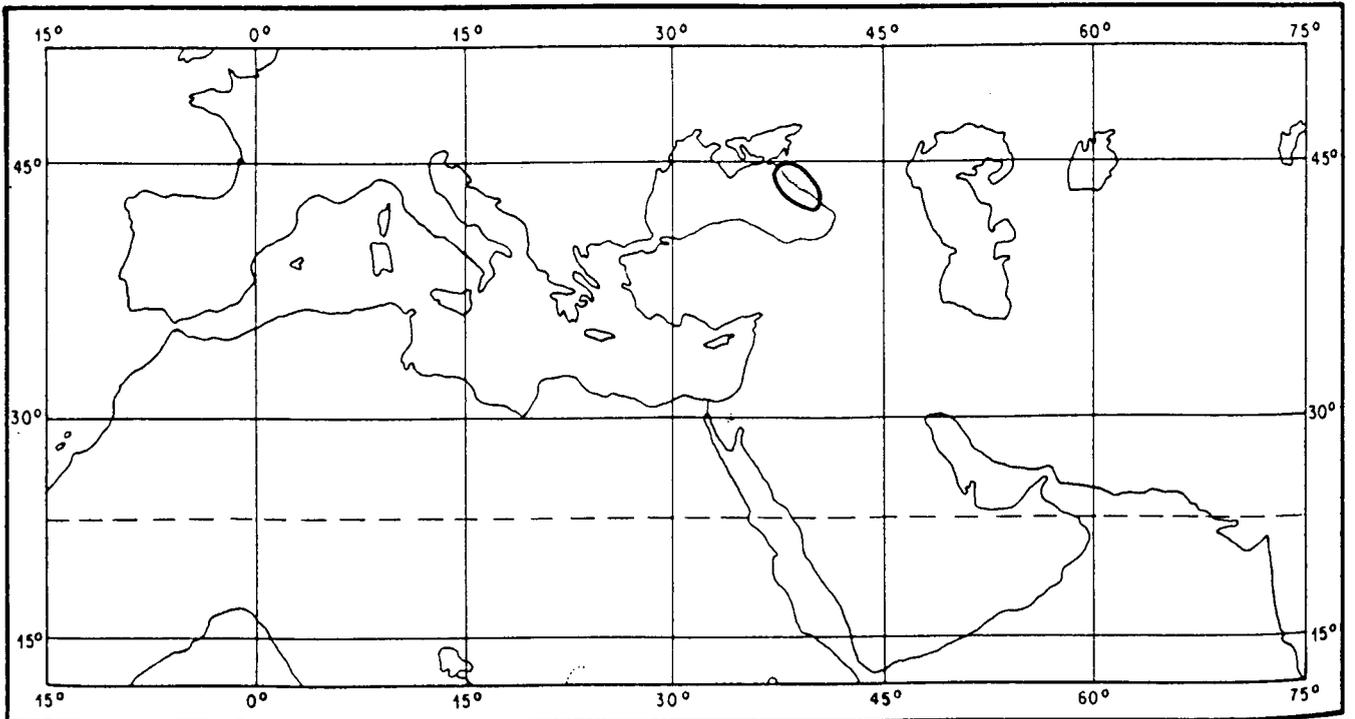


D'après QUEZEL

FIGURE 2 - Aire naturelle de *Pinus pityusa*

1.293

Pinus pityusa Stev.

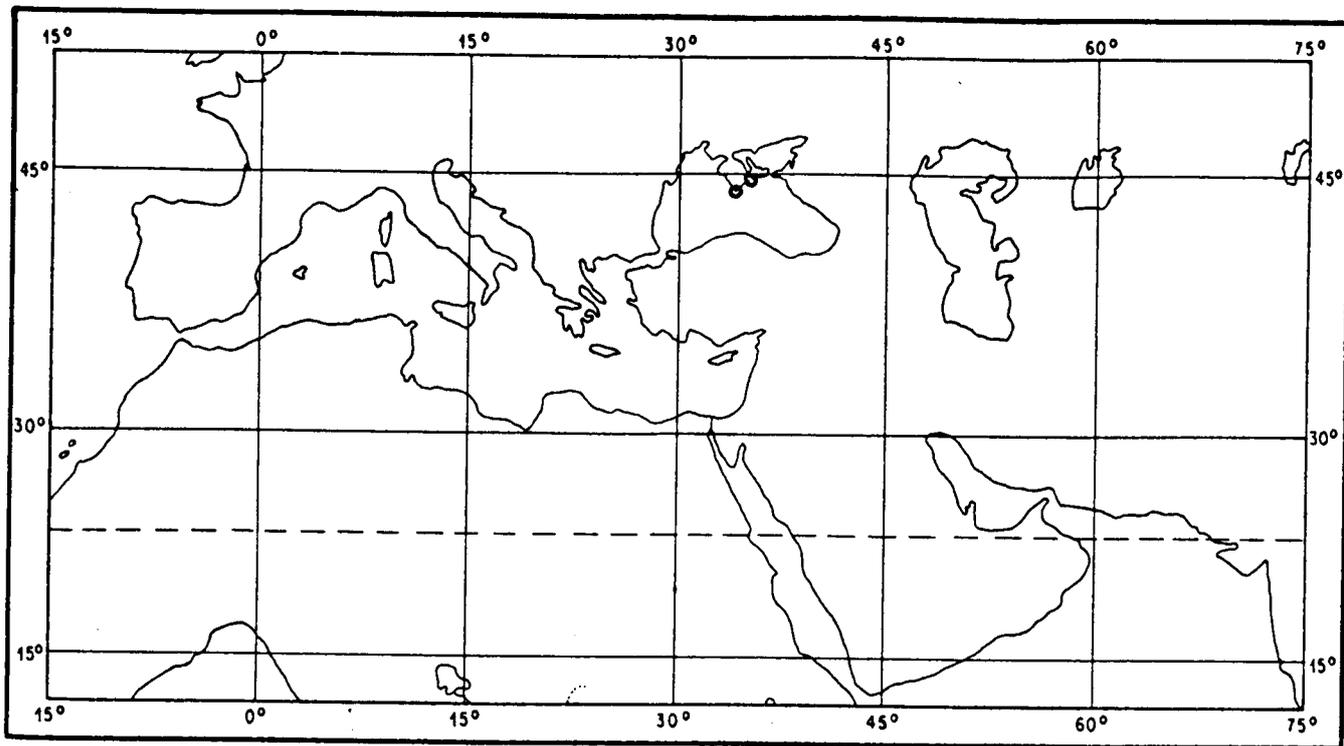


D'après Debazac *et al.*, 19

FIGURE 3 - Aire naturelle de *Pinus brutia* subsp. *stankewiczii*

1.295

Pinus stankewiczii (Sank.) Foa

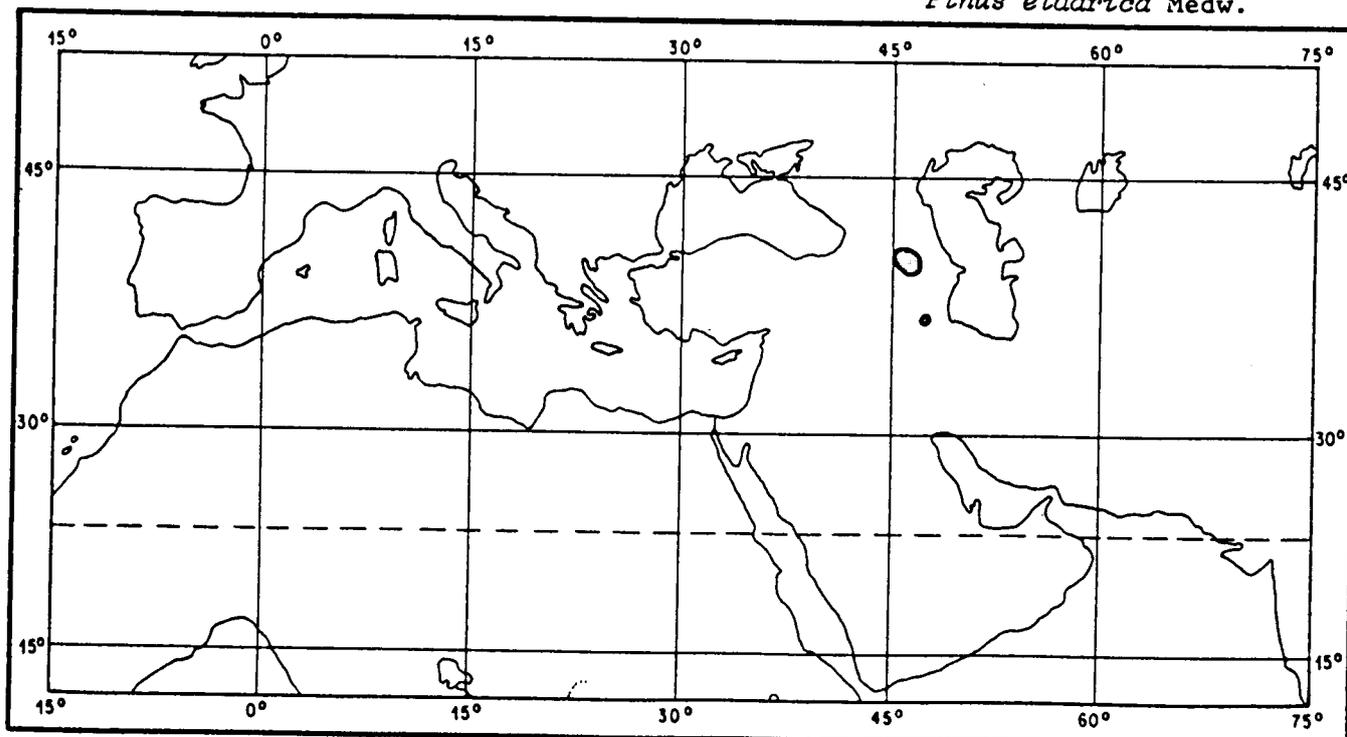


D'après Debazac *et al.*, 19

FIGURE 4 - Aire naturelle de *Pinus brutia* subsp. *Eldarica*

1.275

Pinus eldarica Medw.



D'après Debazac *et al.*, 19

D'après MIROV (1967), cette aire est située dans un environnement semi-désertique, aux confins de l'Azerbaïdjan, de la Géorgie et de l'Arménie Soviétique et limitée à une surface de 550 ha, dont 110 ha de peuplement pur. Il s'agirait d'un peuplement relique de l'Oligocène.

D'après ALLEGRI (1972), cette aire devrait être étendue à l'Azerbaïdjan d'Iran, de Tabriz à la Mer Caspienne.

Le Pin *eldarica* aurait été artificiellement étendu à d'autres régions d'Asie centrale (Afghanistan, Iran, Ouest du Pakistan).

C'est d'ailleurs de ces régions que proviennent les graines actuellement utilisées dans les reboisements, et notamment celles qui avaient été commercialisées il y a une vingtaine d'années par un pépiniériste américain sous le nom de Pin de Mondell.

A l'époque, ce pin avait fait l'objet d'une certaine publicité (dans la lignée des arbres miracles périodiquement annoncés pour résoudre les problèmes de la forêt méditerranéenne). A l'appui de cet engouement, des expérimentations menées en Californie faisaient état de taux de survie et de croissance remarquables dans des stations difficiles, bien supérieures à celles du Pin d'Alep.

Les résultats que nous avons constatés sur les reboisements français ne permettent pas pour l'instant de confirmer cette supériorité, du moins pour ce qui concerne la croissance (voir chapitre 5).

1.5. Pinus brutia subsp. brutia

1.5.1. Variabilité génétique

ARBEZ (1974) a décelé en Turquie de grandes variations phénotypiques dont l'origine est génétique.

Il fait état de peuplements d'excellente forme, à fût droit et élancé, branches fines et cimes conique et denses. Ces peuplements se rencontrent surtout à moyenne altitude entre 500 et 900 m, alors que les peuplements côtiers de basse altitude sont en général de mauvaise forme.

D'autres peuplements d'élite ont été repérés dans le Nord-Ouest de la Syrie entre 500 et 700 m, et dans l'île de Crète. De l'avis des différents auteurs, les meilleures formes de ces peuplements rappellent celles du Pin *laricio* de Corse.

1.5.2. Eléments d'écologie de l'aire naturelle

Elle occupe une surface estimée à 4 millions d'hectares, à des altitudes pouvant varier du niveau de la mer jusqu'à 1600 m.

1.5.2.1. Les facteurs climatiques

a) Pluviométrie

Les peuplements naturels de Pin *brutia* recouvrent des zones dont la pluviométrie moyenne annuelle varie entre 350 et 1300 mm.

Cette pluviométrie est fonction de la distance au littoral (elle décroît lorsque cette distance augmente) et de l'altitude (elle croît avec l'altitude).

Pour ce qui concerne les régimes pluviométriques, ils sont caractérisés par un maximum de pluviométrie hivernale, alors que l'été est extrêmement sec (avec deux variantes :

maximum Hiver, puis Printemps, et Automne, et enfin Eté (HPAE) pour les pinèdes de Syrie, du Liban, du Sud de la Turquie, HAPE pour les pinèdes Turques).

A noter qu'en France méditerranéenne, le régime est plutôt du type APHE.

b) Températures

Dans son aire, les conditions thermiques rencontrées par le Pin brutia sont très variées.

La valeur de m (moyenne des minima du mois le plus froid) y varie de - 4 °C à + 9 °C, et des températures de l'ordre de - 25 °C ont pu être relevées, sans que l'on constate de dommage apparent sur les peuplements des zones froides de l'aire.

Les valeurs de M (moyenne des maxima du mois le plus chaud) varient quant à elles de + 27 à + 36 °C.

c) Etages bioclimatiques (voir figure 18, chap. 5)

Les étages bioclimatiques (au sens d'Emberger) où s'étend l'aire du Pin brutia sont les suivants :

- humide : tempéré, chaud,
- sub-humide : froid, frais, tempéré, chaud,
- semi-aride : très froid, froid, tempéré, chaud,
- aride : chaud

Remarque : l'essentiel de ces forêts est situé en bioclimat humide et sub-humide ; les pinèdes arides se rencontrent uniquement dans l'île de Crète (QUEZEL)

1.5.2.2. facteurs édaphiques

La variété de roches mères de l'aire du Pin brutia est extrême. On le rencontre sur tous les types de roches volcaniques et métamorphiques, ainsi que sur de nombreuses roches sédimentaires.

C'est cependant sur marnes, calcaires marneux et "roches vertes" (serpentine, gabbros, dolérites, péridotites) qu'il est le plus fréquent ; les plus beaux peuplements se trouvent sur roches vertes.

Les sols qui caractérisent ces forêts sont en général peu évolués (de type AC), mises à part les pinèdes de montagne, où l'on trouve des sols bruns lessivés.

A noter que le Pin brutia s'accommode très bien des sols riches en magnésium (sur roches vertes magnésiennes).

1.5.2.3. Végétation

La valeur dynamique et phytosociologique du Pin brutia est assez bien connue, du fait de nombreux travaux réalisés dans les régions de la Méditerranée orientale (QUEZEL et Al.).

On retiendra que le Pin brutia, qui est souvent l'élément dominant des formations végétales de ces régions, y prend des significations très diverses du fait de sa plasticité et de l'étendue des combinaisons climato-édaphiques possibles. Il figure donc dans de très nombreux groupements végétaux.

De vastes peuplements de cette essence s'étendent de l'étage thermo-méditerranéen jusqu'au supra-méditerranéen, où il forme, dans ce dernier, sur divers substrats, des forêts qui figurent parmi les plus belles de Turquie.

1.5.3. Production ligneuse

1.5.3.1. Accroissement en hauteur

Dans le nord-Ouest de la Syrie, la **hauteur moyenne** des peuplements à 70 ans s'étage entre 10 et 21 m, selon la fertilité de la station.

La station de recherches forestières de Lattaquié (SRFL, 1966) y a distingué sept classes de fertilité.

En Turquie, Arbez (1974), signale des **hauteurs dominantes** variant de 13 à 23 m à l'âge de 55 - 57 ans.

MAYER a noté lui des hauteurs s'étageant, selon les classes de fertilité de 10 à 28 m à 50 ans et signale, dans des combes à *Ostrya carpinifolia* et *Carpinus orientalis* des hauteurs de 35 m.

En Crète, PANETSOS (1981) a mesuré une hauteur dominante de 27,7 m dans un peuplement d'âge moyen de 69 ans, avec certains arbres atteignant 32,50 m. Ces données ont été reportées sur la figure 13, page 39 au chapitre modélisation de la croissance.

1.5.3.2. Accroissement en volume

Il est bien sûr corrélié à l'accroissement en hauteur.

La SRFL a observé des accroissements de 3 à 6 m³/ha/an dans la Chaîne côtière du Nord-Ouest de la Syrie, selon les classes de productivité.

AKMAN et Al., 1979, ont montré que la production moyenne optimale théorique variait en fonction des étages de végétation :

thermo-méditerranéen : 2,5 m³/ha/an,
meso-méditerranéen : 2 à 4 m³/ha/an,
supra-méditerranéen : 5 à 5,5 m³/ha/an.

Nous avons rassemblé, dans le tableau ci-après, des chiffres de production par hectare et par an, fournis par QUEZEL et BARBERO, 1985, à l'issue d'une étude comparative sommaire sur des peuplements ayant à peu près le même âge.

Les régions citées diffèrent souvent par leur hauteur de précipitations.

	Calcaires Compacts	Calcaire marneux et marnes	Schistes	Serpentines et gabbros
Etage thermo-méditerranéen	Alaouites (S) 1 à 2 m ³	Mersin (T) 2 à 2,5 m ³ Alaouites (S) 1 à 2 m ³		Baer Bassit (S) 6 à 7 m ³
Etage Meso-méditerranéen	Mügla (T) 1 à 1,5 m ³ Taurus d'Adana (T) 2 à 2,5 m ³ Alaouites (S) 1,5 à 3 m ³	Mersin (T) 2 à 2,5 m ³ Alaouites (S) 2 à 4 m ³	Mügla (T) 3 à 3,5 m ³	Mügla (T) 5 m ³ Baer Bassit (S) 8 à 9 m ³
Etage supra-méditerranéen		Mersin (T) 5 à 5,5 m ³		Pos (T) : 6 à 7 m ³ Mersin (T) : 7 m ³ Baer Bassit (S) 8 à 9 m ³

T : Turquie
S : Syrie

On voit que des productions remarquables sont obtenues sur roches vertes, et que, à l'opposé, les calcaires compacts donnent des peuplements faiblement productifs. On remarque aussi que, sur calcaire marneux, la production s'élève avec les étages de végétation, jusqu'à donner des valeurs intéressantes dans le supra-méditerranéen.

1.5.4. Caractères technologiques et utilisation du bois

Le bois de *Pinus brutia* ssp *brutia* peut être classé parmi les bois mi-lourds, moyennement nerveux, et sur le plan mécanique, présentant une excellente résistance en compression axiale, et moyenne en flexion statique.

Sur le plan papetier, il est plus adapté à la production de Kraft dont il fournit des papiers physiquement et mécaniquement remarquables par la longueur de leurs fibres.

La qualité de bois de *Pinus brutia* est voisine de celle de *Pinus halepensis*. Cependant, la plus grande rectitude de son fût le rend apte à de meilleures utilisations.

Le tableau, ci-dessous, présente les principales caractéristiques comparées de ces bois (d'après RAHME 1972).

	Infra densité g/dm ³	Charge de rupture en flexion	charge de rupture en compression	Retrait axial	Retrait radial	Retrait tangentiel	Retrait volumétrique
<i>Pinus brutia</i> subsp. <i>brutia</i>	467 à 478	45,6 à 49,3	427 à 517	0,27 à 0,5	4,7 à 4,9	6,8 à 7,4	12,7 à 12,8
<i>Pinus halepensis</i>	426	50,9	464	0,13 à 0,34	4,4 à 4,9	6,9 à 7,2	11,7

A l'issue de recherches effectuées en Syrie, RAHME a montré par ailleurs que les facteurs écologiques, en influant sur la largeur des cernes d'accroissement, interviennent sur les propriétés du bois du Pin brutia, ces qualités décroissant avec la fertilité des stations.

En Syrie, les usages du bois de Pin brutia sont les suivants :

- Déroulage,
- Poteaux,
- Constructions navales,
- Bois latté,
- Calsserie,
- Cellulose.

1.5.5. Ravageurs et maladies

En France, le Pin brutia est sensible aux ravageurs et maladies habituellement rencontrés sur les résineux, à savoir scolytes, pissode, hylobe, etc ... et ce, d'autant plus s'il est placé dans des conditions difficiles et soumis à des stress hydriques ponctuels ou permanents. Il subit lui aussi de fortes attaques de la processionnaire du pin lors des années de pullulation.

On n'a pas encore observé en France d'ennemi naturel qui lui serait spécifique (source Département Santé des Forêts).

Dans son aire naturelle, on signale sa sensibilité à deux cochenilles : *Leucaekspis pini* et *Matsucoccus josephii*. Nous n'avons pas trouvé de référence quant à l'importance de ces ravageurs.

Signalons qu'en Israël, en reboisement, il est donné comme plus résistant à *Matsucoccus josephii* que le Pin d'Alep, et pour cela souvent préféré à ce dernier dans certaines conditions (LIPHSCHITZ - MENDEL, 1987).

CHAPITRE 2 - ETUDE DES BOISEMENTS FRANÇAIS DE PIN BRUTIA

METHODOLOGIE ET MODE D'ECHANTILLONNAGE

Après avoir fait la connaissance de notre sujet dans son aire d'origine, il nous faut maintenant tenter de tirer les enseignements des introductions passées de Pin brutia en France.

Nous allons donc examiner dans un premier temps la méthode utilisée, ainsi que la phase de recueil des données sur le terrain.

2.1. Méthodologie

La méthode pratiquée depuis plusieurs années au CEMAGREF d'Aix-en-Provence consiste à utiliser la mine de renseignements que constituent tous les boisements, naturels ou artificiels, que l'on peut recenser pour l'essence concernée, qu'il s'agisse de bouquets d'arbres ou de plusieurs dizaines d'hectares.

Cette méthode a évolué progressivement et est constamment remise au point, mais, dans les grandes lignes, elle se déroule toujours de la façon suivante ; sur l'ensemble de la zone d'étude, on plante des placettes de mesures instantanées au sein des peuplements de l'essence étudiée. Sur ces placettes sont relevés d'une part les facteurs relatifs à la station (écologiques), et d'autre part les descripteurs du peuplement (dendrométriques).

Ensuite, au bureau, ces relevés sont traités de manière statistique de façon à faire apparaître d'abord, un indice de fertilité de la station pour cette essence (obtenu grâce aux mesures dendrométriques), puis les liaisons de cet indice de fertilité avec les descripteurs du milieu.

Pour chaque essence, il faut donc préalablement définir :

- la zone d'étude,
- les critères de choix des peuplements,
- le système d'échantillonnage.

Les divers points sont examinés ci-après :

2.1.1. Zone d'étude

Le Pin brutia étant une essence d'introduction récente, occupant des surfaces limitées, il n'y avait aucune raison de circonscrire la zone d'étude à une région particulière, et il était plutôt nécessaire d'étudier une très grande diversité de stations.

L'ensemble de la zone méditerranéenne française (Corse non comprise pour des raisons pratiques) a donc été retenue.

Il n'existe pas à notre connaissance de plantation de Pin brutia en dehors de cette zone.

2.1.2. Choix des peuplements

Le fondement de cette méthode est basée sur les lois de EICHHORN, qui soulignent la corrélation existant entre la production d'un peuplement et sa hauteur dominante à un âge donné (l'utilisation de ces lois sera décrite au chapitre "modélisation de la croissance").

Ces lois définissent les conditions dans lesquelles leur application est théoriquement possible. Le choix des peuplements devra donc être fait en fonction de l'obéissance à ces conditions, qui sont les suivantes : Peuplements pleins, équiennes, monospécifiques et génétiquement homogènes.

Mais d'autre part, il est nécessaire, pour réaliser une étude statistique, de disposer d'un nombre de relevés suffisamment important dans les conditions les plus variées.

Le parti a donc été pris de visiter tous les boisements recensés, en n'éliminant lors de l'enquête que les peuplements s'éloignant trop de ces conditions.

L'examen ultérieur des caractéristiques de l'échantillon permettra de rechercher une cohérence entre les règles inhérentes aux lois de EICHHORN et cet échantillon imposé, en faisant d'une part un nouveau tri à posteriori, et en incluant d'autre part comme facteur de variation les cas où l'une ou l'autre condition n'a pas été totalement respectée sans pour autant compromettre totalement l'étude.

Les conditions de choix sur le terrain ont donc été les suivantes :

- peuplement équiennne à 2 ans près,
- nombre d'arbres sur un peuplement pouvant être faible, mais suffisant pour que la notion de hauteur dominante ait un sens (une vingtaine d'arbres au minimum, en général),
- pas de facteur d'artificialisation du milieu visible ou supposé (arbres de parc, contrebas de route, proximité de ferme, etc...)

2.1.3. Système d'échantillonnage

Il constitue, en fait, la contrainte principale pour ce type d'étude : l'échantillon est imposé par la présence ou non de l'essence à étudier, et non par le choix des milieux que l'on souhaiterait recenser.

Il n'est donc guère possible d'appliquer des méthodes courantes en écologie, comme celle des transects, ou même de réaliser une stratification des critères écologiques.

Dans la pratique, on a donc effectué une enquête préliminaire auprès des services forestiers, complétée par des recherches sur le terrain, et on a visité tous les peuplements connus.

Après sélection des peuplements présentant les conditions décrites au paragraphe précédent, des relevés ont été réalisés dans les stations choisies selon des critères qualitatifs et non quantitatifs, c'est-à-dire en s'attachant à inventorier suffisamment les stations marginales et essayer de prospecter le maximum de variations du milieu.

2.2. le Protocole des relevés

Les relevés ont été réalisés sur une période s'étendant de mars 1985 à Décembre 1989.

Il est important de souligner que pas moins de 8 enquêteurs, dont l'auteur, ont participé à cette phase de terrain. En effet, cette campagne de relevés portait sur une dizaine d'essences à étudier sur les régions PACA et Languedoc-Roussillon. Elle a été interrompue pendant environ deux ans pour des raisons internes au CEMAGREF.

Il est évident que tout cela n'a pas été sans conséquences sur l'homogénéité des données recueillies.

Une fiche d'enquête commune à ces 10 essences a été établie (voir annexe n° 2), sur laquelle ont été notés les critères que nous allons énumérer.

2.2.1. Le type de placette

Le protocole ne fixe pas de forme et de surface précise pour la placette : elle doit être simplement homogène sur toute son étendue quant aux critères écologiques et dendrométriques que l'on relève. Elle est délimitée par la proximité immédiate des arbres dominants que l'on mesure.

Dans la pratique, elle a une taille variant entre 500 et 1000 m².

2.2.2. Le relevé écologique

2.2.2.1. Les facteurs stationnels

Ce sont :

- l'altitude
- l'exposition du versant,
- l'exposition de la station,
- la position topographique,
- la pente,

auxquelles s'ajoutent, notées au bureau :

- la distance au littoral,
- la latitude,
- la longitude.

2.2.2.2. Les facteurs édaphiques

Il s'agit de :

- la nature de la roche mère, son pourcentage d'affleurement et son pendage (lorsqu'il est visible)
- le type de formation superficielle,
- la réaction de la terre fine à l'acide chlorhydrique,

La réserve en eau du sol est évaluée par les descripteurs suivants :

- la profondeur d'enfoncement d'une tarière hélicoïdale de 4 cm de diamètre (test tarière),
- le pourcentage de cailloux en affleurement et dans les premiers horizons,
- la texture des premiers horizons.

2.2.2.3. Les facteurs climatiques

Nous avons choisi pour cette étude d'utiliser les indices synthétiques mis au point au CEMAGREF d'Aix-en-Provence (cf. C. GOMBAULT, 1986) et cartographiés sur la région méditerranéenne (C. RIPERT, D. NOUALS, 1988) (voir la signification de ces indices au paragraphe 2.3.5.).

2.2.3. Le relevé floristique

Le relevé des plantes rencontrées porte uniquement sur les espèces **facilement identifiables et reconnaissables en toutes saisons**.

Cela exclut donc pratiquement toutes les graminées et les annuelles. Aucun critère d'abondance ou de dominance n'est noté.

2.2.4. Les relevés dendrométriques

2.2.4.1. Mesure de l'âge

On mesure l'âge en comptant les cernes sur une carotte prélevée par sondage à la tarière de Pressler à environ 10-20 cm du sol. L'âge total est déduit en rajoutant un ou deux ans à l'âge lu sur la carotte, selon la hauteur du sondage. A noter la relative difficulté d'atteindre le coeur, même sur des arbres de petit diamètre, celui-ci étant très souvent décentré.

On a d'ailleurs souvent obtenu l'âge en abattant un arbre dominé vivant et en comptant les cernes sur la souche. Dans le cas où la date de la plantation était connue, on a rajouté 2 ans pour avoir l'âge total des arbres.

2.2.4.2. Mesures de hauteurs

On mesure la hauteur totale des 6 plus grands arbres (sauf les fillformes et les "tarés") de la placette, à l'aide de perches en fibres de verre de type IFN, graduées de 25 en 25 cm.

C'est la moyenne de ces six hauteurs qui sera considérée comme "hauteur dominante". Cette définition est un peu différente de la hauteur dominante habituellement utilisée.

2.2.4.3. Analyses de tiges

Environ $\frac{1}{4}$ des relevés dendrométriques a été complété par une analyse de tige.

Dans ce cas, un seul arbre, sur les 6 mesurés, a été analysé.

la méthode classique consiste en l'abattage et le billonnage de l'arbre en segments, et le comptage des cernes à chaque découpe.

Ici, vu l'âge peu élevé de l'échantillonnage (10 à 35 ans), on a préféré réaliser les analyses sur pied, car tous les verticilles sont encore bien visibles soit à l'oeil nu, soit à la jumelle, soit en grimpant dans l'arbre.

Cette méthode est bien sûr beaucoup plus rapide et ne cause aucun dommage au peuplement.

Elle nécessite toutefois des précautions car le Pin brutia présente très fréquemment de faux verticilles (vérifications par sondages à la tarière ou sur les branches vivantes).

2.2.5. Relevés relatifs à l'installation du peuplement

Ces renseignements sont souvent difficilement visibles, mais lorsque c'était possible, on a noté :

- les antécédents culturaux,
- le mode de plantation (en plein, en bandes, etc ...),
- le travail du sol,
- le taux de reprise.

Les renseignements du type matériel végétal, provenance etc n'ont pratiquement jamais pu être obtenus.

2.3. Caractéristiques de l'échantillon obtenu

2.3.1. Nombre de relevés - le problème de sous-espèces et des provenances

Parmi les relevés réalisés sur les différentes essences dont l'étude est en cours, on obtient (après élimination de quelques fiches inutilisables et sans préjuger des erreurs éventuelles d'identification).

110 relevés portant sur *Pinus brutia* ssp *brutia*
37 relevés portant sur *Pinus brutia* ssp *eldarica*
15 relevés portant sur *Pinus brutia* ssp indéterminée

Cet effectif amène d'emblée les conclusions suivantes :

- L'étude séparée des deux sous-espèces conduit à abandonner l'étude de la sous-espèce *eldarica*, pour cause d'effectif insuffisant, et à éliminer 52 relevés. D'autre part, l'effectif de 110 fiches pour la sous-espèce *brutia* est à peine suffisant (les études précédentes ont montré qu'il était souhaitable de disposer d'au moins 150 relevés).
- Par ailleurs, on a pu observer, lors de la campagne de terrain, que lorsque les deux sous-espèces étaient présentes ensemble sur une même station, on observait des différences de croissance parfois à l'avantage de l'une et parfois de l'autre sous-espèce.
- Enfin, il est certain qu'une très grande diversité de provenance de la sous-espèce *brutia* figure dans notre échantillon. Dans les archives de la pépinière administrative des Bouches du Rhône, qui a fourni la quasi-totalité des plants plantés à cette époque dans le département, la seule indication d'origine est "Turquie", et on a vu quelle gamme de provenances pouvait recouvrir ce pays.

Les variations de vitesse de croissance sont donc certainement aussi fortes selon les provenances à l'intérieur de la sous-espèce *brutia*, qu'entre les deux sous-espèces *brutia* et *eldarica*.

Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'étudier conjointement sans distinction les deux sous-espèces, tout en étant conscient de ce que cette variabilité génétique à l'intérieur de l'espèce peut amener d'imprécision à la fois :

- dans la modélisation de la croissance,
- dans les réponses des différentes provenances vis à vis du milieu.

2.3.2. Age des arbres mesurés

Les âges mesurés se répartissent de la façon suivante :

10 à 15 ans :	27
16 à 20 ans :	61
21 à 25 ans :	45
25 à 30 ans :	24
Plus de 30 ans :	5

Age le plus élevé retenu : 34 ans (un relevé atteignait 64 ans, et a été éliminé). On peut noter que la tranche d'âge la plus représentée pour *P. brutia* est 21-25 ans, alors qu'elle est de 16-20 ans pour *P. eldarica*, qui n'a que 6 relevés au-dessus de 20 ans.

Enfin, remarquons que nous avons affaire uniquement à des peuplements équiennes (à 2 ans près pour tenir compte des regarnis), puisqu'il s'agit de peuplements artificiels.

2.3.3. Situation géographique des relevés

Par département et région, ceux-ci se répartissent de la façon suivante :

Pyrénées Orientales	13	Languedoc-Roussillon : 59
Aude	24	
Hérault	16	
Gard	6	
Vaucluse	6	Provence-Alpes-Côte d'Azur : 103
Bouches du Rhône	94	
Var	3	
TOTAL	162	

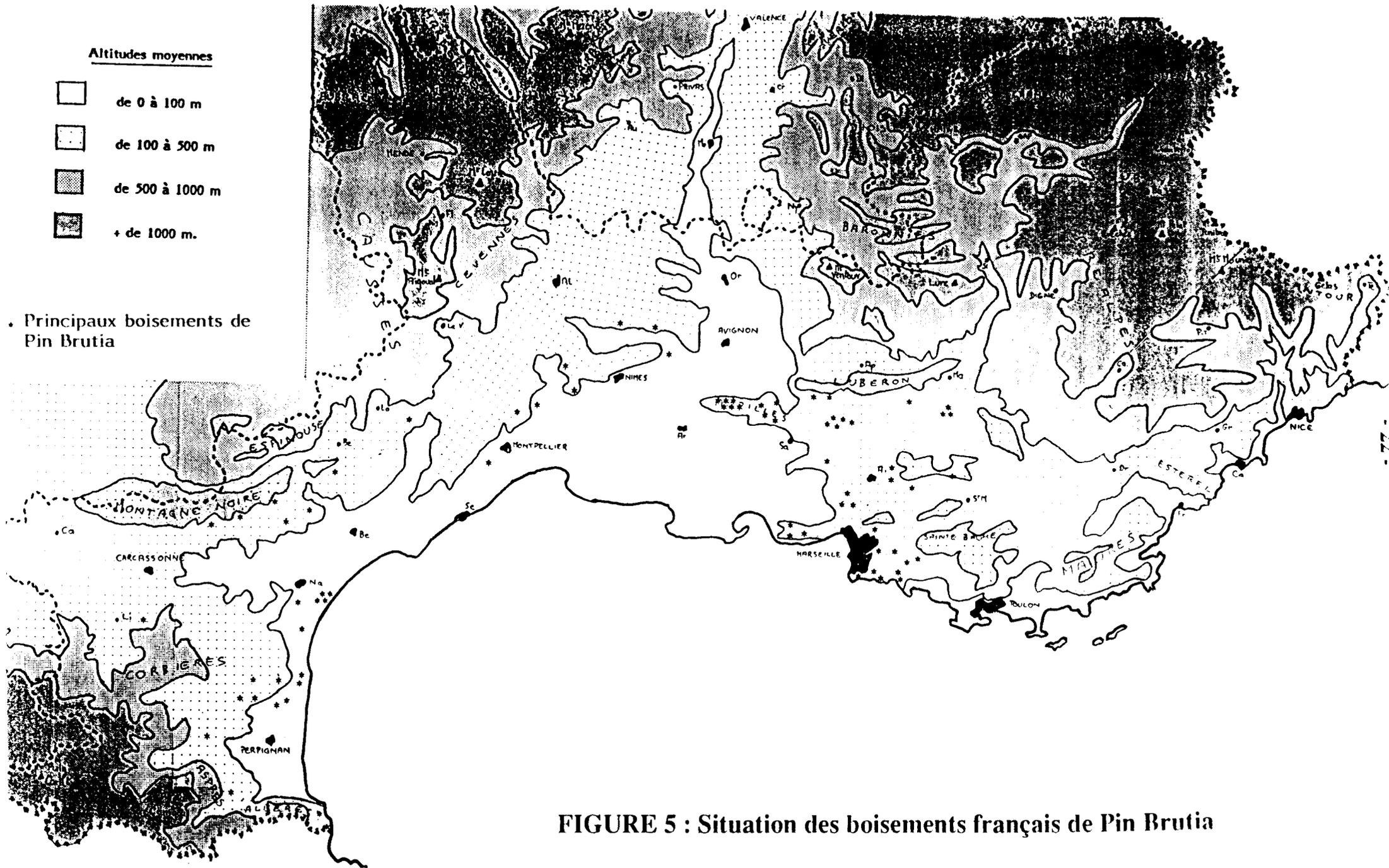
La situation des boisements étudiés est indiquée sur la carte de la figure 5.

On peut noter qu'environ 90 % des relevés se situent à moins de 40 km du littoral et à moins de 400 m d'altitude.

2.3.4. Répartition climatique

Chaque station a été resituée dans une petite région naturelle (RIPERT C., NOUALS D., 1988) dont le climat moyen est défini par un indice à deux chiffres, le premier chiffre décrivant la pluviométrie, et le second, la température (par exemple, un relevé d'indice climatique 85 appartient au groupe pluviométrique 8 et au groupe thermique 5).

Les peuplements de *Pin brutia* ont été rencontrés dans les régions dont les indices sont : 64, 65, 75, 76, 84, 85, 86, 87 (dont 88 % des relevés pour ces trois derniers indices).



Les tableaux suivants donnent les valeurs moyennes des données climatiques auxquelles correspondent ces indices :

PLUVIOMETRIE

(valeurs moyennes)

Groupe Pluviométrique	Pluie annuelle	Pluie estivale	Pluie d'avril
			Pluie septembre + octobre
8	645 mm	92 mm	0,33
7	962 mm	112 mm	0,37
6	789 mm	147 mm	0,41

TEMPERATURE

(valeurs moyennes en °C)

Groupe Thermique	Température moyenne annuelle	Moyenne des minima du mois le plus froid (m)	Moyenne des maxima du mois le plus chaud (M)
7	15,0	5,4	26,9
6	14,2	2,7	29,0
5	13,2	0,8	29,4
4	12,2	0,8	27,5

Ces valeurs correspondent aux zones les plus xériques et les plus chaudes de la région méditerranéenne continentale française.

En terme d'étages de végétation (qui reflètent surtout la température), elles se situent dans les étages thermo-méditerranéen et méso-méditerranéen inférieur. Il y a très peu de relevés dans l'étage méso-méditerranéen supérieur, et aucun dans l'étage supra-méditerranéen.

En terme d'étage bioclimatique d'Emberger, nous nous trouvons principalement dans la zone sub-humide (et ponctuellement semi-aride et humide)

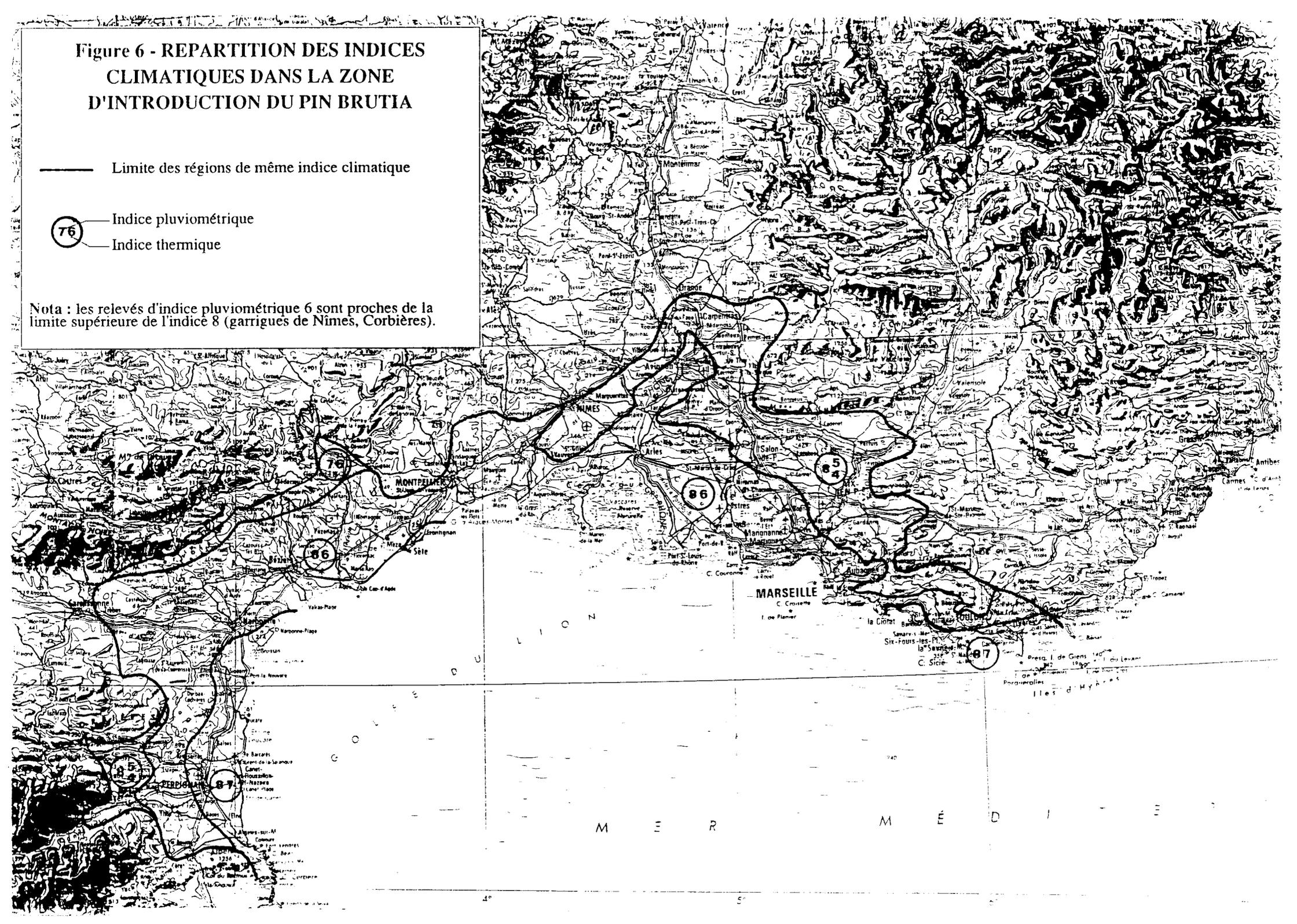
Enfin, les peuplements sont tous situés dans des régions soumises à au moins 1 mois sec au sens de GAUSSEN (la plupart à 2 ou 3 mois secs).

Figure 6 - REPARTITION DES INDICES CLIMATIQUES DANS LA ZONE D'INTRODUCTION DU PIN BRUTIA

— Limite des régions de même indice climatique

○ 76 — Indice pluviométrique
 ○ — Indice thermique

Nota : les relevés d'indice pluviométrique 6 sont proches de la limite supérieure de l'indice 8 (garrigues de Nîmes, Corbières).



Tous ces éléments montrent que les forestiers français ont implanté le Pin brutia uniquement dans la zone la plus sèche et la plus chaude du territoire, alors que dans son aire d'origine, nous avons vu qu'il trouvait son optimum dans les zones à climat méditerranéen atténué.

Pour ce qui concerne l'influence de cette répartition sur la valeur des résultats que l'on pourra obtenir, on peut dire que :

- L'effectif est à peine suffisant pour comparer les indices pluviométriques entre eux.
- Il y a pas assez de relevés dans les régions d'indice pluviométrique 6 et 7 pour étudier comment y varie la fertilité pour le Pin brutia.
- Les effectifs des relevés d'indices thermiques 5, 6 et 7 à l'intérieur des régions d'indice pluviométrique 8 sont suffisants pour en tirer des résultats statistiques.

La répartition géographique des ces indices est figurée sur la carte de la figure 6.

2.3.5. Répartition selon le substrat

Les principaux substrats rencontrés sont :

Calcaire dur :	64 relevés
Calcaire mameux :	28 relevés
Grès calcaire :	20 relevés
Conglomérat calcaire :	10 relevés
Alluvions anciennes ou récentes :	12 relevés
Schistes et micaschistes :	9 relevés

Le reste est réparti entre diverses roches calcaires.

On retiendra surtout de cette répartition que les boisements sont situés sur roche mère calcaire et que l'échantillon sous-représente donc les roches acides.

2.3.6. Conclusions sur la nature de l'échantillon

De ce qui précède, il est essentiel de retenir que l'échantillon présente :

- une grande variabilité génétique,
- un âge peu élevé,
- une localisation dans les climats les plus chauds et secs et sur les roches mères calcaires.

De cela, il ressort que :

- . La valeur de prédiction des résultats obtenus sera amoindrie par l'hétérogénéité génétique.
- . La construction d'un modèle de croissance valable pour la France ne pourra porter que sur les premières années des arbres. D'autre part, la croissance juvénile n'est pas induite uniquement par les facteurs du milieu. Des facteurs tels que le travail du sol interviennent. Il sera donc nécessaire d'en tenir compte.
- . **Les résultats obtenus ne seront fiables qu'aux étages thermo et méso-méditerranéens inférieurs, sur roche mère calcaire**, alors que les connaissances que nous pouvons déjà avoir de cette essence n'interdisent pas, bien au contraire, l'extension de son implantation au delà de cette zone.

Cependant, même si les conditions idéales ne sont pas atteintes, on pourra ainsi mieux cerner écologiquement une essence sur le comportement de laquelle aucune étude n'a encore été réalisée en France.

Enfin, malgré le jeune âge de l'échantillon, il est nécessaire pour les forestiers de disposer dès maintenant de résultats, même si ceux-ci sont susceptibles d'être confirmés et affinés plus tard.

CHAPITRE 3 - ETABLISSEMENT D'UN MODELE DE CROISSANCE EN HAUTEUR

Pour mettre en relation la croissance des arbres et les facteurs du milieu, il est nécessaire d'affecter un **indice de fertilité** (hauteur dominante du peuplement à un âge de référence) à chacun des relevés effectués sur le Pin brutia.

C'est un indice qui permettra de comparer les relevés entre eux, et de chercher des relations entre les variables du milieu et la croissance.

Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un outil permettant de déduire cette hauteur de référence à partir de la hauteur et de l'âge du peuplement au moment où ils ont été mesurés.

Il faut donc bâtir un modèle théorique de croissance à partir des données observées sur le terrain.

La théorie des modèles de croissance des peuplements forestiers est basée sur les deux lois de EICHHORN :

1^{ère} loi : "Dans une région climatiquement homogène, pour une essence donnée, et dans une large gamme de sylviculture (pour des peuplements pleins), la production totale en volume d'un peuplement équiennne, monospécifique et génétiquement homogène ne dépend que de l'âge du peuplement et de la station".

2^{ème} loi (loi de Eichhorn élargie) : "La production en volume depuis la naissance du peuplement n'est fonction que de la hauteur dominante du peuplement (quels que soient la station et l'âge du peuplement).

Il nous faudra donc, dans la pratique, à partir de l'échantillon qui nous est imposé, chercher comment concilier l'obéissance aux lois de Eichhorn et les caractéristiques de l'échantillon.

3.1. Les données

On dispose de :

- 1) 162 couples âge-hauteur, mesurés sur chacun des 162 relevés,
- 2) 45 analyses de tiges, réalisées sur certains des 162 relevés.

Nota : les hauteurs dont nous disposons ne correspondent pas tout à fait à la hauteur dominante usuelle. Cependant, elles ont été relevées dans le même esprit : ne prendre en compte que les arbres destinés à perdurer pendant toute la vie du peuplement.

On a vu lors de l'analyse de l'échantillon que nos données se trouvent approximativement dans les conditions requises par la loi de Eichhorn, mise à part l'homogénéité génétique.

On a donc pris le parti d'établir tout de même ce modèle de croissance en intégrant cette variabilité génétique, de la façon suivante :

- Intégration dans l'échantillon servant à modéliser la croissance d'une proportion des sous-espèces représentées équivalentes à celle de l'échantillon total.
- Vérification en cours de traitement qu'aucune sous-population d'analyses de tiges liées à l'une ou l'autre sous-espèce ne se distinguait.

3.2. - La modélisation

3.2.1. Utilisation des analyses de tige

Le report sur papier des analyses de tiges permet d'obtenir un faisceau de courbes âge-hauteur.

Une première étude visuelle de ce faisceau permet de constater que pratiquement toutes les courbes ont la même forme, la différence provenant simplement de la pente plus ou moins forte de chacune.

On peut donc supposer qu'un seul faisceau de courbes affines peut rendre compte des différents niveaux de croissance en hauteur de l'échantillon.

3.2.1.1. Méthode de modélisation

La méthode utilisée s'inspire directement de celle décrite par DUPLAT et TRAN-HA (Section technique ONF, 1986).

Elle permet d'ajuster en une seule fois un modèle à un ensemble d'analyses de tiges considérées comme représentatives.

3.2.1.2. Choix des analyses de tiges représentatives

20 analyses de tiges ont été choisies sur les 45 disponibles.

Les critères des choix ont été les suivants :

- Répartition par sous-espèce à peu près équivalente à la proportion existante dans les 162 relevés
- Répartition géographique homogène sur l'ensemble de la zone étudiée.
- Niveau des courbes réparti équitablement sur l'ensemble du faisceau, afin d'éviter le sur-échantillonnage des classes moyennes (ce qui était le cas de l'échantillon total).
- Choix des arbres les plus âgés, une fois satisfaites les trois conditions précédentes.

Le faisceau de ces vingt analyses de tiges a été reporté sur la figure 7.

3.2.1.3. Mise en forme des données

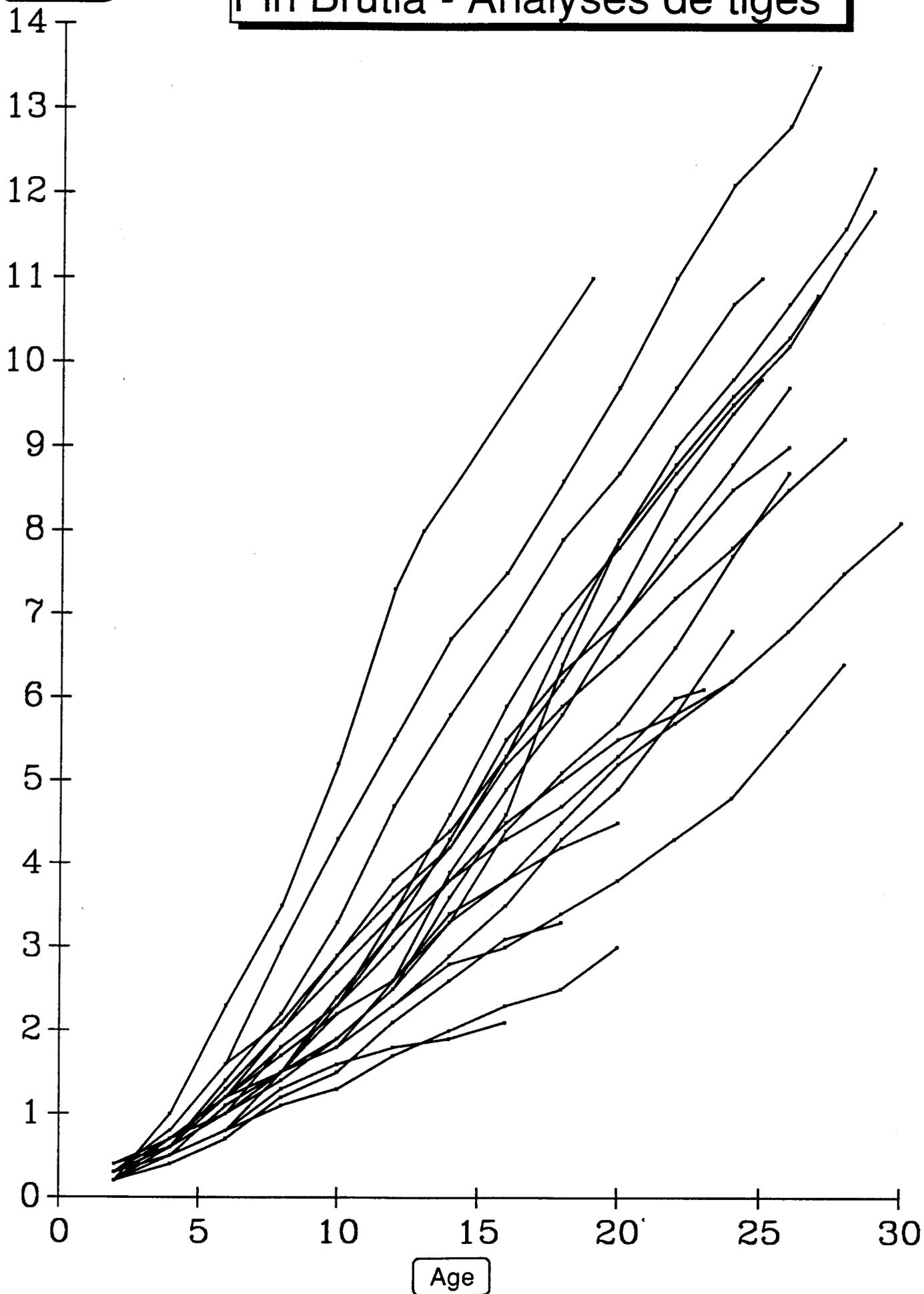
On cherche à obtenir une fonction mathématique

$$H_t = f(t)$$

où H_t est la hauteur dominante à l'âge t , dont le graphe donne un faisceau de courbes qui reproduise bien la forme du faisceau d'analyses de tiges.

Hauteur
(en m)

Pin Brutia - Analyses de tiges



Afin de relier entre eux les points appartenant à une même tige, les modèles mathématiques testés seront en fait écrits sous une forme utilisant des variables muettes x_i

$$H_t = (a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_qx_q) \times (f(t))$$

où t et H sont toujours l'âge et la hauteur et où chaque variable x_i vaut :

1 pour un point appartenant à la tige i ,
0 pour un point n'appartenant pas à la tige i .

Le paramètre a pourra ainsi prendre une valeur particulière a_i pour chaque tige du faisceau, alors que les autres paramètres de la fonction seront astreints à prendre des valeurs communes à toutes les courbes du faisceau.

Le paramètre a_i rendra donc compte du niveau de la courbe dans le faisceau alors que les autres paramètres décriront la forme du faisceau.

Comme nous disposons de 20 courbes, nous aurons ainsi un modèle à 21 variables (t et x_1 à x_{20}) et à $n + 20$ paramètres (b, c, \dots, n et a_1 à a_{20}).

3.2.1.4. Choix du modèle

Deux hypothèses seront testées :

Modèles I

En référence aux résultats déjà obtenus sur d'autres essences, et en particulier des pins (Pin pignon, Pin laricio, Pin sylvestre, etc ...), un modèle de type

$$H_t = e^{bt^c} \text{ ou } H_t = 1 - e^{bt^c}$$

dont le graphe est une sigmoïde, pourrait vraisemblablement convenir pour le Pin brutia, et donc nos données pourraient être ajustées sur le début de cette sigmoïde.

Modèles II

Vu l'allure du faisceau, et sans préjuger de son devenir, un modèle de type polynôme semble bien pouvoir s'ajuster :

$$H_t = bt + ct^2 + \dots + qt^n$$

3.2.1.5) Ajustement du modèle aux données

L'outil utilisé est la procédure NLIN du logiciel SAS, qui est un programme de régression non linéaire.

Il fournit, entre autres résultats :

- les estimations des paramètres du modèle ajusté,
- l'écart type σ entre modèle ajusté et observations

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\hat{H} - H)^2}{n}}$$

où n = nombre d'observations,
 \hat{H} = hauteur estimée,
 H = hauteur observée.

Plus la valeur du σ sera faible, et plus le modèle ajusté sera bon.

On dispose donc, pour juger de la validité des modèles, de la valeur du σ , mais aussi de la comparaison visuelle entre le faisceau des analyses de tiges et le faisceau du modèle ajusté.

3.2.1.6. Résultats

Modèles I : sigmoïdes

Comme cela était prévisible, la convergence vers des valeurs fixes de paramètres n'a pu être obtenue, car ces modèles impliquent un point d'inflexion et une asymptote, et aucune des tiges n'avait l'âge suffisant pour avoir une telle forme. Ce modèle est donc abandonné.

Modèles II : polynômes

Nous avons testé trois modèles :

- II2 : Polynôme du 2^{ème} degré $bt + ct^2$
- II3 : Polynôme du 3^{ème} degré $bt + ct^2 + dt^3$
- II4 : Polynôme du 4^{ème} degré $bt + ct^2 + dt^3 + et^4$

Les valeurs du σ ont été les suivantes :

- II2 ———> $\sigma = 0,383$ m
- II3 ———> $\sigma = 0,328$ m
- II4 ———> $\sigma = 0,324$ m

Ces résultats sont tous les trois satisfaisant, et s'il s'avère que la précision augmente avec le degré du polynôme, on voit que la différence entre II2 et II3 est négligeable et qu'il n'est pas nécessaire de poursuivre au delà du 4^{ème} degré.

D'autre part, la comparaison visuelle des graphes des tiges réelles et des courbes estimées montre que les résultats obtenus à l'aide de ces trois modèles sont très proches.

Le modèle II2 est légèrement moins bon, mais la différence entre les modèles II3 et II4 n'est pas visible, comme le montrent les exemples de la figure 8.

La précision voulue est largement atteinte pour ces deux modèles que l'on peut considérer comme équivalents pour ce qui concerne l'ajustement à notre échantillon. On préférera donc le modèle le plus simple.

Le faisceau des 20 courbes estimées à l'aide de ce modèle est représenté sur la fig. 9.

3.2.1.7. Valeur de prédiction du modèle

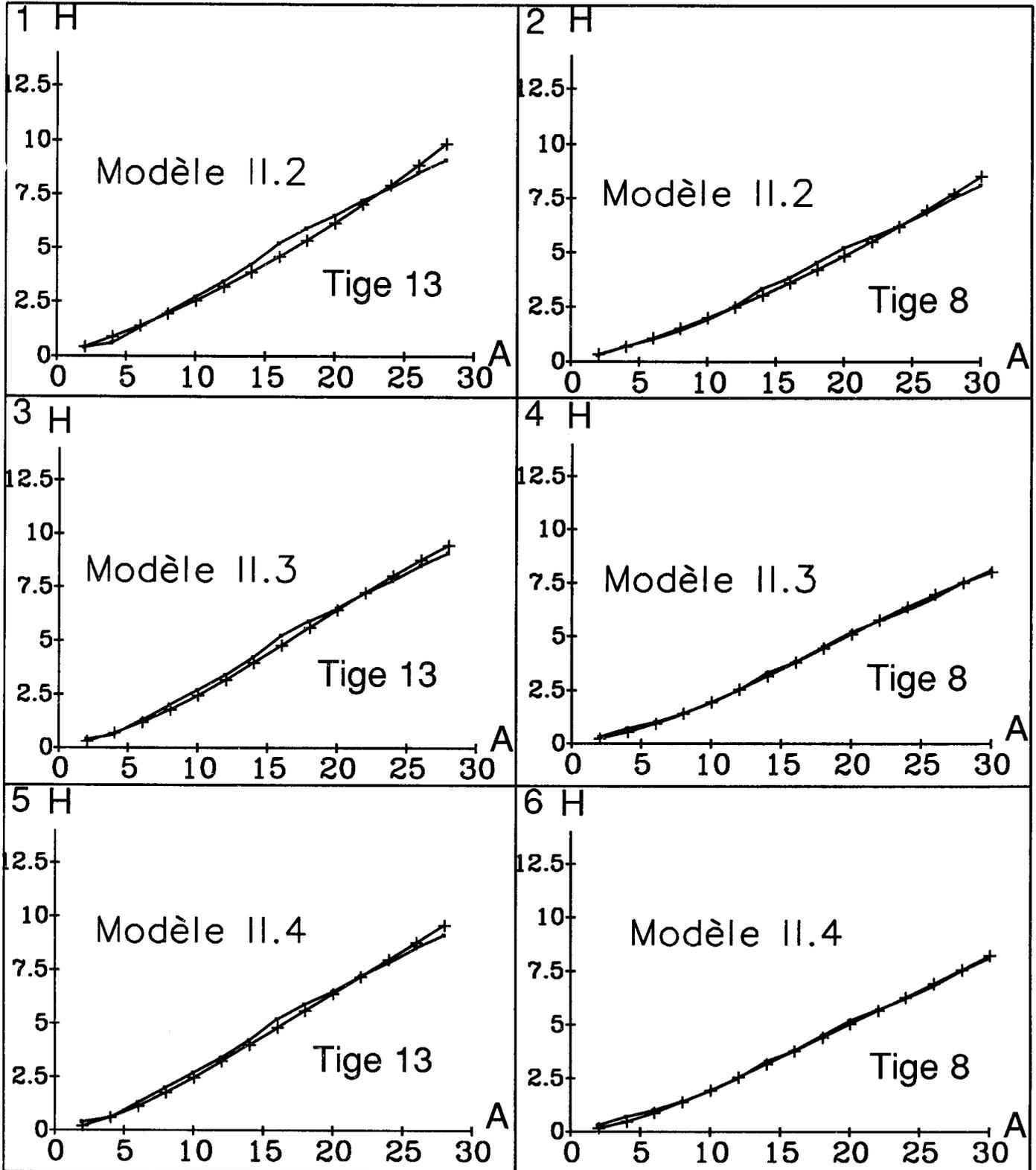
Certaines analyses de tiges n'ayant pas été retenues pour l'échantillon de départ, il est possible de les utiliser pour tester la valeur prédictive du modèle.

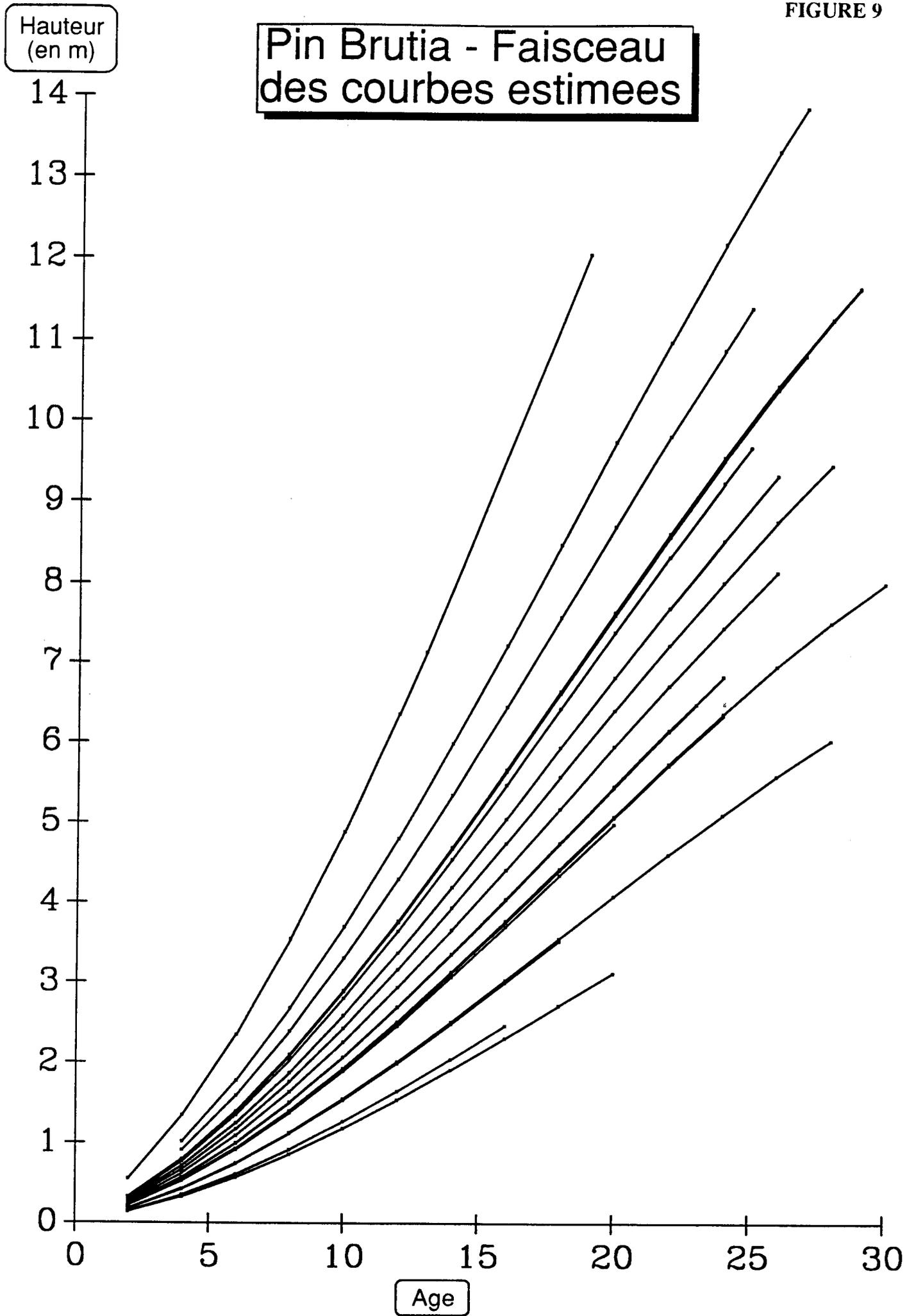
Il s'agit en fait d'une régression non linéaire où l'ajustement se fera sur le seul paramètre de niveau de courbe, les paramètres de forme étant fixés aux valeurs obtenues lors de l'ajustement.

Cinq tiges supplémentaires sont donc choisies. Nous avons retenu les plus âgées, qui avaient été écartées car elles étaient toutes situées vers le milieu du faisceau.

Comparaison des trois modèles de Polynôme

Légende : +- Hauteur estimée -- Hauteur réelle
 H : Hauteur en dm A : Age





La figure 10 montre que le modèle choisi s'adapte bien à ces nouvelles tiges.

Le modèle du polynôme du 3^{ème} degré peut donc être retenu.

3.2.1.8. Utilisation du modèle

Il nous faut maintenant arriver à l'équation du modèle sous sa forme utilitaire.

On a donc :

$$\hat{H} = a_1 (bt + ct^2 + dt^3)$$

où \hat{H} est la hauteur estimée à l'âge t .

Une courbe l est déterminée par la valeur H_r qu'elle prend à un âge de référence donné t_r (par exemple H_{30} à 30 ans).

La valeur de a_1 correspondante est déterminée en écrivant que cette courbe passe par le point (t_r, H_r) .

$$H_r = a_1 (bt_r + ct_r^2 + dt_r^3)$$

ou

$$a_1 = \frac{H_r}{bt_r + ct_r^2 + dt_r^3}$$

et l'équation du modèle devient :

$$\hat{H} = \frac{H_r}{bt_r + ct_r^2 + dt_r^3} (bt + ct^2 + dt^3)$$

Nous adopterons 30 ans comme indice de référence, cet âge pouvant être considéré comme le plus élevé qui soit encore dans le domaine de validité du modèle.

Pour $t = 30$ ans, on peut écrire :

$$\hat{H} = \frac{H_{30}}{A} (bt + ct^2 + dt^3)$$

en notant A , la constante qui vaut $30b + 30^2c + 30^3d$.

C'est l'équation finale utilisable du modèle ajusté, soit, pour le cas présent :

$$\hat{H} = \frac{H_{30}}{52,883} (0,54648 t + 0,089321 t^2 - 0,001626 t^3)$$

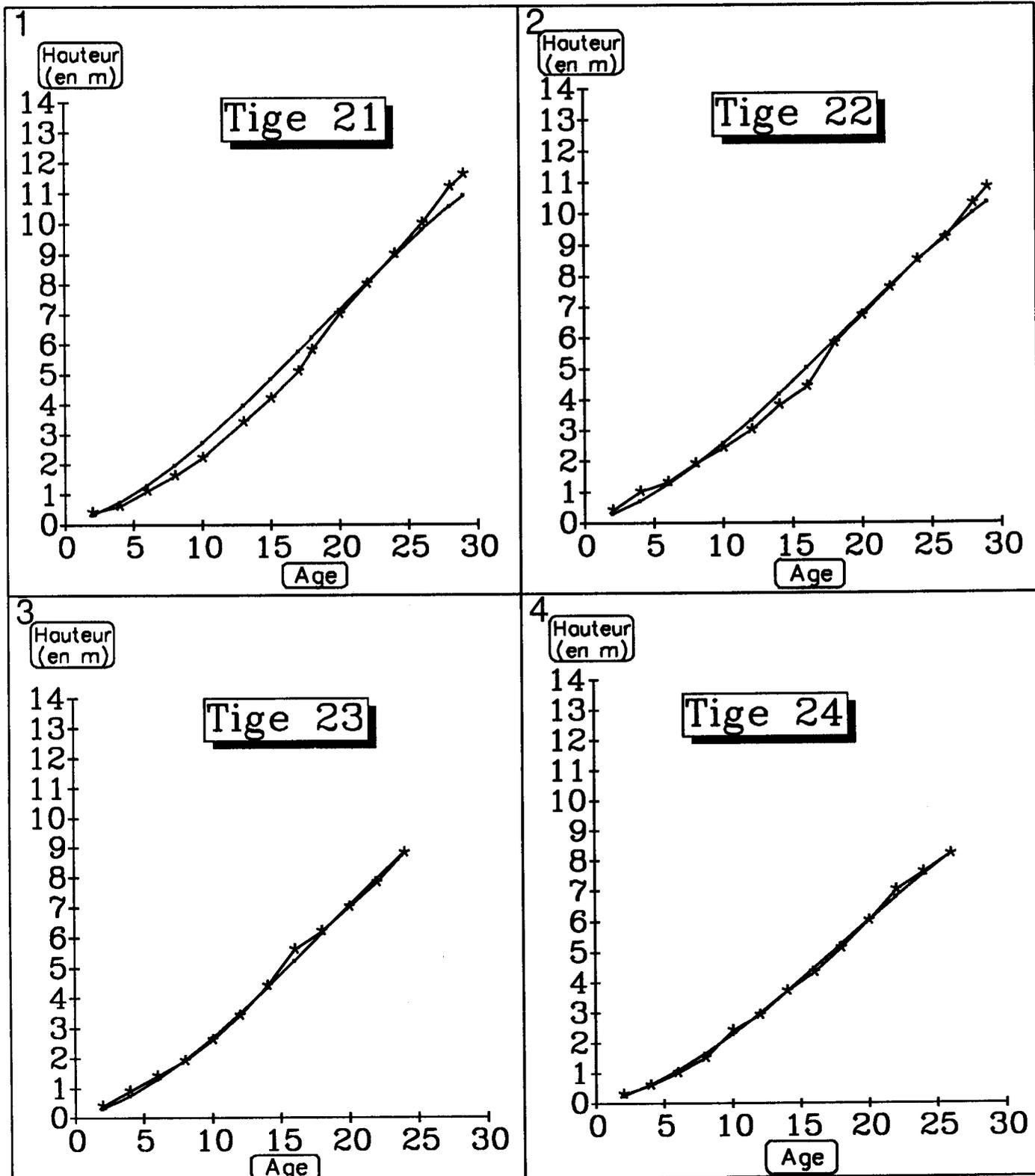
Cette équation permet :

- de représenter le faisceau modélisé par un ensemble de courbes étagées correspondant à des valeurs de H_{30} régulièrement croissante (de 3 m en 3 m par exemple),

PIN BRUTIA

VERIFICATION DE LA VALEUR PREDICTIVE

-- Hauteur estimée +- Hauteur réelle



- de déterminer l'indice de fertilité H_{30} pour chacun de nos relevés, puisque nous connaissons l'âge et la hauteur dominante de chaque peuplement étudié.

L'indice de fertilité H_{30} devient donc :

$$H_{30} = 52,883 \times \frac{H_t}{0,54648 t + 0,08932 t^2 - 0,001626 t^3}$$

Remarque :

Au delà de 30 ans, ce modèle ne peut plus s'appliquer puis qu'aucune de nos analyses de tige ne dépassait cet âge.

Or, 6 relevés ont plus de 30 ans. l'un de ces relevés (64 ans) est éliminé.

Pour les autres (entre 31 et 34 ans), nous avons appliqué une "recette de cuisine" qui a consisté à faire la moyenne des deux indices de fertilité calculés à l'aide de nos deux modèles les plus proches. Nous avons conscience de l'emprisme de ce calcul mais nous pensons que l'erreur qui a pu être ainsi commise reste très minime du fait :

- de la proximité des âges réels par rapport à l'âge de référence,
- de la faible différence des valeurs de H_{30} obtenues avec les deux modèles.

3.2.2. Utilisation du nuage de points âge-hauteur

Nous pouvons maintenant utiliser le nuage de point pour déterminer l'amplitude du faisceau des courbes de croissance estimées pour chacun des relevés.

La figure 11 représente les limites du faisceau englobant l'ensemble du nuage de points.

Les indices de fertilité obtenus s'étagent entre 2,5 et 19 m, mais il faut noter que seulement 3 stations dépassent la valeur estimée de 16 m à 30 ans.

Comme il est d'usage, par commodité, on peut découper ce faisceau par des courbes intermédiaires délimitant des classes de croissance.

Nous avons fait apparaître, sur la figure 12, 4 classes, englobant tous les cas rencontrés sauf 2.

3.3. Comparaison des courbes de croissance avec d'autres données dendrométriques

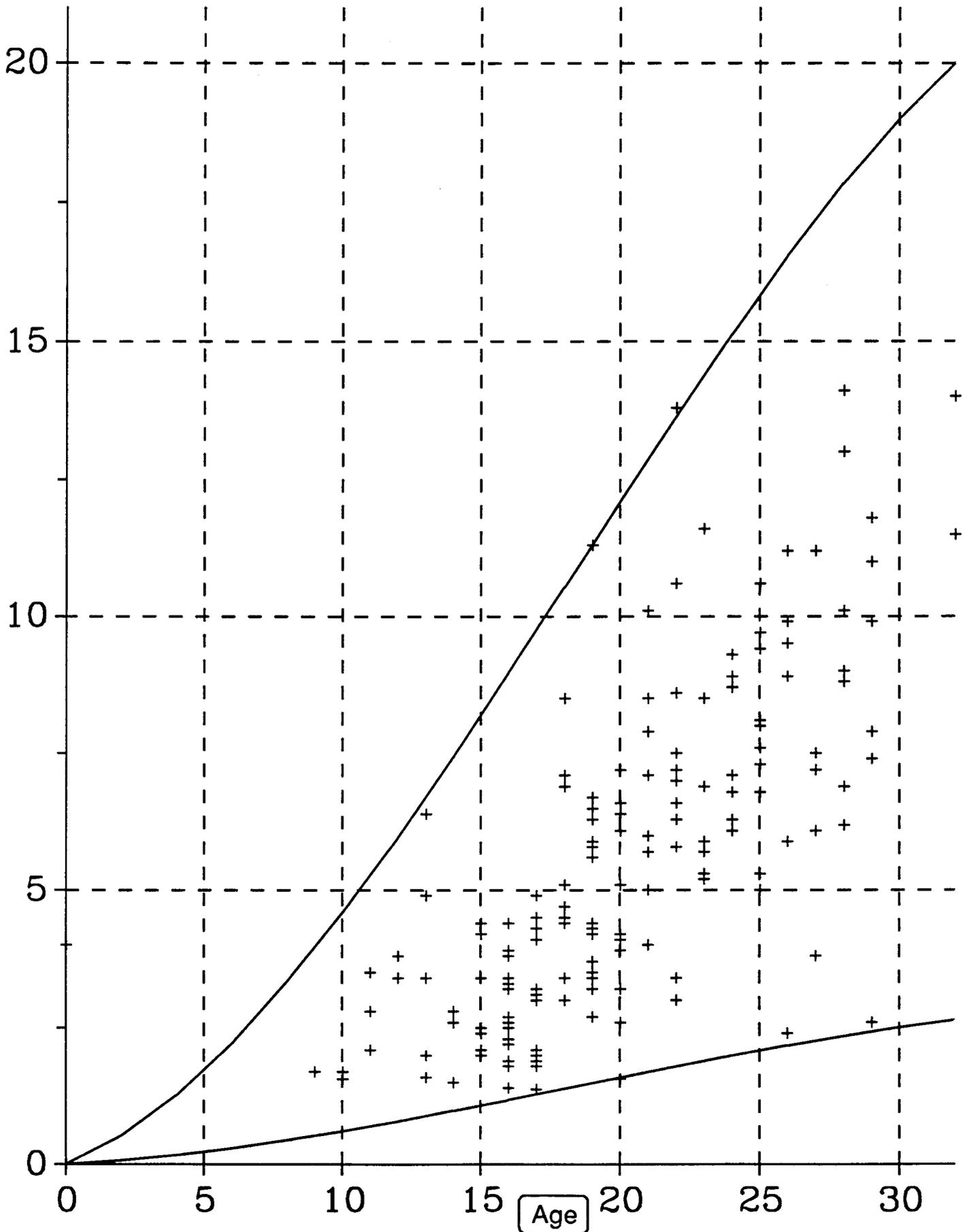
Sur la figure 13, nous avons représenté toutes les données âge - hauteur que nous avons trouvées dans la bibliographie (cf. 1.5.3.1.), afin de les comparer avec notre faisceau de courbes.

Nous pouvons faire deux constatations :

- 1 - Notre faisceau est difficilement ajustable au faisceau fourni par la Station de Recherche Forestière de Lattaquie.
- 2 - L'amplitude des hauteurs montre que les reboisements français sont décalés vers le bas par rapport aux peuplements de l'aire naturelle.
Ceci peut être considéré comme une information parmi celles tendant à montrer que le Pin brutia n'a pas été introduit en France dans son optimum écologique.

Hauteur
(en m)

Pin brutia - Nuage Age-Hauteur Amplitude du faisceau



Hauteur
(en m)

Pin brutia - Classes de croissance

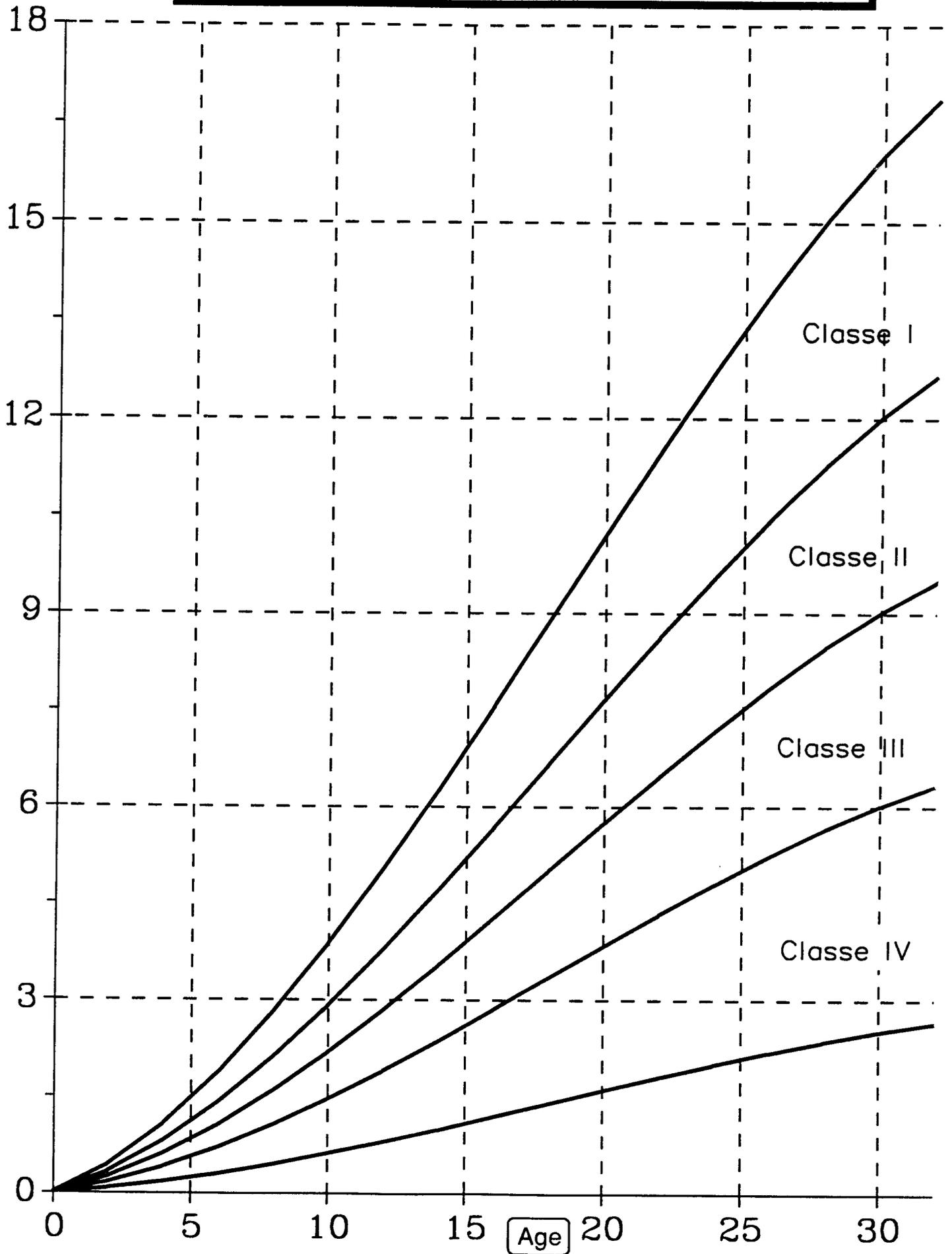
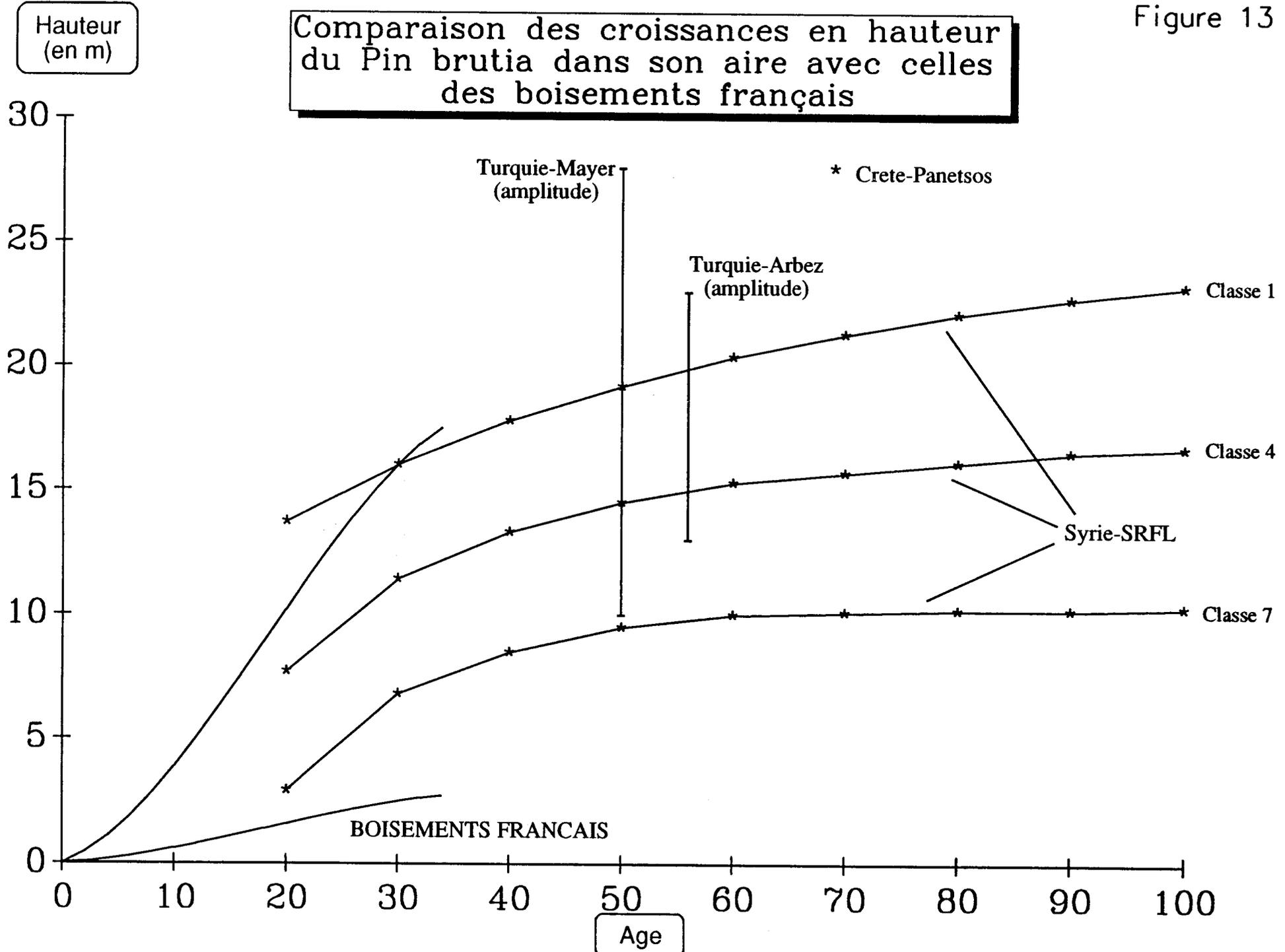


Figure 13

Comparaison des croissances en hauteur
du Pin brutia dans son aire avec celles
des boisements français



CHAPITRE 4 - LA CROISSANCE DU PIN BRUTIA EN RELATION AVEC LES FACTEURS DU MILIEU

Nous avons maintenant un critère d'évaluation de la fertilité d'une station, à savoir la hauteur dominante supposée atteinte à l'âge de 30 ans, des Pins brutia qu'elle supporte.

Nous faisons l'hypothèse que cet indice varie en fonction des facteurs stationnels, édaphiques et climatiques, régnant au point de relevé.

Nous allons tâcher tout d'abord, facteur par facteur, puis en réalisant des combinaisons de facteurs, et enfin en étudiant les facteurs tous ensemble, de faire apparaître leur influence sur l'indice de fertilité.

4.1. Influence de chaque facteur considéré isolement

Plusieurs méthodes statistiques peuvent être utilisées pour ce travail.

Nous en avons utilisé deux, le test du chi-2 et l'analyse de variance.

Le test du chi-2, qui teste l'hypothèse que les modalités de deux variables sont indépendantes, s'est avéré moins fin pour détecter l'influence des facteurs du milieu sur la fertilité, souvent parce qu'il oblige à découper chaque variable en modalités à effectifs à peu près équivalents, ce qui provoque une fréquente perte d'information.

Nous nous sommes orientés ensuite vers l'analyse de variance, qui a donné de meilleurs résultats. Ceux-ci sont développés ci-après :

4.1.1. Méthode d'étude : l'analyse de variance

un programme informatique statistique du logiciel SAS permet d'utiliser cette méthode.

Il procède en deux étapes :

- A l'aide d'un test dit de FISHER, il teste l'hypothèse H_1 : toutes les moyennes des fertilités des diverses modalités du facteur étudié sont égales, contre l'hypothèse H_2 : pour au moins une de ces modalités, on obtient une moyenne significativement différente des autres.
Cette hypothèse est appréciée par le calcul d'un seuil de significativité.
La valeur de ce seuil nous permet d'accepter ou de rejeter l'hypothèse H_1 . Plus la valeur est faible, plus on peut accepter H_2 avec sûreté.
- Ensuite, par un test de STUDENT, le programme compare deux à deux les moyennes des fertilités de chaque modalité et détermine celles qui sont significativement différentes.

Pour ces deux tests, et selon l'habitude en statistiques, le seuil de significativité retenu est 5 %.

Pour chaque facteur, les résultats de cette analyse sont présentés sous la forme d'un tableau avec, en tête, la valeur du seuil S de significativité, et, pour chaque modalité, l'indication de :

- N : nombre de relevés où la modalité est présente,
- H_{30} : moyenne des indices de fertilité (en m),
- σ : écart type à la moyenne des indices de fertilité (en m),
- T : résultat du test de STUDENT de comparaison des moyennes. Pour chaque modalité, on trouvera une ou plusieurs lettres. Les modalités ayant une lettre en commun ne seront pas significativement différentes.

Les modalités sont classées par ordre de fertilité décroissante.

Si l'effectif est trop faible (inférieur ou égal à 5) pour que le test ait un sens, on notera X.

Les variables continues, comme l'altitude ou la profondeur du test tarière, ont été divisées en classes, pour rendre le traitement possible. Les découpages ont d'ailleurs dû être recommencés plusieurs fois pour faire apparaître certaines différences.

Pour alléger ce document, ne sont présentées dans les tableaux ci-dessous, que les variables qui ont une influence significative sur la croissance.

4.1.2. Influence de la sous-espèce

Il n'y a pas de différence au seuil de 5 % entre le Pin brutia et le Pin eldarica, ce qui tendrait à justifier notre décision de traiter conjointement les deux sous-espèces.

Toutefois, cette différence est significative au seuil de 10 %, à l'avantage de P. brutia.

4.1.3. Influence du climat

Les effectifs des types climatiques a priori les plus favorables étant trop faibles pour que les tests aient un sens, il n'apparaît pas, entre les climats bien représentés, de différence vis à vis de la fertilité.

4.1.4. Influence des facteurs stationnels

Distance de la mer

S = 0,0006

	3	2	1
N	62	54	46
H_{30}	9,1	9,0	7,5
σ	3,2	3,7	2,4
T	A	A	B

- 1 : moins de 5 km
- 2 : de 5 à 30 km
- 3 : plus de 30 km

Les différences de fertilité entre les boisements les plus littoraux et les autres sont très hautement significatives.

(C'est bien sûr à proximité de la mer que le climat est le plus difficile).

Altitude

Il n'y a pas de différence de fertilité selon l'altitude. Il faut dire que tous les relevés sont situés en-dessous de 600 m, ce qui est une amplitude assez faible.

Exposition du versant

S = 0,0004

	Toutes	Nord	Ouest	Est	Sud
N	34	22	34	37	35
H ₃₀	10,4	8,9	8,9	8,1	7,1
σ	3,9	2,8	3,2	2,8	2,5
T	A	AB	B	BC	C

Le test est très hautement significatif (seuil < 1 %).

Les terrains plats, d'exposition quelconque, présentent les meilleures fertilités

Les expositions Nord et Ouest s'opposent ensuite à l'exposition Sud. Le fait que l'exposition Ouest semble plus favorable doit vraisemblablement provenir d'un problème d'échantillonnage. On ne voit pas en effet quelle explication à ce fait pourrait être fournie par le fonctionnement du milieu.

Exposition de la station

S = 0,0027

	O	Toutes	N	NE	SO	E	SE	S	NO
N	18	32	13	13	12	18	26	21	9
H ₃₀	10,1	10,1	8,8	8,8	8,2	8,1	7,8	7,3	7,2
σ	2,9	2,6	3,4	3,1	3,2	3,7	3,0	2,4	2,6
T	A	A	AB	AB	AB	AB	B	B	B

Les expositions Ouest et toutes s'opposent aux expositions Sud-Est, Sud, et Nord-Ouest.

Là encore, ce résultat ne peut s'expliquer que par un biais d'échantillonnage pour les expositions Ouest et Nord-Ouest.

Position topographique

S = 0,0003

	6	0	1	5	4	3	2
N	13	8	32	26	28	37	18
H ₃₀	11,8	10,4	9,1	8,8	8,6	7,4	7,3
σ	3,7	3,7	3,3	3,2	2,6	2,9	2,5
T	A	AB	B	BC	BC	C	C

- 6 : Thalweg, vallon
- 0 : plaine, vallée
- 1 : plateau, replat
- 5 : bas de versant
- 4 : mi-versant
- 3 : haut de versant
- 2 : sommet, croupe

Ce facteur est très hautement significatif.

La fertilité croît depuis les positions les plus drainées vers les positions réceptrices, les modalités thalweg et plaine étant les plus favorables, au contraire des hauts de versant, sommets, et croupes.

Pente

S = 0,0108

	1	2	3
N	61	37	64
H ₃₀	9,6	8,5	7,8
σ	3,4	3,2	3,0
T	A	AB	B

- 1 : moins de 10 %
- 2 : de 11 à 20 %
- 3 : plus de 20 %

Les pentes faibles sont donc plus favorables que les pentes fortes, la raison en étant que le drainage y est moins intense.

4.1.5. Influence des facteurs édaphiques

Roche mère

18 types de roche mère sont représentés. Afin de ne pas aboutir à des effectifs trop modestes par modalité, nous avons regroupés ces roches mère par "familles".

S = 0,0001

	6	5	7	2	3	4	1
N	12	10	9	16	28	20	64
H ₃₀	13,3	10,3	9,6	9,6	8,3	8,2	7,5
σ	3,5	3,5	1,6	2,7	3,3	3,0	2,6
T	A	B	B	B	BC	BC	C

- 1 : calcaire dur
- 2 : calcaires divers
- 3 : calcaires mameux
- 4 : grès calcaire
- 5 : conglomérat calcaire
- 6 : alluvions, roches meubles
- 7 : roches cristallines

Ce facteur influence la fertilité avec un maximum de significativité.

Les alluvions se détachent de toutes les autres modalités, et les calcaires durs sont les roches les moins favorables et s'opposent aux conglomérats calcaires (il s'agit dans notre échantillon, de conglomérats sableux facilement altérables) aux roches cristallines (schistes principalement) et aux calcaires divers (calcaires en plaquette, calcaires dolomitiques, calcaire tendres).

Affleurement de la roche mère

Ici encore, pour une question d'effectif, les modalités présentes ont été regroupées.

$$S = 0,0001$$

	1	2
N	137	25
H ₃₀	9,1	6,1
σ	3,2	2,3
T	A	B

1 : moins de 10 % d'affleurement

2 : plus de 10 % d'affleurement

La significativité de ce facteur est ici aussi maximale, pour des raisons évidentes.

Nature de la formation superficielle

$$S = 0,0001$$

	4	6	3	2	1
N	10	7	35	108	2
H ₃₀	13,6	11,2	9,3	7,9	5,9
σ	3,7	2,2	3,7	2,6	1,9
T	A	AB	B	C	X

1 : roche mère nue

2 : altération

3 : colluvion

4 : alluvion

6 : restanque

Ce facteur, dont la significativité est maximale, oppose les sols issus de l'altération de la roche mère en place à toutes les autres modalités.

A l'inverse, les formations alluviales montrent de très bonnes fertilités. La modalité restanque (nom donné aux anciennes terrasses cultivées, soutenues par un mur en pierres sèches), est faiblement représentée, mais est bien corrélée aux bonnes fertilités.

Pendage de la roche mère

Ce facteur a trop rarement pu être noté pour qu'on puisse le faire apparaître dans une analyse (une centaine de valeurs manquantes).

Test tarière

Plusieurs essais de découpages en classes ont été nécessaires pour que ce descripteur apparaisse comme significatif.

S = 0,0064

	3	2	1
N	43	58	61
H ₃₀	9,7	8,9	7,7
σ	3,4	3,0	3,1
T	A	A	B

1 : moins de 20 cm
2 : de 20 à 30 cm
3 : plus de 30 cm

Il semble que ce test ait été effectué de façon non homogène par les différents enquêteurs, ce qui a amoindri sa valeur, qui aurait dû s'avérer meilleure.

Pourcentage de cailloux

En affleurement

S = 0,0006

	1	2	3	4
N	30	34	43	55
H ₃₀	9,9	9,7	8,6	7,4
σ	3,1	3,2	3,2	3,0
T	A	A	AB	B

1 : moins de 10 %
2 : de 10 à 30 %
3 : de 30 à 60 %
4 : plus de 60 %

Dans le sol

S = 0,0004

	1	2	3	4
N	25	55	43	39
H ₃₀	10,4	8,6	9,1	7,1
σ	3,2	3,3	3,3	2,5
T	A	B	AB	C

Nota : un caillou doit mesurer plus de 2 cm dans sa plus grande dimension

Ces deux descripteurs sont très hautement significatifs, avec toutefois une petite incohérence puisque, pour les cailloux dans le sol, les moyennes des fertilités seraient meilleures dans la modalité 3 que dans la modalité 2. Mais cette différence n'est pas significative. Ce petit problème pourrait être dû à la plus grande difficulté pour les enquêteurs d'estimer un pourcentage en volume qu'un pourcentage en surface.

Texture de la terre fine

L'analyse n'a pas mis en évidence la corrélation de ce facteur avec la fertilité.

Réaction HCl de la terre fine

$$S = 0,1344$$

Ce facteur n'est pas significatif aux conditions requises, mais la fertilité a tendance à être meilleure lorsque la réaction est nulle, par opposition aux réactions nettement visibles et fortes.

4.1.6. Influence des facteurs anthropiques

Parmi ces facteurs, les seuls pouvant être utilisés avec une certaine fiabilité sont les antécédents culturaux et le travail du sol, et encore faut-il observer que les valeurs manquantes sont nombreuses lorsque le peuplement commence à être trop âgé pour déduire avec certitude ces deux éléments.

Antécédents culturaux

	4	2	1	3
N	5	11	25	105
H ₃₀	11,6	11,2	10,7	7,7
σ	3,0	2,4	4,0	2,6
T	X	A	A	B

$$S = 0,0001$$

- 1 : Terre de culture
- 2 : Lande
- 3 : Garrigue ou maquis
- 4 : Forêt

L'influence des antécédents sur la fertilité présente une significativité maximum, et oppose les landes et terres de culture aux espaces naturels dégradés.

Les boissements de Pins brutia installés en substitution d'un autre peuplement forestier sont trop peu nombreux pour en tirer des conclusions valables, mais semblent eux aussi être plus favorables que les faciès dégradés.

Travaux du sol

	2	4	1	3
N	9	18	20	79
H ₃₀	10,1	9,7	9,1	7,8
σ	4,3	2,9	4,1	2,5
T	A	A	AB	B

$$S = 0,0531$$

- 1 : pas de travail du sol
- 2 : labour
- 3 : rootage en ligne
- 4 : banquettes soussolées

La préparation du terrain apparaît comme influant significativement l'indice de fertilité mais appelle quelques commentaires.

Le choix d'un type de préparation du sol est souvent influencé par les conditions stationnelles : on ne peut labourer un sol rocheux ni soussoler des parcelles inaccessibles au bulldozer. Les stations sans travail du sol sont souvent situées en fond de vallon, ou bien sur d'anciennes restanques ou terres de culture, qui sont, on l'a vu, plus favorables que le cas général.

Par contre, on peut très bien opposer le soussolage en ligne aux banquettes soussolées, qui se pratiquent dans les mêmes milieux, la banquette apportant, semble-t-il un gain de croissance, du moins dans les premières années.

4.1.7. Conclusions sur l'action des facteurs considérés isolément

Nous pouvons maintenant établir la liste des facteurs (du moins de leurs descripteurs) qui ont une influence sur la croissance du Pin brutia, ainsi que les modalités qui y sont favorables ou défavorables.

Il s'avère que pour notre échantillon, qui nous l'avons vu, ne présente pas de variations climatiques importantes, les facteurs les plus significatifs ($S < 0,0001$) sont relatifs au **substrat**, c'est à dire à la roche mère et au matériau sur lequel poussent les arbres, à l'affleurement de la roche mère, et à la nature de l'occupation du sol avant la plantation.

Viennent ensuite ($0,0001 < S < 0,01$) des facteurs édaphiques et stationnels qui sont tous relatifs au **bilan hydrique**, et surtout à la capacité des sols à retenir l'eau.

Enfin, deux facteurs significatifs au seuil de 5 % contribuent eux aussi à la réserve en eau du sol : pente et travail du sol.

Cependant, la plus ou moins bonne valeur du seuil de significativité peut être liée au découpage en modalités.

En effet, même si on a recherché un découpage optimum, il en résulte toujours une certaine perte d'information.

Le classement des facteurs en fonction du seuil de significativité n'a donc pas de valeur absolue, même s'il a certainement un sens.

Le tableau qui suit donne une vue d'ensemble sur la façon dont les modalités de ces différents facteurs agissent sur la croissance.

**ACTION DES FACTEURS DU MILIEU CONSIDERES Isolement
SUR LA CROISSANCE DU PIN BRUTIA**

Facteurs	Très favorable	Favorable	Peu influent	Défavorable
Roche mère	Alluvions	Conglomérats tendres Calcaire tendre Calc. en plaquettes Calc. dolomitique Schistes	Calcaires massifs Grès calcaire	Calcaire dur
Affleurement de la roche mère	Moins de 10 %			Plus de 10 %
Formation superficielle	Alluvions	Restanques Colluvions	Abris	
Antécédents culturaux	Terre de culture ou lande		Garrigues ou maquis	
Position Topographique	Thalweg Vallon	Plaine	Bas de versant Mi-versant plateau	Haut de versant Sommet - Croupe
Exposition du Versant ou de la station	Toutes exposition (terrain plat)		Nord, Est, Ouest	Sud
Affleurement de cailloux	Moins de 30 %		30 à 60 %	Plus de 60 %
Cailloux dans le sol	Moins de 10 %		10 à 60 %	plus de 60 %
Test tarière	> 20 cm			< 20 cm
Distance du littoral	Plus de 5 km			Moins de 5 km
Pente	Moins de 10 %		de 10 à 20 %	Plus de 20 %
Travail du sol	Labour total Banquettes soussolées			

Remarque : Les différentes modalités des facteurs ont été répartis dans les colonnes favorables et défavorables lorsque leur moyenne de fertilité était significativement différentes. La colonne très favorable comprend les modalités dont la moyenne est de l'ordre d'au moins 12 m à 30 ans, et est significativement différente de tous les autres cas.

-  Facteurs les plus significatifs
-  Facteurs très hautement significatifs
-  Facteurs hautement significatifs

4.2. Influence des facteurs du milieu pris deux à deux

Il s'agit de réaliser des combinaisons de deux facteurs afin de mettre en évidence les interactions pouvant exister entre eux.

Les choix des facteurs n'est bien sûr pas fait au hasard, et on ne combine que ceux qui peuvent avoir une relation entre eux, qui peut être de divers types :

- ils sont naturellement liés (ex. : topographie, formation superficielle),
- ils se renforcent ou se compensent (cailloux en affleurement, cailloux dans le sol),
- ils ne sont importants que selon certaines modalités d'un autre facteur (exposition, pente ...).

On crée donc une nouvelle variable ayant un nombre de modalités égal au produit des modalités des deux facteurs que l'on croise. Pour éviter d'éclater l'échantillon en un grand nombre de modalités d'effectif trop réduit, il a fallu regrouper certaines valeurs des variables de départ, en tenant compte des résultats de l'analyse à un seul facteur. Il en résulte malheureusement une inévitable perte d'information.

Ensuite, on soumet cette nouvelle variable à une analyse de variance, comme précédemment.

De nombreuses combinaisons ont été essayées, mais peu d'entre elles ont apporté un plus par rapport à l'analyse à un seul facteur, alors que nous espérons beaucoup plus d'informations de ce type de traitement. La perte d'informations est peut-être trop importante du fait des regroupement pour que les résultats ne s'en ressentent pas.

Nous avons présenté, ci-après, quelques uns des résultats qui nous ont paru les plus intéressants.

Position topographique x test tarière

Chaque modalité est classée par ordre décroissant des moyennes de fertilité et suivie du résultat du test de comparaison des moyennes.

1 Bas de versant - Thalweg ; test tarière > 20 cm	A
2 Haut et mi-versant ; test tarière > 30 cm	AB
3 Plateau - replat ; test tarière > 20 cm	AB
4 Sommet ou croupe ; test tarière > 20 cm	AB
5 Plateau - replat ; test tarière < 20 cm	BC
6 Bas de versant - Thalweg ; test tarière < 20 cm	BCD
7 Haut versant - mi-versant ; test tarière < 30	CD
8 Sommet - croupe ; test tarière < 20 cm	D

Au delà de la confirmation des résultats des analyses à un seul facteur, il est intéressant de constater que certaines positions topographiques peuvent être subdivisées quant à leur fertilité par la profondeur du test tarière (voir modalités 1 et 6, 2 et 7, 4 et 8).

Position topographique x formation superficielle

Le principal apport de cette analyse est d'avoir montré que la position de plateau replat, avec une formation superficielle d'altération était beaucoup plus défavorable que la même position avec colluvion (et bien sûr alluvions dans le cas de terrasses alluviales). Si on avait les éléments pour le faire, on pourrait certainement corréliser aussi ces deux cas de figure avec leur position sur le versant.

Test tarière x Exposition du versant

Les positions les plus favorables sont :

- test tarière > 20 cm, à exposition quelconque (=terrain plat),
- et test tarière > 30 cm, en exposition Nord.

Ces modalités s'opposent significativement à :

- test tarière < 20 cm, exposition Est,
- et test tarière < 30 cm, exposition Sud.

Les autres modalités ne sont pas différentes du reste de l'échantillon.

On a ainsi mis en lumière certaines conditions dans lesquelles l'exposition influe sur la fertilité.

Pente x Exposition de la station

Les stations à pente quasi-nulle (< 5 %) sont toujours les plus favorables (l'exposition ne joue alors aucun rôle), mais on trouve avec elles les stations à pente faible (< 20 %) en exposition Ouest. Or, sur les pentes faibles, le rôle de l'exposition est minime, ce qui pourrait confirmer que la relativement bonne fertilité des expositions Ouest serait due à un hasard d'échantillonnage.

Ces deux situations sont opposées aux pentes > 5 % en exposition Sud, et > 20 % en exposition Est.

Les autres résultats amènent peu de suppléments d'information par rapport aux analyses à un seul facteur.

Nous pensons tout de même avoir ainsi confirmé l'importance des mécanismes d'écoulement et de rétention de l'eau pour la croissance du Pin brutia.

4.3. Hiérarchisation des facteurs du milieu

Nous connaissons maintenant les facteurs du milieu qui ont le plus d'influence sur la croissance du Pin brutia.

Il faudrait maintenant créer une hiérarchie parmi ces facteurs, qui permettrait d'évaluer, à partir de leur connaissance, les potentialités d'une station pour cette essence.

Nous aborderont ce travail en deux temps par :

- une approche sur les seuls facteurs du milieu,
- une approche incluant la végétation, considérée comme un descripteur synthétisant les facteurs du milieu.

4.3.1. Choix d'une méthode : la segmentation

Cette méthode cherche à expliquer les variations d'une donnée (ici l'indice de fertilité) par l'ensemble des facteurs relevés sur la station.

Elle opère par des divisions dichotomiques successives de l'échantillon total, déterminées à chaque étape par le facteur qui a le plus d'influence sur l'indice de fertilité.

On aboutit ainsi à une hiérarchisation des facteurs qui déterminent la croissance.

Cette méthode, malgré son aspect multidimensionnel, ne considère les variables qu'une à une, et peut donc être jugée inférieure à d'autres types d'analyses plus globales.

Elle fournit cependant les résultats les plus faciles à utiliser du point de vue pratique, et la précision obtenue grâce à elle a jusqu'à présent été suffisante.

4.3.2. Mode opératoire de la segmentation

L'ensemble de départ est constitué des 162 relevés de terrain.

Le programme recherche, pour chaque facteur, la dichotomie réalisée sur ses modalités qui permet d'obtenir deux sous-groupes aussi différents que possible entre eux vis à vis de la fertilité.

Est retenu ensuite le facteur pour lequel la partition envisagée éclate le mieux notre échantillon par rapport à la fertilité.

On obtient ainsi deux sous-populations qui subissent à leur tour le même traitement.

Cette procédure se répète jusqu'à la non-partition possible des groupes du fait :

- d'effectifs trop faibles (nous avons retenu dans un 1^{er} temps la taille minimale de 8 individus par groupe)
- de non-dépassement des seuils minima de variance préalablement choisis pour autoriser le partage.

Le résultat final est constitué de groupes finaux de relevés pour lesquels sont donnés :

- une moyenne des indices de fertilité,
- un écart type à cette moyenne,
- un effectif des relevés qu'ils contiennent.

L'explication des bases théoriques de cette méthode figure en annexe.

4.3.3. Résultats et commentaires

Les résultats sont donnés sur la figure 15.

Nous pouvons constater que les premiers niveaux de dichotomie correspondent aux facteurs déjà mis en évidence lors des analyses de variance, en particulier l'importance du substrat qui est ici confirmée, et qui isole une sous-population composée par les stations à roche mère facilement altérable en un matériau favorable, se subdivisant ensuite selon la position topographique.

L'autre sous-groupe, sur calcaires divers moins favorables, est éclaté selon le pourcentage d'affleurement de cailloux, puis d'affleurement rocheux pour une part, et selon le type climatique d'autre part (les nuances climatiques plus fraîches apparaissent donc plus favorables).

Les divisions qui viennent ensuite ne nous semblent plus très stables quant à leur valeur prédictive, car il semble bien qu'elles soient dues à des hasards d'échantillonnage :

1. L'exposition Est isole un sous-groupe défavorable et nous retrouvons ce qui nous avait intrigué lors de l'analyse de variance.
2. L'éclatement selon lequel les altitudes les plus basses paraissent les plus favorables paraît lui aussi curieux. L'examen du listing montre que deux facteurs présentaient une variance presque aussi forte : la pente et la topographie.

L'hypothèse raisonnable semble donc que, aux altitudes plus élevées correspondent des pentes fortes et des topographies défavorables.

On retrouve le même phénomène un peu plus loin lorsque les distances les plus proches du littoral apparaissent comme plus favorables : une correspondance avec le facteur roche mère apparaît : les boisements sur grès calcaire, sont situés près de la mer (région de Ceyreste, la Ciotat). Le véritable facteur explicatif n'est donc pas sorti en premier.

4.3.4. Critique de la méthode

Les 2 exemples ci-dessus montrent bien les principales faiblesses de la méthode : il est impossible pour le programme de diviser un groupe sur une combinaison de modalités de facteurs. En effet, on sait bien que, à un niveau donné, une variable combinée pourrait permettre une meilleure dichotomie qu'une variable simple.

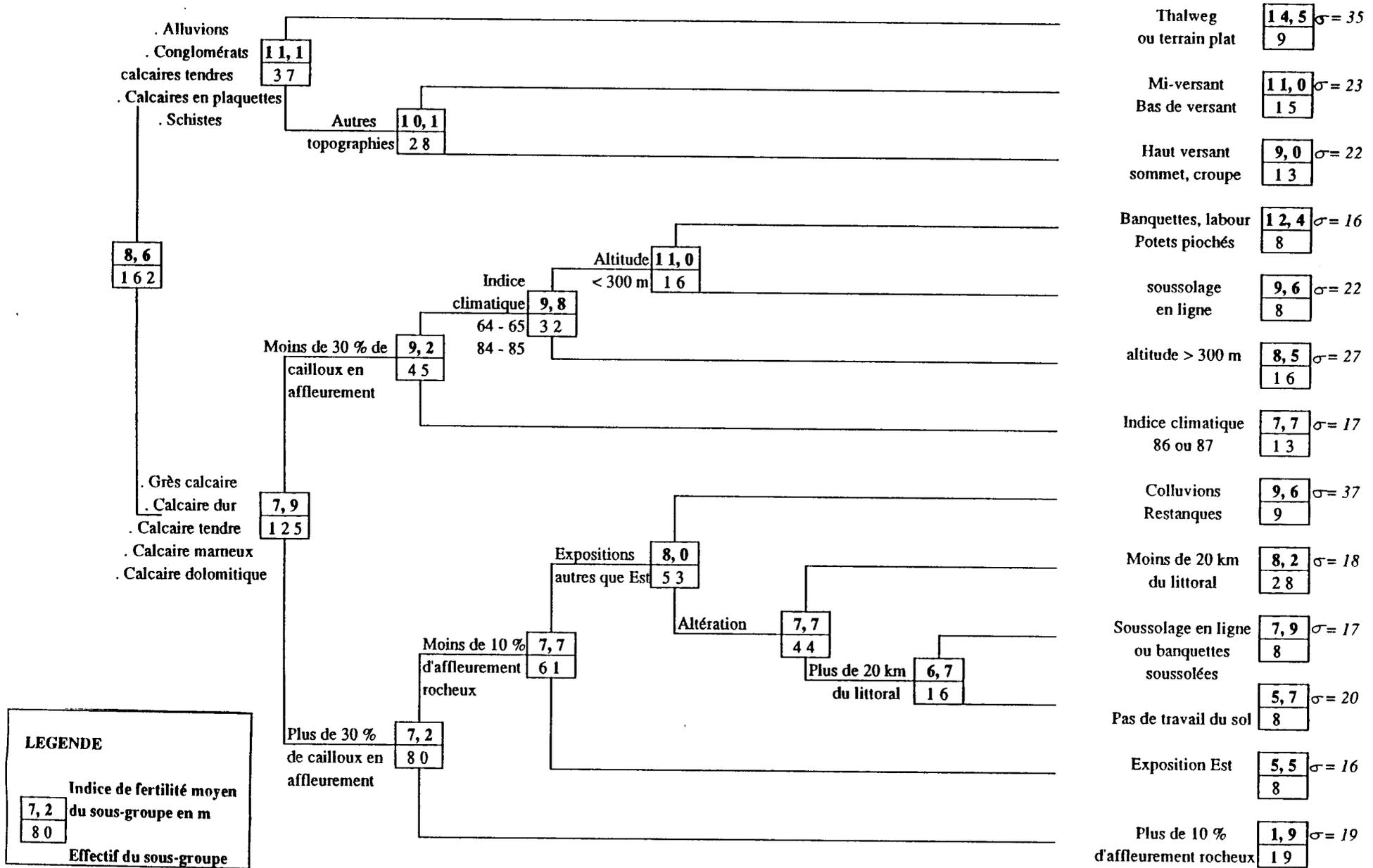
D'autre part, lorsque l'éclatement a lieu, une seule variable apparaît, alors que la suivante, qui peut lui être liée, ne figure pas.

Enfin, plus la segmentation avance, plus les modalités de divers facteurs sont peu représentées, et plus l'éclatement des groupes devient peu fiable.

Il s'agit donc d'une méthode qu'il ne faut pas appliquer aveuglement, surtout lorsqu'on se rapproche des groupes à faible effectifs.

Nous verrons plus loin comment nous avons essayé d'améliorer ces résultats.

Figure 15 - Croissance du Pin Brutia en fonction des seuls facteurs du milieu



Thalweg ou terrain plat	14,5	σ = 35
	9	
Mi-versant	11,0	σ = 23
Bas de versant	15	
Haut versant	9,0	σ = 22
sommet, croupe	13	
Banquettes, labour	12,4	σ = 16
Potets piochés	8	
soussolage en ligne	9,6	σ = 22
	8	
altitude > 300 m	8,5	σ = 27
	16	
Indice climatique 86 ou 87	7,7	σ = 17
	13	
Colluvions	9,6	σ = 37
Restanques	9	
Moins de 20 km du littoral	8,2	σ = 18
	28	
Soussolage en ligne ou banquettes soussolées	7,9	σ = 17
	8	
Pas de travail du sol	5,7	σ = 20
	8	
Exposition Est	5,5	σ = 16
	8	
Plus de 10 % d'affleurement rocheux	1,9	σ = 19
	19	

4.4. Etude de la végétation

Cette démarche a pour but de mettre en évidence les relations pouvant exister entre le type de végétation et l'indice de fertilité, puis d'inclure la végétation comme nouvelle variable pouvant être utilisée pour prédire la croissance du Pin brutia.

En effet, les précédentes études ont montré que la flore répondait de façon très significative aux facteurs du milieu, et par suite pouvait être utilisée comme évaluateur de la fertilité.

Toutefois, la connaissance que nous avons de notre échantillon amène à faire au préalable la remarque suivante :

Tous les boisements étudiés sont récents, consécutifs à des incendies, ou bien, plus rarement à des cultures plus ou moins récemment abandonnées.

La végétation étudiée ne correspond donc jamais à une flore en équilibre, et ne reflète, pour chacun des relevés, qu'un stade d'évolution quelconque. Donc même si nous savons qu'elle constitue un des descripteurs les plus utiles, elle est souvent très insuffisante pour traduire les potentialités du milieu notamment pour certains cas de perturbation extrême (plusieurs incendies consécutifs, travaux du sol importants et récents, entretiens intensifs et répétés des zones très sensibles).

4.4.1. Choix d'une méthode

Les méthodes utilisables sont :

- L'information mutuelle

Cette méthode, basée sur l'analyse fréquentielle de la répartition des espèces, permet d'évaluer l'information apportée par une plante relativement à un facteur (ce serait dans notre cas, les classes de fertilité). On obtient ainsi une appréciation du degré de liaison existant entre une plante et une classe de croissance considérée.

- l'analyse factorielle des correspondances

Cette technique permet de traiter simultanément toutes ou certaines des variables, ou leurs modalités. Elle aboutit à une structuration des variables en déterminant des axes factoriels. Ceux-ci expriment des gradients de variation écologique et regroupent des variables ayant des affinités entre elles.

C'est ainsi qu'on reconnaît les groupes de plantes qui sont très souvent ensemble. La projection en variables supplémentaires des facteurs du milieu permet de donner une signification écologique aux groupes floristiques. Les classes de fertilité peuvent aussi être utilisées en variables supplémentaires.

Nous avons choisi la **deuxième méthode** pour des raisons d'application pratique du résultat : en effet, l'utilisation de la présence ou de l'absence d'une plante peut amener à des erreurs pouvant être importantes, si le relevé floristique est incomplet.

Ce type d'erreur est moins à craindre lorsque le critère est la plus ou moins grande représentation d'un groupe de plantes sur une station.

4.4. Etude de la végétation

Cette démarche a pour but de mettre en évidence les relations pouvant exister entre le type de végétation et l'indice de fertilité, puis d'inclure la végétation comme nouvelle variable pouvant être utilisée pour prédire la croissance du Pin brutia.

En effet, les précédentes études ont montré que la flore répondait de façon très significative aux facteurs du milieu, et par suite pouvait être utilisée comme évaluateur de la fertilité.

Toutefois, la connaissance que nous avons de notre échantillon amène à faire au préalable la remarque suivante :

Tous les boisements étudiés sont récents, consécutifs à des incendies, ou bien, plus rarement à des cultures plus ou moins récemment abandonnées.

La végétation étudiée ne correspond donc jamais à une flore en équilibre, et ne reflète, pour chacun des relevés, qu'un stade d'évolution quelconque. Donc même si nous savons qu'elle constitue un des descripteurs les plus utiles, elle est souvent très insuffisante pour traduire les potentialités du milieu notamment pour certains cas de perturbation extrême (plusieurs incendies consécutifs, travaux du sol importants et récents, entretiens intensifs et répétés des zones très sensibles).

4.4.1. Choix d'une méthode

Les méthodes utilisables sont :

- L'information mutuelle

Cette méthode, basée sur l'analyse fréquentielle de la répartition des espèces, permet d'évaluer l'information apportée par une plante relativement à un facteur (ce serait dans notre cas, les classes de fertilité). On obtient ainsi une appréciation du degré de liaison existant entre une plante et une classe de croissance considérée.

- l'analyse factorielle des correspondances

Cette technique permet de traiter simultanément toutes ou certaines des variables, ou leurs modalités. Elle aboutit à une structuration des variables en déterminant des axes factoriels. Ceux-ci expriment des gradients de variation écologique et regroupent des variables ayant des affinités entre elles.

C'est ainsi qu'on reconnaît les groupes de plantes qui sont très souvent ensemble. La projection en variables supplémentaires des facteurs du milieu permet de donner une signification écologique aux groupes floristiques. Les classes de fertilité peuvent aussi être utilisées en variables supplémentaires.

Nous avons choisi la **deuxième méthode** pour des raisons d'application pratique du résultat : en effet, l'utilisation de la présence ou de l'absence d'une plante peut amener à des erreurs pouvant être importantes, si le relevé floristique est incomplet.

Ce type d'erreur est moins à craindre lorsque le critère est la plus ou moins grande représentation d'un groupe de plantes sur une station.

4.4. Etude de la végétation

Cette démarche a pour but de mettre en évidence les relations pouvant exister entre le type de végétation et l'indice de fertilité, puis d'inclure la végétation comme nouvelle variable pouvant être utilisée pour prédire la croissance du Pin brutia.

En effet, les précédentes études ont montré que la flore répondait de façon très significative aux facteurs du milieu, et par suite pouvait être utilisée comme évaluateur de la fertilité.

Toutefois, la connaissance que nous avons de notre échantillon amène à faire au préalable la remarque suivante :

Tous les boisements étudiés sont récents, consécutifs à des incendies, ou bien, plus rarement à des cultures plus ou moins récemment abandonnées.

La végétation étudiée ne correspond donc jamais à une flore en équilibre, et ne reflète, pour chacun des relevés, qu'un stade d'évolution quelconque. Donc même si nous savons qu'elle constitue un des descripteurs les plus utiles, elle est souvent très insuffisante pour traduire les potentialités du milieu notamment pour certains cas de perturbation extrême (plusieurs incendies consécutifs, travaux du sol importants et récents, entretiens intensifs et répétés des zones très sensibles).

4.4.1. Choix d'une méthode

Les méthodes utilisables sont :

- L'information mutuelle

Cette méthode, basée sur l'analyse fréquentielle de la répartition des espèces, permet d'évaluer l'information apportée par une plante relativement à un facteur (ce serait dans notre cas, les classes de fertilité). On obtient ainsi une appréciation du degré de liaison existant entre une plante et une classe de croissance considérée.

- l'analyse factorielle des correspondances

Cette technique permet de traiter simultanément toutes ou certaines des variables, ou leurs modalités. Elle aboutit à une structuration des variables en déterminant des axes factoriels. Ceux-ci expriment des gradients de variation écologique et regroupent des variables ayant des affinités entre elles.

C'est ainsi qu'on reconnaît les groupes de plantes qui sont très souvent ensemble. La projection en variables supplémentaires des facteurs du milieu permet de donner une signification écologique aux groupes floristiques. Les classes de fertilité peuvent aussi être utilisées en variables supplémentaires.

Nous avons choisi la **deuxième méthode** pour des raisons d'application pratique du résultat : en effet, l'utilisation de la présence ou de l'absence d'une plante peut amener à des erreurs pouvant être importantes, si le relevé floristique est incomplet.

Ce type d'erreur est moins à craindre lorsque le critère est la plus ou moins grande représentation d'un groupe de plantes sur une station.

4.4.2. L'analyse factorielle des correspondances (A.F.C.)

Au total, 186 plantes ont été rencontrées au moins une fois.

Nous avons éliminé du traitement toutes les plantes apparues moins de 5 fois, ce qui a réduit leur nombre à 97.

Sur ce chiffre, d'autres plantes ont dû encore être éliminées, en particulier celles qui n'étaient visiblement pas connues par tous les enquêteurs, ou bien nous avons regroupé certaines espèces dans une unique appellation générique (Rosa sp., Rubus sp., Helianthemum sp.)

Le nombre de plantes à traiter a été ainsi ramené à 87.

L'AFC a donc construit un nuage de points constitué par la distribution des 87 plantes dans les 162 relevés, chaque plante étant représentée par un point moyen, centre de gravité de sa distribution.

L'AFC a recherché ensuite les axes factoriels en isolant d'abord celui qui étire le plus le nuage, puis les suivants, de moins en moins significatifs de la géométrie du nuage.

Chaque axe factoriel est caractérisé par un pourcentage d'explication de la forme du nuage.

Ici, les pourcentages d'explication pour les 5 premiers axes sont :

	Pourcentage	Pourcentage cumulé
Axe 1 :	6,0	6,0
Axe 2 :	5,8	11,8
Axe 3 :	5,0	16,8
Axe 4 :	3,9	20,8
Axe 5 :	3,8	24,6

La projection en "variables supplémentaires" des modalités des facteurs du milieu nous a permis de donner une signification à ces axes. Seuls les 3 premiers sont intéressants :

L'axe 1 oppose clairement le climat d'indice 87 et les altitudes inférieures à 75 m au climat d'indice 85, plus froid.

L'axe 2 oppose les facteurs indiquant les sols à bonne réserve en eau aux sols rocheux ou caillouteux.

Dans l'optique de ce travail, il est très important de remarquer, d'une part, que **les classes de fertilité sont réparties dans l'ordre le long de l'axe 2**, d'autre part, qu'une progression similaire mais beaucoup moins marquée peut s'observer sur l'axe 1.

L'axe 3 est expliqué d'un côté par les roches acides, la réaction HCl et la texture limoneuse.

Nous avons donc, dans l'ordre, un axe de température, de réserve utile, et d'acidité.

4.4.3. l'élaboration des groupes floristiques

Nous avons utilisé pour les élaborer plusieurs outils :

- L'utilisation d'AFC successives, après élimination des milieux marginaux dans notre échantillon, clairement identifiés par les plantes correspondantes (cf. BRETHER, 1985).
- La contribution de chaque plante à l'élaboration des axes factoriels.
- L'utilisation de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) qui regroupe les plantes en fonction des principaux axes factoriels.

Notre but étant d'utiliser ces groupes pour identifier les indicateurs de bonne ou de mauvaise fertilité, nous avons privilégié le regroupement des plantes qui avaient une bonne contribution à l'élaboration de l'axe 2, puis celles qui y étaient bien corrélées, tout en essayant de conserver le classement selon la température donnée par l'axe 1.

C'est pourquoi on pourra voir assemblées certaines espèces pouvant être assez éloignées sur d'autres axes.

La figure 16 représente le plan factoriel 1-3 et identifie les 5 plantes qui étirent le plus le nuage sur ces deux axes. Les relevés où figuraient ces plantes ont été retirés de l'échantillon dans une AFC suivante, pour obtenir un meilleur éclatement du nuage.

La figure 17 montre le plan factoriel 1-2, avec la projection des variables supplémentaires les mieux corrélées à ces axes.

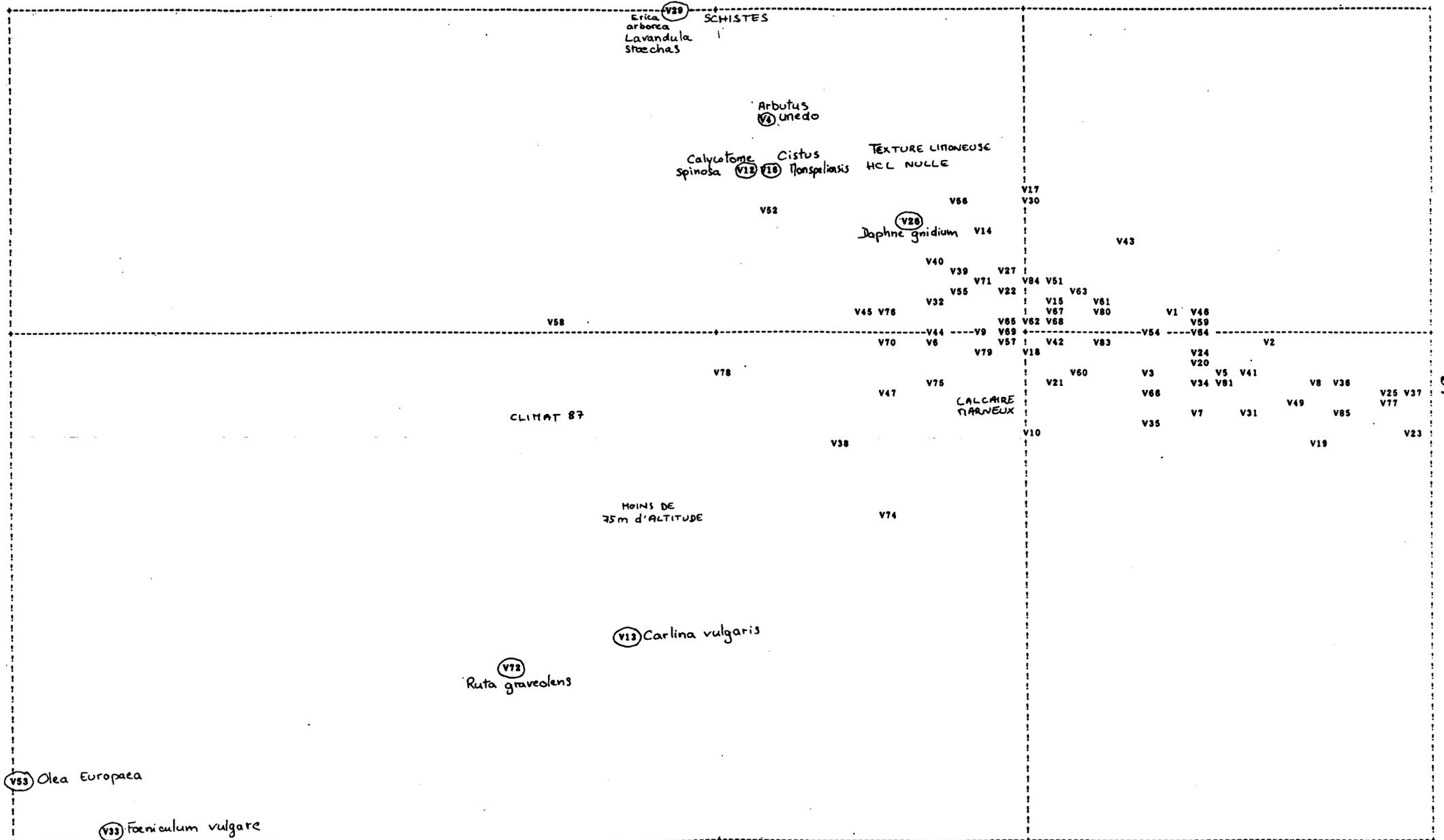
Nous obtenons donc, à l'issue de ces traitements les groupes floristiques présentés au tableau 18 (la nomenclature utilisée est celle des 4 flores de France de P. FOURNIER).

La distribution de ces groupes dans le plan factoriel 1-2 est représentée dans la figure 19.

FIGURE 16 - Etude de la flore - Plan factoriel 1-3

1 AXE HORIZONTALE (1)--AXE VERTICALE (3)--TITRE:GROUPE FLORISTIQUE DU BRUTIA

NOMBRE DE POINTS : 85



NOMBRE DE POINTS SUPERPOSES : 1

NOMBRE DE POINTS SUPERPOSES : 5

V48 (V29)

V60 (V16) V82 (V57) V11 (V5) V73 (V49) V28 (V23)

FIGURE 17 - Etude de la flore - Plan factoriel 1-2

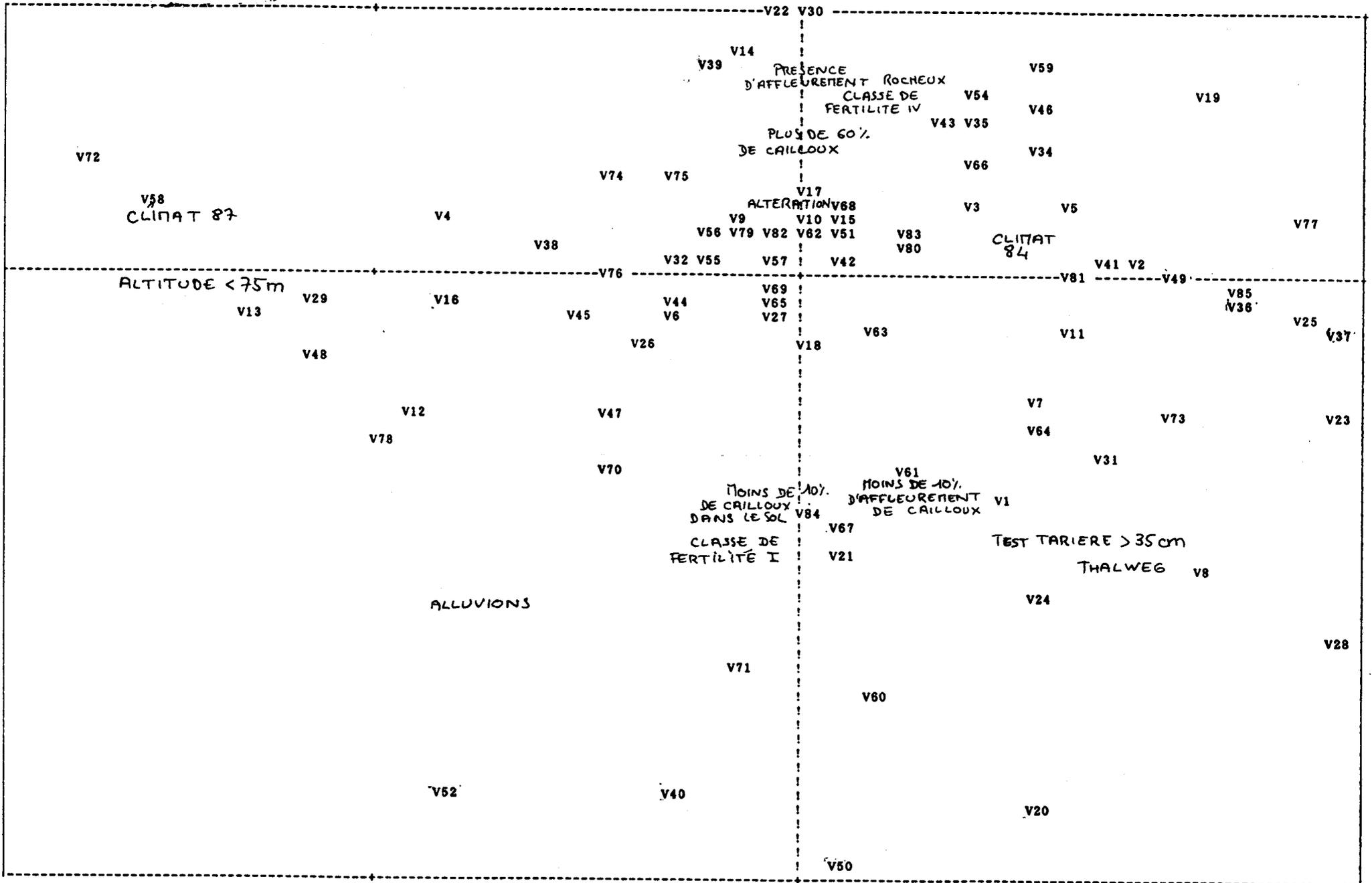


Tableau 18 : Groupes floristiques

Groupe I

Pistacia lentiscus
Carlina corymbosa
Ruta graveolens
Olea europaea
Foeniculum vulgare

Groupe II

Erica arborea (1)
Lavandula stoechas (1)
Calycotome spinosa (1)
Cistus monspeliensis
Daphne gnydium
Arbutus unedo

Groupe III

Gobularia alypum
Centranthus ruber
Erica multiflora
Coronilla juncea
Santolina chamaecyparissus

Groupe IV

Fumana coridifolia
Ononis minutissima
Rhus coriaria
Coris monspeliensis
Laserpitium gallicum
Fumana thymifolia
Iris chamaeiris
Argyrolobium linnaeum
Pistacia terebinthus

Groupe V

Quercus coccoloba
Brachypodium ramosum
Rosmarinus officinalis
Thymus vulgaris
Teucrium chamaedrys
Stachellina dubia
Cistus albidus
Lonicera implexa
Aphyllantes monspeliensis
Ulex parviflorus
Helychrysum stoechas
Sedum sp.
Filaria latifolia
Cistus salviaefolius
Bupleurum fruticosum

Groupe VI

Pinus halepensis
Juniperus oxycedrus
Filaria angustifolia
Euphorbia characias
Rhamnus alaternus
Smilax aspera
Genista scorpius
Spartium junceum

Groupe VII

Rubia peregrina
Asparagus acutifolius
Quercus ilex
Dorycnium suffruticosum
Clematis flammula
Lavandula latifolia

Groupe VIII

Teucrium polium
Hellanthemum sp.
Leuzea conifera
Buxus sempervirens
Amelanchier rotundifolia
Sorbus domestica
Viola sp.

Groupe IX

Genista pilosa
Genista hispanica
Sanguisorba minor
Eryngium campestre
Brachypodium phoenicoides
Echinops ritro
Bonjeania hirsuta
Coronilla minima
Cytisus sessiliflorus
Astragalus monspessulanus

Groupe X

Quercus lanuginosa
Lonicera etrusca
Crataegus monogyna
Coronilla emerus
Acer monspessulanus
Psoralea bituminosa
Rubus sp. (2)
Rosa sp. (2)

Groupe XI

Viburnum tinus (3)
Hedera helix (3)
Ruscus aculeatus (3)
Prunus spinosa
Cornus sanguinea
Lonicera xylosteum
Ligustrum vulgare

(1) *Acidiphiles strictes*
(2) Très large amplitude
(3) *Sciaphiles*

REPRESENTATION DES GROUPES FLORISTIQUES DANS LE PLAN FACTORIEL 1 - 2

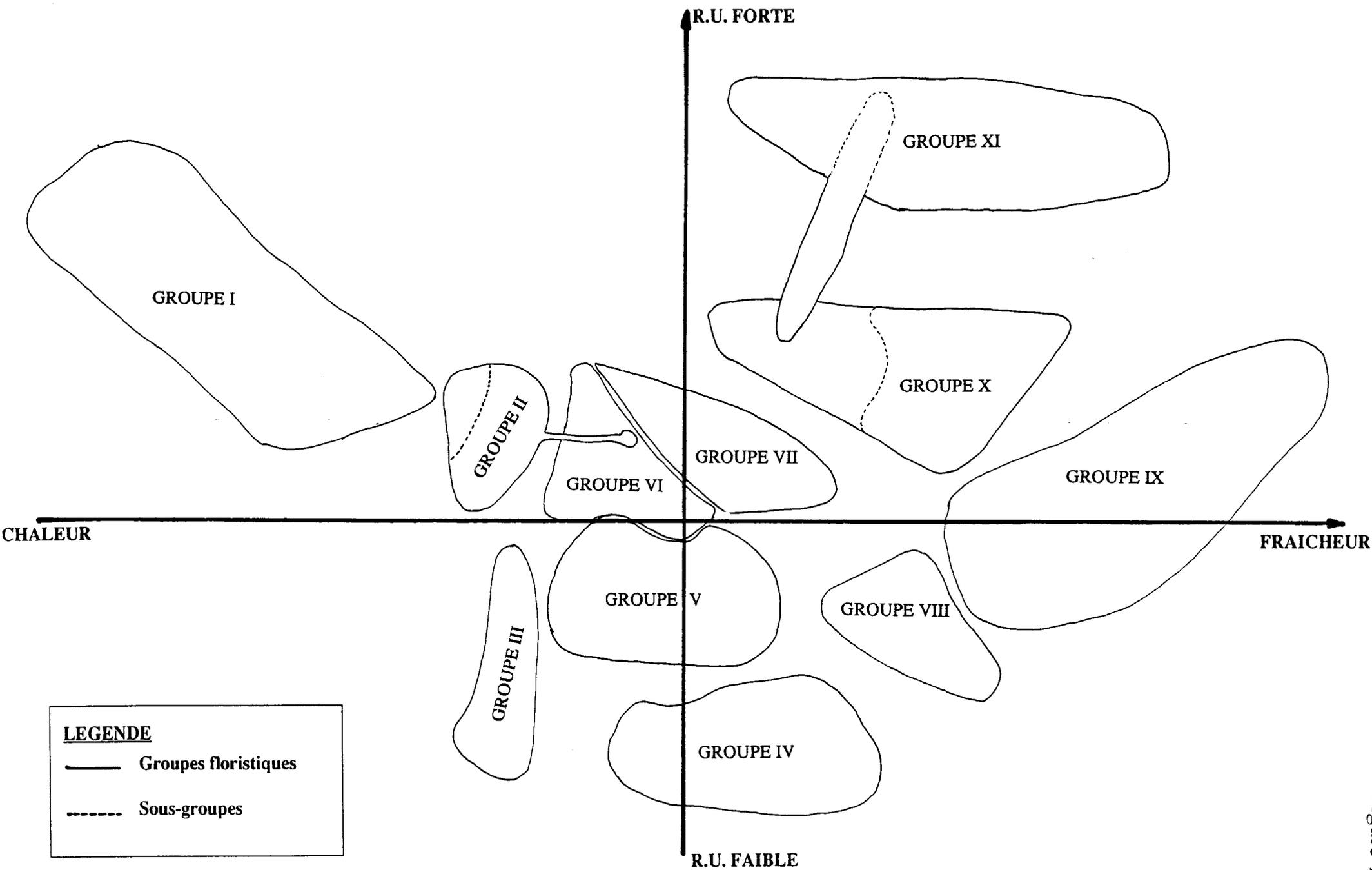


Figure 19

4.4.4. Interprétation écologique des groupes

Nous avons vu que, ayant bâti ces groupes avec l'objectif de les mettre en relation avec la fertilité, nous avons privilégié les 2 premiers axes, l'un indiquant la température, l'autre la réserve en eau du sol. Il en résulte une certaine hétérogénéité vis à vis des autres facteurs. Cependant, il est possible de dégager quelques tendances, en construisant un tableau croisant les groupes et les facteurs du milieu. Nous avons pu en extraire ces informations :

Le groupe I indique les climats côtiers doux sur stations à végétation assez riche, souvent sur d'anciennes cultures.

Le groupe II, lui aussi plutôt sous climat chaud contient d'une part les plantes strictement acidiphiles, d'autre part celles indiquant les textures légères (sableuses ou équilibrées), sur des sols pouvant être carbonatés.

Le groupe III est fréquent à proximité du littoral mais à des altitudes déjà relativement élevées (et donc des températures plus basses). Il est typique des reliefs calcaires côtiers.

Le groupe IV contient des plantes très héliophiles et est présent sur des sols caillouteux ou même rocheux, issus de roches calcaires diverses. Il semble indiquer des milieux ouverts et dégradés.

Les groupes V, VI et VII présentent les espèces typiques de la garrigue, et sont ceux qui ont la plus large amplitude.

Le groupe V est présent dans tous les relevés sauf cinq. Il comporte des espèces représentatives des faciès de dégradation.

Le groupe VI est une nuance du précédent et semble indiquer une évolution positive de la végétation, alors que les plantes du groupe VII indiqueraient une flore moins dégradée.

Les groupes VIII et IX représentent une nuance climatique plus froide, ainsi que des milieux très ouverts, le groupe VIII indiquant des terrains plus caillouteux ou rocheux.

Le groupe X, dont la signification thermique est identique aux deux précédents, se retrouve sur des sols plus profonds ou dans des stations dont la flore est peu dégradée. On y trouve des espèces de la chênale pubescente. Il comprend toutefois deux genres (rosa et rubus) à plus large amplitude et à signification mais cernée.

Enfin, le groupe XI est le groupe indicateur de bonne réserve en eau. Sa présence est corrélée aux sols profonds, peu caillouteux, en topographies basses. Il comprend un sous-groupe dont la signification quant à la réserve utile est moins nette, mais qui indique un couvert bien fermé et un sol forestier plutôt évolué (Viorne tin, fragon, lierre).

4.4.5. Relation groupes floristiques-fertilité

Nous allons maintenant considérer la représentation de chaque groupe floristique comme un descripteur du milieu au même titre que les paramètres physiques utilisés auparavant.

Chacune de ces 11 nouvelles variables a été divisée en 5 modalités représentant les proportions de plantes présentes sur la station par rapport au nombre de plantes du groupe auquel elles appartiennent. Ces modalités vont de 0 (groupe absent) à 4 (présence de plus de $\frac{3}{4}$ des plantes du groupe).

Comme précédemment, nous avons utilisé l'analyse de variance pour mettre en évidence les groupes les mieux liés à la fertilité. Ce sont les suivants :

Groupe III

(Reliefs calcaires côtiers)

Nombre de plantes	0	1	2	3 et +
N	128	22	9	3
H ₃₀	9,2	6,9	6,4	5,3
σ	3,2	2,5	2,2	1,6
T	A	B	B	X

Groupe IV

(Milieux ouverts et caillouteux)

Nombre de plantes	0	1 ou 2	3 ou 4	5 et +
N	93	59	9	1
H ₃₀	9,7	7,4	6,0	3,0
σ	3,2	2,6	1,5	.
T	A	B	B	X

Groupe V

(Garrigues - dégradation forte)

Nombre de plantes	0	1, 2, 3	4, 5 6, 7	8, 9 10, 11	12, 13 14, 15
N	5	13	87	53	4
H ₃₀	12,4	12,4	8,5	7,6	6,8
σ	4,7	3,2	3,1	2,2	4,0
T	A	A	B	B	B

Groupe VII

(Garrigues - dégradation faible)

Nombre de plantes	0	1	2	3 ou 4	5 ou 6
N	9	19	86	35	13
H ₃₀	6,5	7,4	8,5	9,4	10,5
σ	5,2	2,6	3,0	3,4	2,4
T	A	A	AB	B	B

Groupe X

(Chênaie pubescente)

Nombre de plantes	0	1 ou 2	3 ou 4	5 ou 6
N	77	64	17	4
H ₃₀	7,3	9,0	12,0	12,1
σ	2,7	2,9	3,5	1,7
T	A	B	C	X

Groupe XI

(Bonne réserve en eau)

Nombre de plantes	0	1	2 et +
N	132	23	7
H ₃₀	7,9	11,4	13,6
σ	2,7	3,3	3,1
T	A	B	B

On voit que :

- plus les groupes III, IV et V sont représentés, plus la fertilité baisse,
- à l'inverse, la fertilité croît avec la représentation des groupes VII, X et XI,
- les groupes V et VII, qui avec le groupe VI forment le "fond" de la flore sur la zone étudiée, et sont donc la plupart du temps associés dans les relevés, présentent des significations différentes quant à la fertilité.

L'interprétation relative à l'état de dégradation de la végétation qui en avait été donnée doit donc être aussi liée aux potentialités du milieu.

4.5. Hiérarchisation incluant la végétation

Nous allons de nouveau utiliser la segmentation, en y introduisant nos 11 nouvelles variables floristiques.

4.5.1. Méthode utilisée

Un premier essai de segmentation montre que ces nouvelles variables représentent un puissant indicateur de la fertilité du milieu puisque la première dichotomie obtenue porte sur la présence ou l'absence du groupe XI et que 6 des 14 éclatements suivants sont dus aux groupes floristiques. On obtient notamment un très bon isolement des stations les plus fertiles. Mais il semble que cette structuration initiale du milieu par la végétation nuise à la discrimination des stations plus "ordinaires", car les principaux groupes finaux obtenus présentent des effectifs et des écarts types importants.

Pour expliquer ce fait, on peut avancer l'hypothèse suivante :

On a vu que les stades d'évolution de la flore étaient différents selon les relevés. La valeur de l'évaluation du milieu par la flore varie donc selon ces relevés.

Par suite, un traitement qui va utiliser le cortège floristique comme élément de structuration principal va donc classer correctement les relevés où la valeur descriptive de la flore est bonne, mais distinguera très mal les stations à flore très perturbée.

Pour éviter cela, nous avons pris le parti de conserver la structuration principale des relevés obtenue lors de la segmentation sur les seuls facteurs physiques du milieu.

Nous avons donc gardé les premières dichotomies qui nous paraissaient solides et conformes aux analyses de variance. Les groupes floristiques ont été introduits à partir des niveaux où les résultats devenaient sujets à discussion, ou bien ceux dont on estimait qu'ils pouvaient être affinés par la flore (cf. chapitre 4.3.).

4.5.2. Résultats et discussion

L'arbre final de segmentation est représenté dans le tableau 20.

Cet outil pourra être utilisé sur le terrain pour estimer la croissance du Pin brutia en fonction des descripteurs de la station.

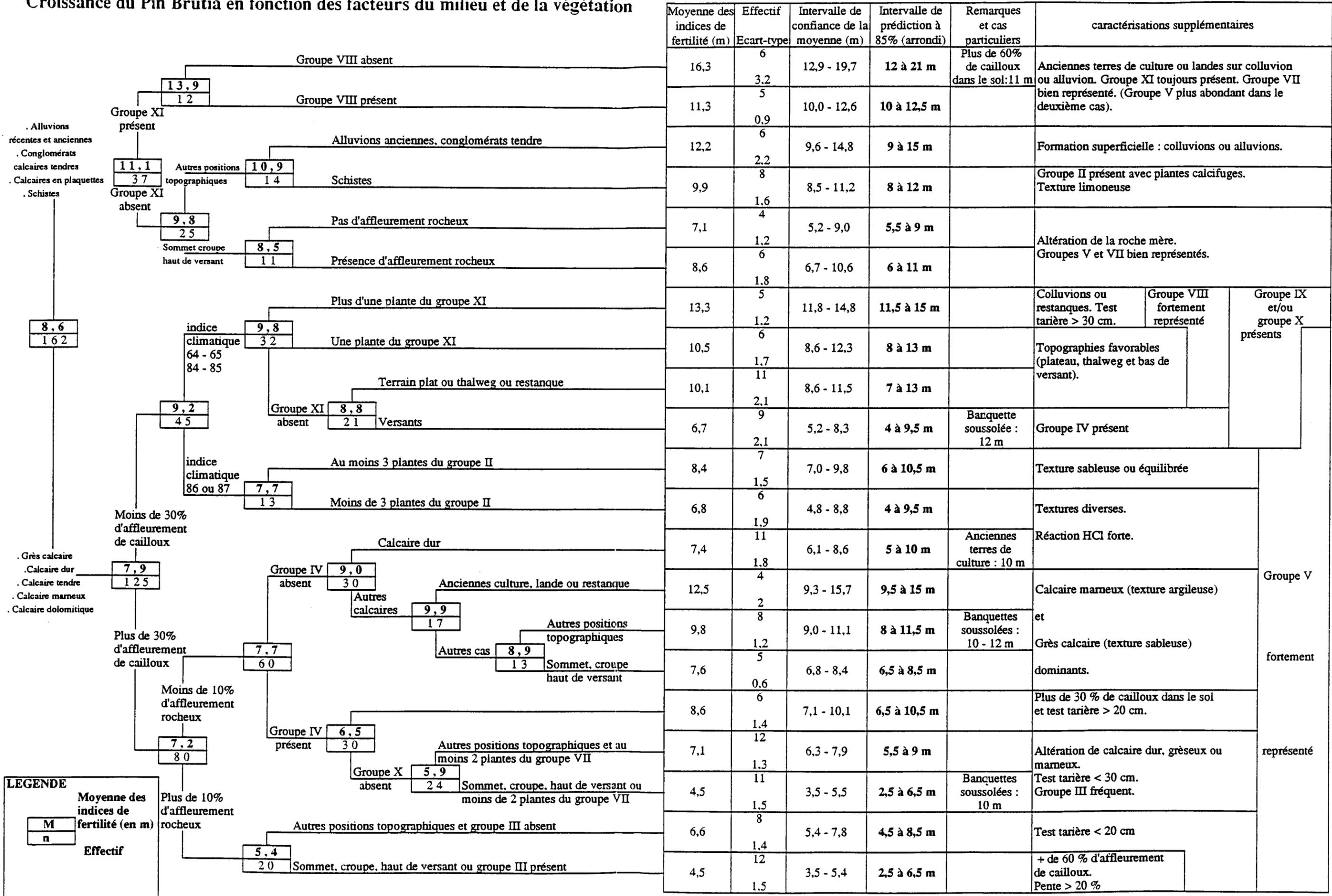
La valeur de prédiction de ce tableau est donnée par la colonne "Intervalle de prédiction à 85 %". Les fourchettes sont très proches des valeurs réelles de l'échantillon.

Cependant ces intervalles n'ont que rarement une véritable valeur statistique puisque les effectifs et la distribution des relevés autour de la moyenne des groupes finaux sont en général insuffisants pour conclure que les populations représentées suivent une loi normale.

Les cas particuliers qui s'éloignaient fortement de la moyenne pour une raison explicable ont été extraits du calcul.

Enfin figurent des indications supplémentaires en fin de tableau, où nous avons noté les points communs existant entre les relevés des groupes finaux, afin de faire ressortir les points constants masqués par le processus de la segmentation.

Croissance du Pin Brutia en fonction des facteurs du milieu et de la végétation



LEGENDE
 Moyenne des indices de fertilité (en m)
 M
 Effectif
 n

Cette dernière partie du tableau appelle quelques commentaires :

- La nature de la formation superficielle, absente des facteurs figurant dans l'arborescence, se retrouve bien distinguée dans les groupes finaux, les meilleures fertilités se trouvant sur alluvions, colluvions ou restanques.
- On peut noter aussi une certaine influence du travail du sol, qui peut procurer un gain sensible de croissance, à conditions de milieu égales, à l'avantage des banquettes soussolées par rapport au soussolage en ligne.
- Enfin, on remarquera d'une façon générale que la croissance du Pin brutia se ressent de l'état de dégradation du milieu : les croissances sont plus faibles lorsque le pourcentage de cailloux en affleurement dépasse 30 % (signe d'érosion de surface, actuelle ou peu ancienne), de même lorsque les signes de dégradation de la chênaie verte sont très nets (traduits ici par la faible représentation ou l'absence du groupe VII, et la forte représentation des groupes IV et V).

4.5.3. Conclusions sur la segmentation

Les résultats obtenus par cette méthode nous ont permis de scinder notre échantillon en plusieurs sous-groupes, dont l'amplitude correspond à peu près à une classe de fertilité.

Le but recherché est donc atteint puisqu'on arrive ainsi à une précision bien suffisante pour permettre un choix sylvicole (ce qui n'était pas évident au départ compte tenu de la nature de l'échantillon, cf. paragraphe 2.3.6.).

La présentation finale en fait un outil pratique et accessible, avec un minimum de formation, à la plupart des utilisateurs forestiers. Ceux-ci sont d'ailleurs déjà familiarisés avec ce type de clef (cf. précédentes études autécologiques du CEMAGREF Aix-en-Provence).

Il n'en reste pas moins que se posent deux problèmes fondamentaux quant à l'utilisation de cet outil :

- 1 Son absence de réelle valeur statistique en l'état, ne permet pas d'étendre de façon fiable les résultats obtenus sur l'échantillon à l'ensemble de la population sans prévoir une nouvelle phase de terrain sur de nouveaux boisements pour vérifier la validité des fourchettes données.
L'expérience a montré que cette phase est difficile à réaliser, notamment pour couvrir l'ensemble des cas possibles.
- 2 La structuration du milieu facteur après facteur, et uniquement en fonction de la fertilité, ne permet pas à l'utilisateur de cet outil de se faire une idée cohérente du milieu sur lequel il se situe et par suite, ne lui permet pas de comprendre son fonctionnement.
C'est pourquoi nous nous sommes orientés vers un autre type de traitement, à savoir une structuration des relevés beaucoup plus classique afin d'aboutir à une individualisation des unités écologiques ressortant de notre échantillon.

4.6. Approche synthétique milieu - végétation - fertilité

Notre objectif dans cette approche, est toujours de fournir des éléments pour prévoir la croissance du Pin brutia. Mais nous souhaitons ici pouvoir le faire à partir d'une compréhension plus globale du milieu.

Pour cela, nous voulons considérer **conjointement** et non plus à tour de rôle, tous les facteurs physiques du milieu, ainsi que la végétation, pour savoir de quelle façon la fertilité varie dans ce contexte.

Nous allons donc tenter de regrouper les relevés écologiquement proches, tant par leur cortège floristique que par les macro-facteurs du milieu (climat-substrat).

Dans un premier temps, nous allons axer ce travail sur la végétation, en utilisant les traitements réalisés pour définir des groupes floristiques, puisque nous avons vu que la végétation, comme la fertilité, s'organisaient autour de deux principaux facteurs, l'un climatique, l'autre édaphique.

4.6.1. Classement des relevés en fonction de la flore : diagonalisation

Nous avons donc utilisé comme base la deuxième sortie fournie par l'AFC sur la flore (cf. 4.4.2.), c'est-à-dire le nuage de points constitué par la distribution des 162 relevés par rapport aux 87 plantes.

Nous avons ensuite utilisé la classification automatique (CAH) de ces relevés selon les 5 premiers facteurs de l'AFC

13 groupes principaux de relevés ont ainsi été construits "à l'aveugle" par le calcul.

Or, les groupes floristiques ayant été bâtis selon une approche un peu plus finalisée (privilégiant les deux premiers axes), il nous fallait croiser groupes floristiques et groupes de relevés afin que les classements des relevés et des plantes soient cohérents.

La procédure TRANSPOSE du logiciel SAS permet de réaliser ce tableau de façon relativement simple : après avoir ordonné les groupes floristiques et les groupes de relevés selon un même gradient, révélé par l'AFC, il suffit de modifier, par tâtonnements successifs la place des relevés afin que la flore apparaisse répartie le mieux possible autour d'une diagonale de ce tableau.

Le résultat final aboutit à la création de 13 groupes de relevés, constitués uniquement à l'aide de la flore.

Ce tableau peut être schématiquement représenté par la figure 21.

Quelques rapides commentaires à propos de ce tableau :

- Les groupes A et B se distinguent fortement de l'ensemble par la présence des groupes floristiques I (climat littoral) et II (roches acides).
- Les groupes C à K présentent une végétation de type garrigue et sont ordonnés selon un gradient décroissant de température. Notons que les groupes D et E correspondent à de mauvaises fertilités, et que les groupes G et H présentent un cortège floristique très pauvre et dépourvu de flore indicatrice.
- Les groupes L et M comportent une flore indiquant une bonne réserve en eau du sol, et par suite présentent une bonne fertilité.

On voit d'autre part que les groupes V, VI et VII sont présents plus ou moins fortement, sur l'ensemble des relevés : On retrouve schématisé ici notre "fond floristique", permanent sur la zone étudiée.

TABLEAU DIAGONALISE DES GROUPES FLORISTIQUES ET DES RELEVÉS

Groupes floristiques	Relevés	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
I		Dark Grey	Light Grey											
II			Dark Grey	Light Grey	Light Grey	Light Grey							Light Grey	Light Grey
III					Light Grey	Light Grey								
IV					Light Grey	Light Grey	Light Grey							
V		Light Grey	Light Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Light Grey	Light Grey	Light Grey
VI		Light Grey												
VII		Light Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey						
VIII						Light Grey	Light Grey			Light Grey				
IX										Light Grey	Light Grey	Dark Grey	Light Grey	Light Grey
X		Light Grey	Light Grey	Light Grey				Light Grey	Light Grey	Light Grey	Light Grey	Dark Grey	Dark Grey	Dark Grey
XI												Light Grey	Light Grey	Dark Grey

Légende : l'intensité des gris reflète la plus ou moins forte représentation des groupes floristiques.

4.6.2. Etablissement de grands types de stations : les unités écologiques

Nous pouvons maintenant regrouper les relevés à la fois en fonction de leur composition floristique, mais aussi des facteurs du milieu, en essayant de privilégier les critères de regroupement dont on sait, vu les résultats précédents, qu'ils ont une influence sur la fertilité.

Pour cela, nous avons encore utilisé l'analyse factorielle. Mais cette fois, à la place des plantes, nous avons étudié la distribution des facteurs écologiques. Nous avons donc sélectionné en variables actives les facteurs les plus influents sur la croissance, auxquels nous avons rajouté le type de "composition floristique" du relevé.

Les autres facteurs du milieu sont projetés en variables supplémentaires, ainsi que les classes de fertilité (6 classes d'effectifs égaux).

Les pourcentages d'explications pour les 5 premiers axes ont été les suivants :

	Pourcentage	Pourcentage cumulé
Axe 1 :	7,1	7,1
Axe 2 :	5,1	12,2
Axe 3 :	4,4	16,6
Axe 4 :	4,2	20,8
Axe 5 :	3,8	24,6

Nous avons pu donner une signification aux quatre premiers axes.

L'axe 1 sur lesquelles sont alignées les classes de fertilité dans l'ordre croissant, oppose clairement les stations les plus fertiles (sols profonds et riches, peu caillouteux) aux stations pauvres (sols maigres et caillouteux et même rocheux).

L'axe 2 d'interprétation plus difficile, est plutôt géographique, car il oppose les stations de basse altitude, proches de la mer aux stations plus intérieures et notamment aux reliefs (exemple : Alpilles). La figure 22 donne une représentation de la distribution sur ces deux premiers axes.

L'axe 3 est construit principalement par des milieux marginaux dans notre échantillon, puisqu'il oppose les stations sur schistes aux relevés comportant plus de 30 % d'affleurement rocheux (très rares)

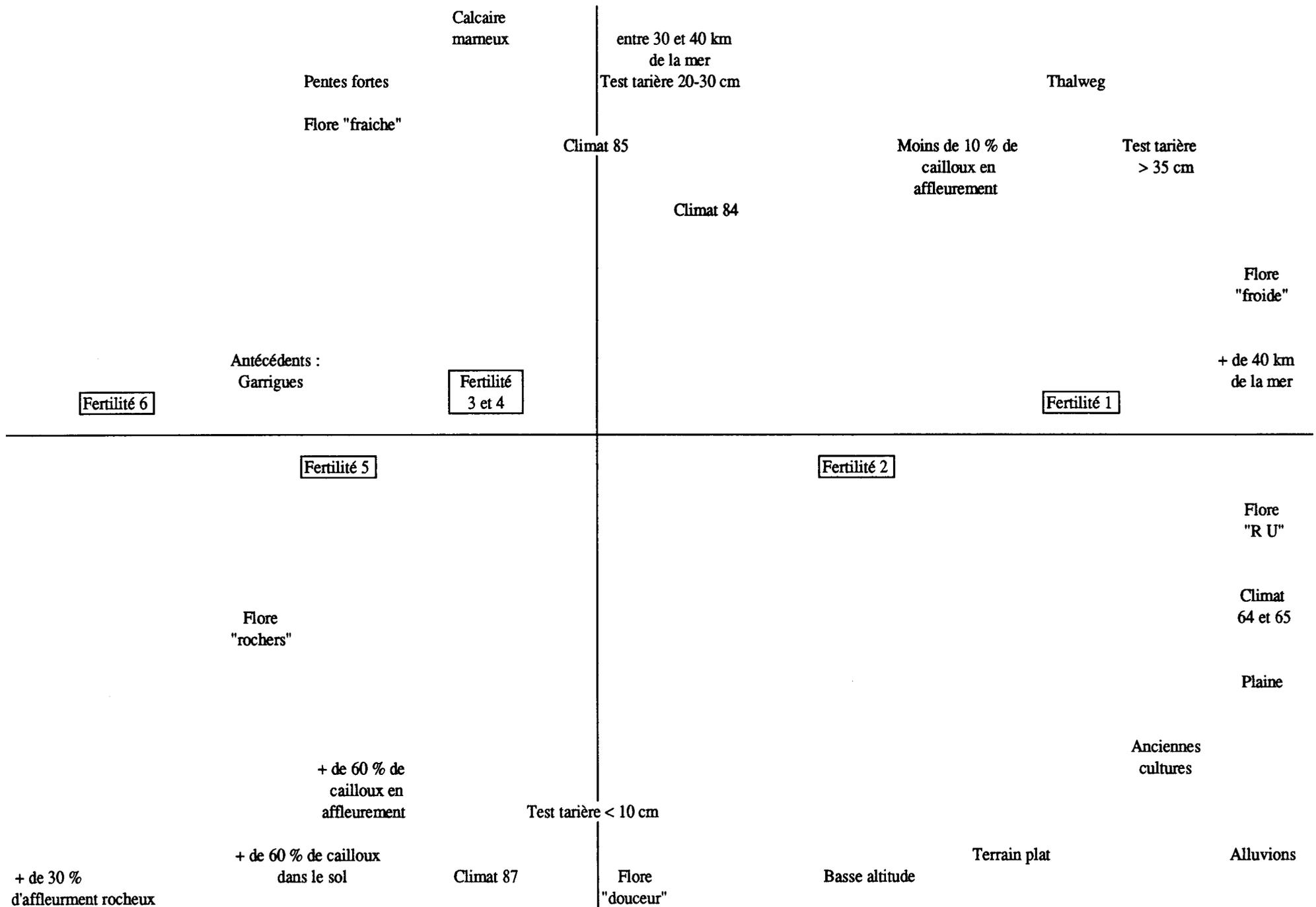
Les axes 4 et 5 sont étirés en grande partie par les mêmes facteurs que les axes 2 et 3, mais selon des combinaisons différentes.

La encore, nous avons utilisé la classification ascendante hiérarchique (CAH) pour regrouper nos relevés selon les 5 premiers facteurs de l'AFC. 14 groupes principaux sont issus de ce traitement.

A ce stade, nous disposons donc de deux types de regroupement de relevés, assez proches l'un de l'autre, que nous avons utilisés comme guides pour définir des unités écologiques.

Pour cela, nous avons procédé manuellement, et par tâtonnements successifs.

AFC sur facteurs du milieu et "compositions floristiques" - Axe factoriel 1 (Horizontal) et 2 (vertical)



Le principe de classement, issu de nos deux tableaux de base, a été le suivant :

- 1^{er} niveau : isolement préalable des milieux très facilement définis car un peu exceptionnels dans notre échantillon.
- 2^{ème} niveau : utilisation de la flore comme élément de structuration principal quand correspondaient à celle-ci des caractères physiques du milieu bien identifiés.
- 3^{ème} niveau : utilisation des macrofacteurs du milieu (climat-substrat) sur les relevés restants, dont la flore n'est pas assez différenciée pour distinguer les stations.

De cette méthode de classement, il faut retenir que les relevés regroupés lors de la dernière étape ne seront pas forcément différents, sur le plan écologique, des groupes définis au 2^{ème} niveau, mais que c'est l'absence de critère permettant de les rattacher à l'un ou à l'autre de ces groupes qui a conduit à les classer de façon plus arbitraire. Il en résulte bien sûr une plus grande hétérogénéité sur le plan de la fertilité pour les groupes du 3^{ème} niveau.

Nous avons ainsi défini 14 unités "écolo-floristiques" (que l'on appellera par commodité **unité écologique**), et que l'on pourra retrouver sur le terrain, en utilisant la clé de détermination du tableau 28.

Nous avons représenté sur la figure 23 la position approximative des 14 unités dans un plan où l'axe horizontal représente le climat (température surtout), et l'axe vertical les critères relatifs à la circulation et à la rétention de l'eau dans le sol.

L'évolution de la fertilité en fonction de ces deux axes figure sur une courbe virtuelle traversant le plan.

Cette représentation est une adaptation simplifiée de la position des relevés dans le plan factoriel 1-2 défini par la première AFC sur la flore (cf. chapitre 4.4.2.).

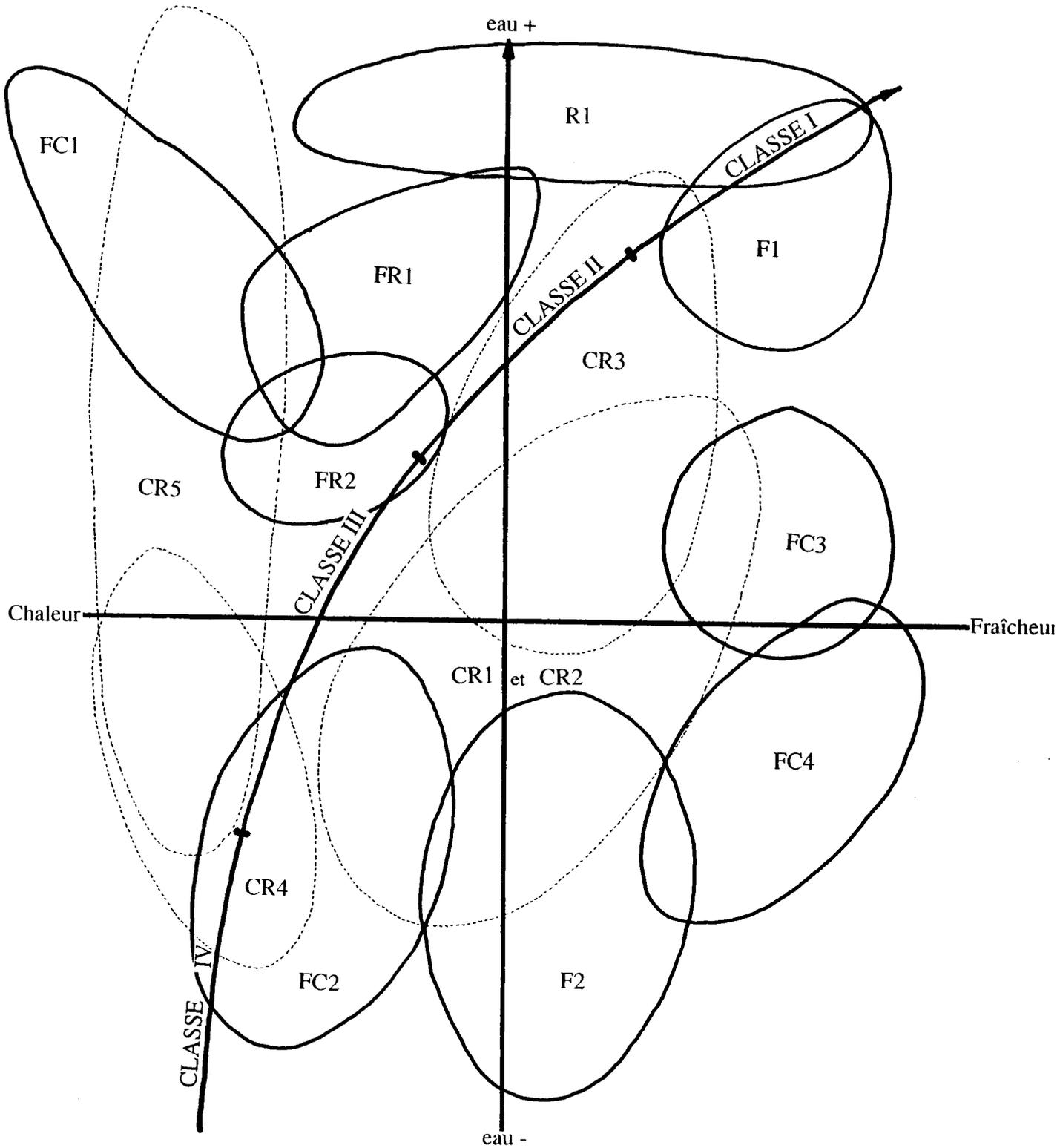
Cette figure permet de visualiser les compensations sol-climat intervenant ou pas selon les unités écologiques et la façon dont elles vont déterminer la fertilité de chaque unité.

Ainsi par exemple, les unités FC1 et FC4 correspondent aux mêmes classes de fertilité (II et III) et se projettent au même endroit sur l'axe de fertilité, alors qu'elles correspondent à des unités climatiques et édaphiques très différentes : l'unité FC1 est en climat chaud mais est assez bien alimentée en eau, tandis que l'unité FC4 correspond à des critères hydriques défavorables mais compensés par un climat plus frais.

On peut aussi mieux voir sur ce schéma l'amplitude climatique ou édaphique plus ou moins importante des unités et repérer ainsi celles qui sont le mieux cernées.

Enfin, on remarquera que l'indice de fertilité n'est pas apparu strictement linéairement croissant avec la Réserve Utile (RU) et le climat mais décrit un arc. Cela peut s'interpréter facilement : dans des climats chauds à forte demande hydrique, une petite variation de RU se répercutera fortement sur la fertilité : la pente de la courbe de fertilité est donc très supérieure à la diagonale ; au contraire, pour des climats froids, où le Pin brutia souffre beaucoup moins d'un déficit hydrique, une même augmentation de RU provoque un gain de fertilité moins fort.

ECOLOGIQUE EN FONCTION DU CLIMAT ET DE L'ALIMENTATION EN EAU



LEGENDE
Axe horizontal : critères climatiques (température principalement)
Axe vertical : critères édaphiques et topographiques relatifs à l'alimentation en eau
— : unités écologiques bâties avec l'aide de la flore
- - - : unités écologiques bâties sans l'aide de la flore

4.6.3. Evaluation de la fertilité des stations par unité écologique

Les principaux résultats statistiques concernant les fertilités par unité écologique sont donnés dans les tableaux 24, 25, 26 et 27.

Nous pouvons constater que l'on peut distinguer 3 groupes d'unités selon la fertilité (bons, moyens, mauvais).

Cependant, dans la plupart des cas, l'intervalle de prédiction à 85 % s'étend sur deux ou trois classes de fertilité, ce qui est peu précis dans l'éventualité de certains choix d'objectifs.

Nous avons alors recherché, unité par unité, quels étaient les critères stationnels pouvant expliquer la position (haute, moyenne ou basse) du relevé dans la fourchette des fertilités.

Il s'avère en fait que les critères sont à peu près les mêmes pour toutes les unités, et sont en général relatifs au **bilan hydrique**.

Il s'agit en premier lieu de la présence ou l'absence d'**affleurement rocheux** et de la **position topographique**.

Viennent ensuite, dans un ordre différent selon les unités écologiques, la représentation des **groupes floristiques III, IV et XI**, l'**exposition**, les **antécédents cultureux**, la **pente** et le **test tarière**.

On retrouve là les **descripteurs apparus comme significativement influents lors des analyses de variances**.

4.6.4. Présentation des résultats

Le tableau 28 synthétise l'ensemble des résultats pour l'utilisateur.

Dans la première partie, la clé de détermination permet, après relevé de la flore, et identification de la roche mère et de l'indice climatique, de situer l'unité écologique à laquelle se rattache la station.

L'unité est décrite dans la partie 2 par :

- un nom codifié,
- une caractérisation écologique complémentaire,
- la moyenne des fertilités,
- l'amplitude des classes de fertilité possibles (donnée à partir de l'intervalle de prédiction à 85 %).

On y trouve les principaux critères favorables et défavorables, qui, à ce niveau décrivent le mieux la fertilité.

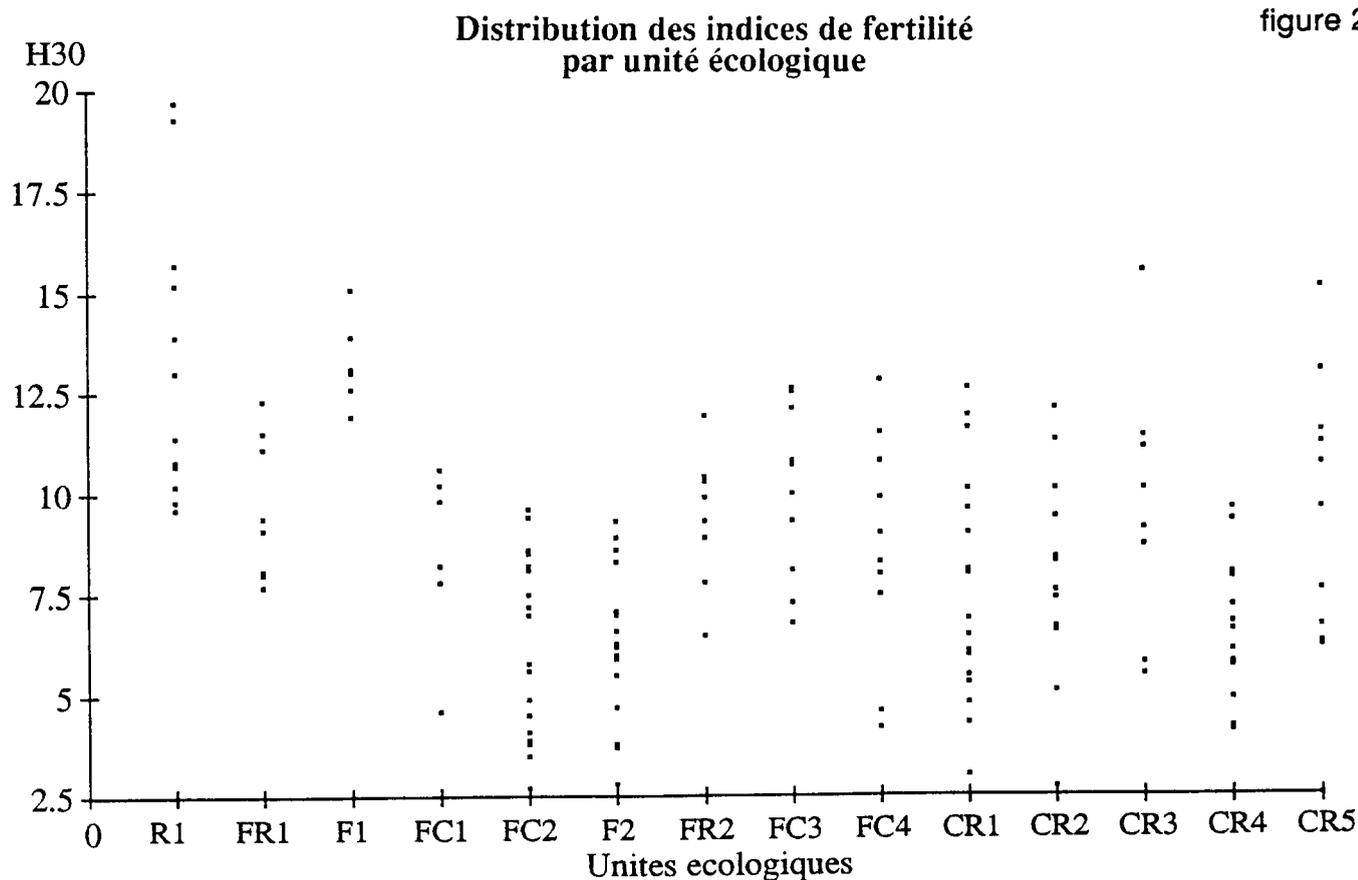
En faisant le bilan de ces critères, on peut évaluer approximativement la position de la station à l'intérieur de la fourchette des fertilités données pour chaque unité.

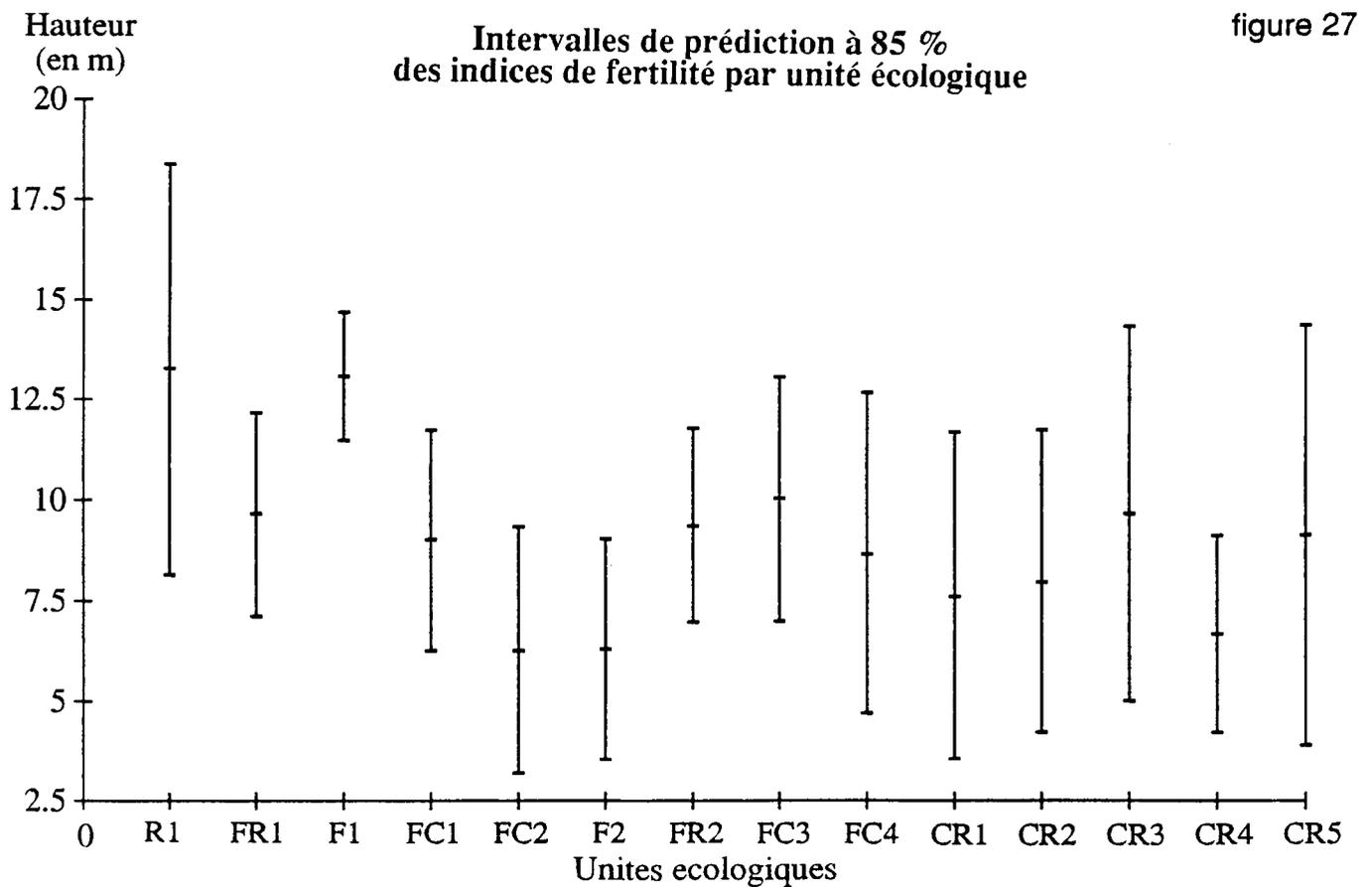
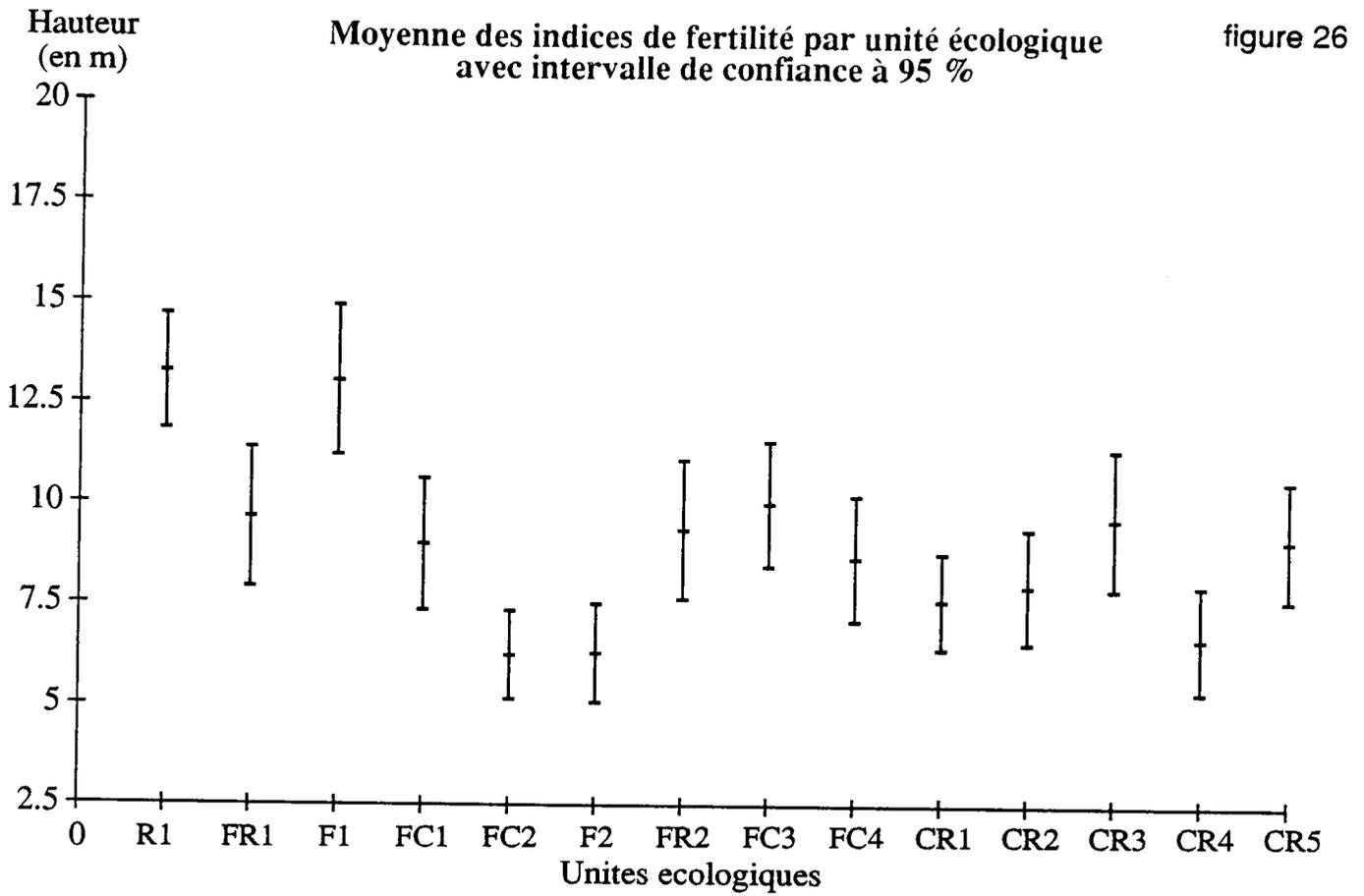
Nous pensons ainsi fournir un cheminement permettant d'évaluer les potentialités d'une station pour le Pin brutia, avec une précision de l'ordre d'une classe de fertilité. Cette précision est suffisante pour faire la plupart des choix d'objectifs.

Principaux résultats statistiques par unité écologique

Figure 24

Unité écologique	Effectif	Moyenne	Médiane	Variance	Ecart type
R1	12	13,3	12,2	12,6	3,6
FR1	8	9,7	9,3	3,1	1,8
F1	7	13,1	13,0	1,3	1,1
FC1	9	9,0	9,8	3,6	1,9
FC2	20	6,3	6,4	4,6	2,1
F2	16	6,3	6,3	3,7	1,9
FR2	8	9,4	9,6	2,8	1,7
FC3	10	10,0	10,4	4,5	2,1
FC4	10	8,7	8,7	7,7	2,8
CR1	17	7,6	6,9	8,0	2,8
CR2	12	8,0	8,0	6,8	2,6
CR3	8	9,7	9,6	10,4	3,2
CR4	14	6,7	6,7	2,9	1,7
CR5	11	9,1	9,6	13,2	3,6





4.7. Conclusion sur les relations facteurs du milieu - croissance du Pin brutia

4.7.1. Les traitements des données utilisés

Nous avons vu, dans le chapitre 2, que quelles que soient les méthodes de traitement employées, la précision des résultats serait certainement affectée par la nature même de notre échantillon, du fait principalement de

- l'hétérogénéité génétique de l'essence étudiée,
- la jeunesse des peuplements,
- une certaine hétérogénéité dans la façon de recueillir les éléments sur le terrain, due au nombre d'enquêteurs différents.

Malgré cela, l'exploitation des données a fait apparaître des constantes dans l'influence du milieu sur la croissance du Pin brutia, à tel point que nous avons pu en général arriver à une estimation meilleure que celle qu'on aurait pu escompter.

Concernant la nature des traitements utilisés, l'analyse facteur par facteur a donné de bons résultats, ainsi que leur hiérarchisation par la segmentation. Mais nous avons vu les défauts inhérents à cette méthode, qui fait que, soit les résultats ont une valeur statistique, et par suite prédictive, mais leur précision est trop faible, soit la précision est bonne, mais la valeur prédictive ne peut être affirmée sans vérification ultérieure sur le terrain.

C'est pourquoi nous avons préféré l'approche globale ; en effet, le nombre d'individus classé par unité écologique est en général suffisant pour donner aux résultats une valeur statistique. Ensuite, pour l'affinement de la prévision, l'utilisation des facteurs stationnels est étayée par les résultats des analyses de variance (cf. 4.1. et 4.4.).

Enfin, et surtout, la démarche en deux approches successives permet une meilleure compréhension des phénomènes du milieu et illustre bien, en particulier, comment deux types de milieu très différents écologiquement peuvent être équivalents sur le plan des fertilités.

On peut par contre objecter à cette méthode le parti pris d'utiliser l'indice de fertilité pour construire les unités écologiques.

On aurait pu structurer le milieu de façon plus rationnelle, en utilisant d'abord les macrofacteurs climat-substrat pour faire les premières divisions (= secteurs écologiques), et n'introduire la flore qu'ensuite.

La démarche aurait été plus conforme à ce qui se pratique d'ordinaire dans l'étude du milieu, mais la fourchette des fertilités par secteur aurait été bien plus ouverte.

Nous avons préféré utiliser une approche plus "autécologique", privilégiant les facteurs les plus discriminants vis à vis de la fertilité, et isolant dès le départ les stations "très bonnes" et les stations "très mauvaises".

4.7.2. Aspects pratiques

Pour utiliser les résultats, le forestier devra relever sur le terrain tous les éléments figurant au recto de la fiche de relevé donnée en annexe 2.

Ces éléments sont relativement faciles à noter, sans connaissances particulières, si ce n'est de bonnes notions de botanique.

Une fois en possession de ces données, il pourra utiliser

- soit l'arborescence issue de la segmentation, qui lui fournira une fourchette de hauteurs à 30 ans observé sur l'échantillon,
- soit, par l'intermédiaire des unités écologiques, une évaluation de la fertilité à affiner par un bilan hydrique, non chiffrée, mais de valeur prédictive plus sûre.

Pour les raisons exposées au paragraphe précédent, nous pensons préférable de valoriser l'utilisation du deuxième outil.

La prise en compte de l'aspect pratique de cette démarche pour l'utilisation nous a amené à formuler quelques propositions pour les études ultérieures.

4.7.3. Propositions méthodologiques

On peut remarquer que, pour se situer dans une des unités écologiques définies dans la présente étude, l'utilisateur doit faire appel à des critères de niveau différent : d'une part, des critères stationnels, en particulier la flore, qui varient très rapidement sur le terrain, et d'autre part, des "macrofacteurs" comme le climat et le substrat. Par exemple, roche (macrofacteur) + flore (critère stationnel) => unité écologique FR.

Or, le forestier qui a un choix d'essence à faire (reboisement ou sylviculture), considère, avant d'aborder la station proprement dite, la surface totale sur laquelle il doit travailler (surface à reboiser, parcelle forestière). Il lui serait utile à notre avis, d'avoir une idée grossière de la fertilité moyenne de cette surface, notamment par comparaison avec d'autres situations, avant de se préoccuper des critères stationnels proprement dits.

Donc, à la place de l'unité écologique telle qu'elle figure dans la présente étude, il serait intéressant de construire des "pré-stations", définies uniquement par les critères "pré-stationnels".

Ceux-ci sont, outre le **climat** et la **roche-mère** :

- la tranche altitudinale,
- la topographie d'ensemble (versant, plaine, plateaux),
- l'exposition du versant,
- la distance au littoral,
- éventuellement la petite région naturelle (cf. RIPERT, NOUALS, FRANC).

La flore peut intervenir à ce stade, mais de façon grossière (indicateur de température, d'acidité).

Enfin, le choix parmi ces critères doit se faire en fonction de la fertilité, car, dès cette étape, on doit pouvoir faire apparaître des moyennes de fertilités, dont certaines devront être significativement différentes (ce qui suppose des effectifs suffisants pour présenter une valeur statistique).

Le forestier pourra, alors avoir, dès ce stade, une idée de la fertilité la plus probable qu'il pourra obtenir sur une station moyenne, pour cette essence.

Il pourra ensuite approcher les stations proprement dites en se basant sur cette moyenne, et en faisant varier de part et d'autre les plus ou moins bonnes fertilités. Les critères nécessaires lui seront fournis par l'étape suivante de l'étude, qui se résume en fait à évaluer le bilan hydrique et trophique par l'étude de la flore et des critères stationnels proprement dits soit : exposition de la station, topographie locale (replat, thalweg, croupe, concavité, convexité, etc ...), pente, profondeur, affleurements, cailloux, texture, HCl, etc ...

Les avantages attendus de cette approche sont :

- D'abord pour l'utilisateur, un cheminement normal pour faire un choix d'essence (d'abord se situer dans un contexte puis choix à l'intérieur et en connaissance de ce contexte).
- Ensuite, pour une concordance avec le principe général d'étude du milieu par approches successives emboîtées. On parviendra ainsi plus facilement à intégrer les résultats autécologiques dans les typologies des stations forestières.

Les études ultérieures nous montreront si ce type de démarche est pratiquement réalisable.

CHAPITRE 5 - COMPARAISON ENTRE PIN BRUTIA ET PIN D'ALEP

Au vu des sites de reboisements en Pin brutia réalisés en France, il semble que cette essence ait été considérée par les forestiers français comme une sorte de Pin d'Alep amélioré, c'est-à-dire qu'il en aurait la rusticité et la résistance à la sécheresse, tout en présentant de meilleures caractéristiques de forme et un couvert plus épais.

5.1. Réponse aux principaux facteurs limitants

5.1.1. Adaptation à la sécheresse

Toutes les essences méditerranéennes voient leur croissance conditionnée par les facteurs influant sur le bilan d'eau. Elles sont toutes aptes à supporter un certain déficit hydrique, mais cette aptitude varie selon l'essence. Nous avons vu, au chapitre précédent, certains indicateurs des seuils en dessous desquels le Pin brutia ne peut plus croître correctement. Pour faire des comparaisons valables sur les mêmes descripteurs du milieu, il aurait fallu qu'un travail similaire ait été effectué sur le Pin d'Alep, ce qui n'est pas le cas.

Les seuls éléments que nous pouvons utiliser dans ce cadre sont les suivants : chaque fois que possible, les enquêteurs ont mesuré l'âge et la hauteur des Pins d'Alep présents sur la station. Cependant, en l'absence de modèle de croissance pour le Pin d'Alep, nous n'avons pu comparer les deux essences que lorsque les âges sont identiques sur la station.

Nous n'avons que 18 relevés pour lesquels cette comparaison est possible.

Sur trois bonnes stations (H_{30} supérieur à 11 m), le Pin brutia est nettement supérieur au Pin d'Alep.

Les 15 autres relevés portent sur des stations moyennes ou mauvaises. Là, le Pin d'Alep montre des croissances égales ou légèrement supérieures.

On ne peut, bien sûr, tirer des conclusions d'effectifs aussi minimes, c'est pourquoi nous avons cherché dans les différents travaux effectués sur ces essences des compléments d'information.

GRUNWALD et SCHILLER (1988) ont mesuré le potentiel hydrique de chacune des deux essences (mesure à la bombe de SCHOLANDER), et montré que le Pin d'Alep était, de par sa physiologie, plus résistant que le Pin brutia à la sécheresse. Toutefois, ce caractère ne confère aucun avantage au Pin d'Alep dans les stations suffisamment humides.

Ce fait a aussi été observé par LIPHSCHITZ et MENDEL (1987), qui ont comparé les croissances radiales des deux essences dans 8 stations différentes écologiquement. Sur les 2 stations les plus fertiles, le Pin brutia a été supérieur, alors que la comparaison était légèrement à l'avantage du Pin d'Alep sur les autres sites.

Le Pin d'Alep semble donc être légèrement mieux adapté à la sécheresse que le Pin brutia. Par contre, celui-ci tire mieux parti des stations plus favorables.

5.1.2. Adaptation au froid

Nous avons vu que, dans son aire, le Pin brutia atteignait l'étage supra-méditerranéen, à des latitudes pouvant être supérieures à 1000 m, entrant au contact des forêts naturelles de Pinus nigra var pallasiana et Cedrus libani.

Les valeurs des températures minimales qu'il peut supporter sont très basses, nettement inférieures à celles qu'accepte la plupart des provenances de Pin d'Alep.

Enfin, lors de l'enquête de terrain, qui a eu lieu pour une grande part après les grands froids de janvier 1985, il n'a été constaté aucune mortalité due au gel dans les plantations de Pin brutia, alors qu'elles ont été nombreuses et parfois totales dans les provenances non autochtones de Pin d'Alep.

Le Pin brutia présente donc une bien meilleure résistance au gel que son cousin occidental.

5.1.3. Etages bioclimatiques

Pour synthétiser ces différences d'adaptation aux facteurs limitants, on peut se référer à la figure 29 qui représente la projection des aires naturelles des deux essences dans le climagramme pluviothermique d'Emberger.

Cette figure, où l'on trouve en ordonnée la valeur de l'indice bioclimatique d'Emberger

$$Q = \frac{1000 P}{\frac{M + m}{2} (M - m)} \quad (M \text{ et } m \text{ exprimés en degrés absolus})$$

et en abscisse les valeurs de m en °C, montre bien le décalage existant naturellement entre les deux essences vis à vis des facteurs climatiques.

5.1.4. Conclusions relatives aux facteurs limitants

Nous pensons avoir réuni dans ce paragraphe suffisamment d'informations concordantes pour affirmer que, si le Pin d'Alep et le Pin brutia sont proches écologiquement, leur habitat n'est pas exactement superposé, le Pin d'Alep supportant mieux la sécheresse, et le Pin brutia s'accommodant sans problème des basses températures.

Ces deux essences peuvent donc jouer un rôle différent dans les reboisements.

Mais les comparaisons entre essences ne doivent pas masquer les grandes variabilités intraspécifiques existant à l'égard de ces facteurs limitants.

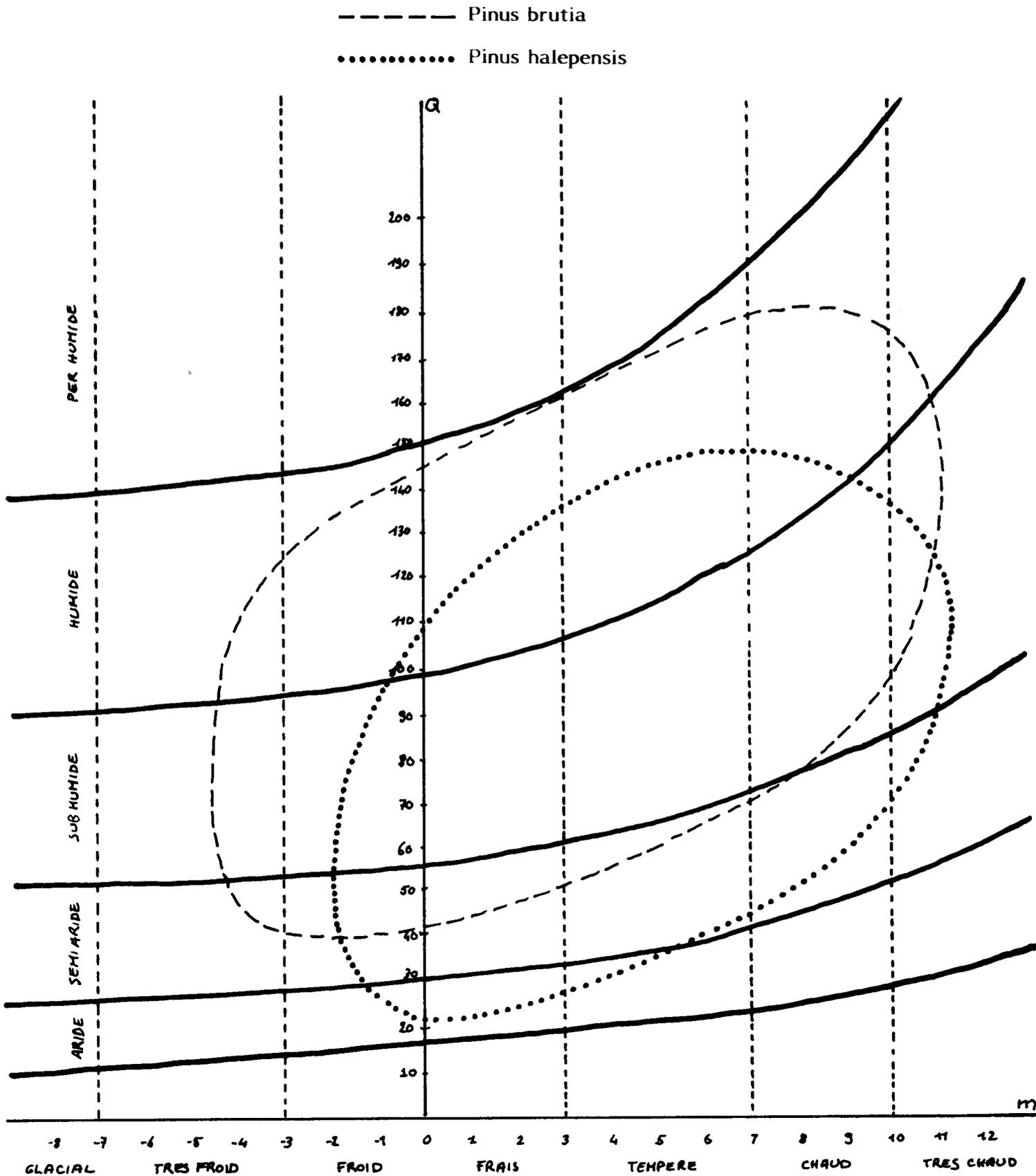
Pour mieux connaître ces variabilités, la FAO a lancé un programme international de test de provenance, destiné à l'amélioration du matériel végétal des Pins du groupe halepensis.

Ce programme est à l'heure actuelle celui qui est susceptible d'apporter le plus d'enseignements pratiques pour l'utilisation de ces essences sur le pourtour méditerranéen.

Nous allons résumer, ci-dessous les principaux résultats obtenus pour la France et l'Italie dans le cadre de ce programme (nous avons choisi ces deux pays pour faciliter la transposition des résultats sur notre territoire).

FIGURE 29

Aire de projection de Pinus brutia et Pinus halepensis
sur le climagramme d'Emberger
(d'après QUEZEL)



$$Q = \frac{2000 P}{(T+m)(T-m)} \quad \text{Metm en degrés absolus.}$$

5.2. Expériences internationales sur les provenances des pins du groupe halepensis

Sont testées 12 provenances de Pinus halepensis
 13 provenances de Pinus brutia ssp brutia
 3 provenances de Pinus brutia ssp eldarica

5.2.1. Expérimentation italienne (ECCHER, FUSARO, PELLERI 1985)

- Age à la publication des résultats : 11 ans

Comparaison entre provenances d'une même espèce

- Pin d'Alep : supériorité de vigueur pour les provenances orientales. Mauvaise résistance générale au froid.
- Pin brutia : bonne résistance au froid et à la sécheresse des provenances montagnardes et septentrionales. Mauvaise résistance au froid mais excellente vigueur de certaines provenances turques de basse altitude.

Comparaison entre espèces

- Pin brutia plus sensible à la sécheresse que les autres espèces..
- Pin d'Alep inférieur pour ce qui concerne les caractéristiques morphologiques (port et forme des fûts).

5.2.2. Expérimentation française

Nota : on trouvera ici des résultats provisoires, aimablement communiqués par M. BARITEAU (INRA), responsable de l'expérimentation française. Une publication exhaustive de ces résultats doit paraître courant 1991, dans les Annales de la Recherche Forestière).

Les deux sites sont situés dans les Bouches du Rhône (Vitrolles et Ceyreste) dans des conditions climatiques et édaphiques relativement difficiles, mais correspondant aux conditions moyennes des boisements de Pin brutia précédemment décrits.

Il faut noter que ces deux sites ont été soumis à deux événements climatiques exceptionnels, le gel de 1985, et la sécheresse de 1989 (200 mm d'eau à Marignane pour l'année 1989, poste le plus proche de l'un des sites).

Les enseignements relatifs aux facteurs limitants qui en ont été tirés sont bien sûr très riches.

- Age en 1990 : 12 ans et 14 ans.

Comparaison entre provenances d'une même espèce

- Pin d'Alep : mauvaise résistance au froid de la plupart des provenances de Pin d'Alep, mais excellente résistance de la provenance française (Gemenos). Sur le plan des croissances, la provenance française est encore très bien placée, ainsi que certaines provenances espagnoles.
- Pin brutia : en général, bonne résistance au froid mais importants dégâts dus à la sécheresse sur de nombreuses provenances.

Comparaison entre espèces

Sur le plan des croissances, les résultats sont meilleurs pour le Pin d'Alep à Vitrolles (altération de calcaire dur), alors que la constatation inverse est faite à Ceyreste (grès siliceux à ciment calcaire).

Les formes sont en général meilleures pour le Pin brutia.

Mais le principal enseignement à tirer est que l'essentiel des mortalités pour le Pin d'Alep a été consécutif au gel de 1985, alors que c'est la sécheresse de 1989 qui a surtout affecté le taux de survie des Pins brutia.

Les résultats provisoires de ces essais confirment les différences déjà évoquées entre Alep et brutia, mais mettent l'accent sur l'importance primordiale de la provenance à l'intérieur de chaque espèce.

Pour le Pin de l'Eldar, celui-ci a manifesté, tant en France qu'en Italie, un bon comportement vis à vis de la sécheresse et du froid, ainsi que des croissances correctes.

5.3. sensibilité des peuplements vis à vis du feu

On ne peut, bien sûr, évoquer l'utilisation d'une essence méditerranéenne sans se préoccuper du degré de vulnérabilité aux incendies des peuplements qu'elle constitue.

Lors de l'enquête, on a constaté que les boisements de Pin brutia effectués à des espacements classiques (2 à 3 m en tous sens) formaient rapidement, dans des conditions de végétation normale, un couvert bien plus fermé, à âge et densité égale, que ceux de Pin d'Alep.

Cependant, l'élagage naturel étant inexistant, les branches basses mortes retiennent les aiguilles ce qui forme un niveau intermédiaire de matière sèche et aérée extrêmement inflammable et combustible.

Enfin, le tapis d'aiguilles sèches et non décomposées tombées au sol est souvent épais.

Il faut cependant noter que lorsque les espacements interlignes sont larges (en général de l'ordre de 5 m pour faciliter les entretiens), la fermeture du couvert ne se produit jamais avant 25 ans, mises à part quelques très bonnes (et très rares) stations.

L'embroussaillage de ces boisements reste donc important jusqu'à un âge avancé.

Pour comparer le comportement au feu des plantations de Pin d'Alep et de Pin brutia, signalons une intéressante étude menée en Israël (ZOHAR et Al., 1988), analysant sur 223 incendies ayant eu lieu en 1985, les facteurs susceptibles d'avoir une influence sur la propagation du feu. Des méthodes statistiques assez sophistiquées d'analyses multivariées (analyse des corrélations, régressions multiples, modélisation) ont été utilisées.

Cette étude a mis en évidence, entre autres résultats, la plus grande sensibilité au feu des pinèdes à Pin d'Alep par rapport aux pinèdes à Pin brutia (*Cupressus sempervirens* s'étant avérée l'espèce la plus résistante).

Pour conclure ce chapitre, on peut donc dire que :

Les boisements de Pin brutia sont susceptibles d'être moins sensibles aux incendies que les peuplements de Pin d'Alep sous réserve du respect de certaines conditions culturales :

- Choix d'un site dont la fertilité permet des conditions normales de végétation pour cette essence (cf. chap. 4).
- Plantation à densité suffisante de plants bien répartis pour obtenir une fermeture rapide du couvert.
- Elagage précoce des branches basses pour éviter la formation d'une strate morte très inflammable entre le sol et les houppiers.

5.4. Le cas de Pinus brutia subsp eldarica

Si dans l'enquête de terrain, et les divers travaux scientifiques, cette sous-espèce n'a pas encore fait la preuve d'une vigueur supérieure, il est certain qu'elle a montré son aptitude à survivre aux conditions extrêmes de sécheresse et de froid.

Il est cependant loin d'être prouvé qu'elle est capable de constituer de vrais peuplements dans les sites où le Pin d'Alep végète mal.

Il nous semble donc raisonnable d'attendre encore quelques années pour juger du réel intérêt de cette variété pour les forestiers français.

CONCLUSION GENERALE

ORIENTATIONS POUR L'UTILISATION EN FRANCE MEDITERRANEENNE DU PIN BRUTIA COMME ESSENCE DE REBOISEMENT

A l'issue de l'ensemble de ce travail, nous pensons être en mesure d'orienter le choix de l'essence Pin brutia selon les grandes lignes suivantes :

DANS LA ZONE MEDITERRANEENNE PROPREMENT DITE (étages mésoméditerranéen inférieur et thermoméditerranéen)

Les résultats obtenus dans la présente étude permettent de prévoir, par un cheminement simple, la croissance du Pin brutia en fonction du milieu avec une précision suffisante pour permettre des choix d'objectifs.

D'une façon générale, la croissance du Pin brutia est principalement fonction de la réserve utile du sol, mais augmente aussi lorsque les caractères de chaleur et de xéricité du climat s'atténuent.

Enfin, bien que la plupart des stations étudiées aient présenté une flore plus ou moins dégradée (garrigues), la composition floristique s'est avérée un des descripteurs les plus pertinents pour rendre compte de la fertilité.

DANS LA ZONE SUBMEDITERRANEENNE (étages méso-méditerranéen supérieur et supra-méditerranéen)

Les références françaises sont actuellement trop peu nombreuses pour en tirer des conclusions. Cependant, le comportement de cette essence dans son aire d'origine permet de supposer que le Pin brutia pourrait être introduit avec succès dans les stations où le Cèdre n'est pas à sa place sur le plan édaphique (marnes et calcaires mameux notamment), et où le Pin Noir n'est plus très adapté sur le plan climatique.

L'aptitude de cette essence à croître sur sols alcalins peut lui conférer une certaine importance dans les moyennes montagnes méditerranéennes.

Il serait donc souhaitable de disposer de références dans cette zone.

SUR SUBSTRAT ACIDE

Les performances remarquables du Pin brutia sur roche mère acide tendre dans son aire naturelle, quel que soit le climat, méritent qu'on étudie son introduction dans les massifs cristallins côtiers (Maures, Albères), sur schistes ou micaschistes notamment, comme une des solutions pour le remplacement des Pins Maritimes ravagés par le Matsucoccus.

VIS A VIS DU PIN D'ALEP

- Le Pin d'Alep est légèrement mieux adapté à la sécheresse que le Pin brutia. Par contre, celui-ci tire mieux parti des stations plus favorables.
- Le Pin brutia présente une bien meilleure résistance au gel.
- Les peuplements de Pin brutia, du fait d'un couvert plus fermé sont susceptibles d'être moins sensibles au feu que ceux de Pin d'Alep, sous réserve de condition de milieu permettant une croissance correcte, et d'une sylviculture adaptée à la DFCI (densité suffisante et élagage précoce).

IMPORTANCE DU CHOIX DES PROVENANCES

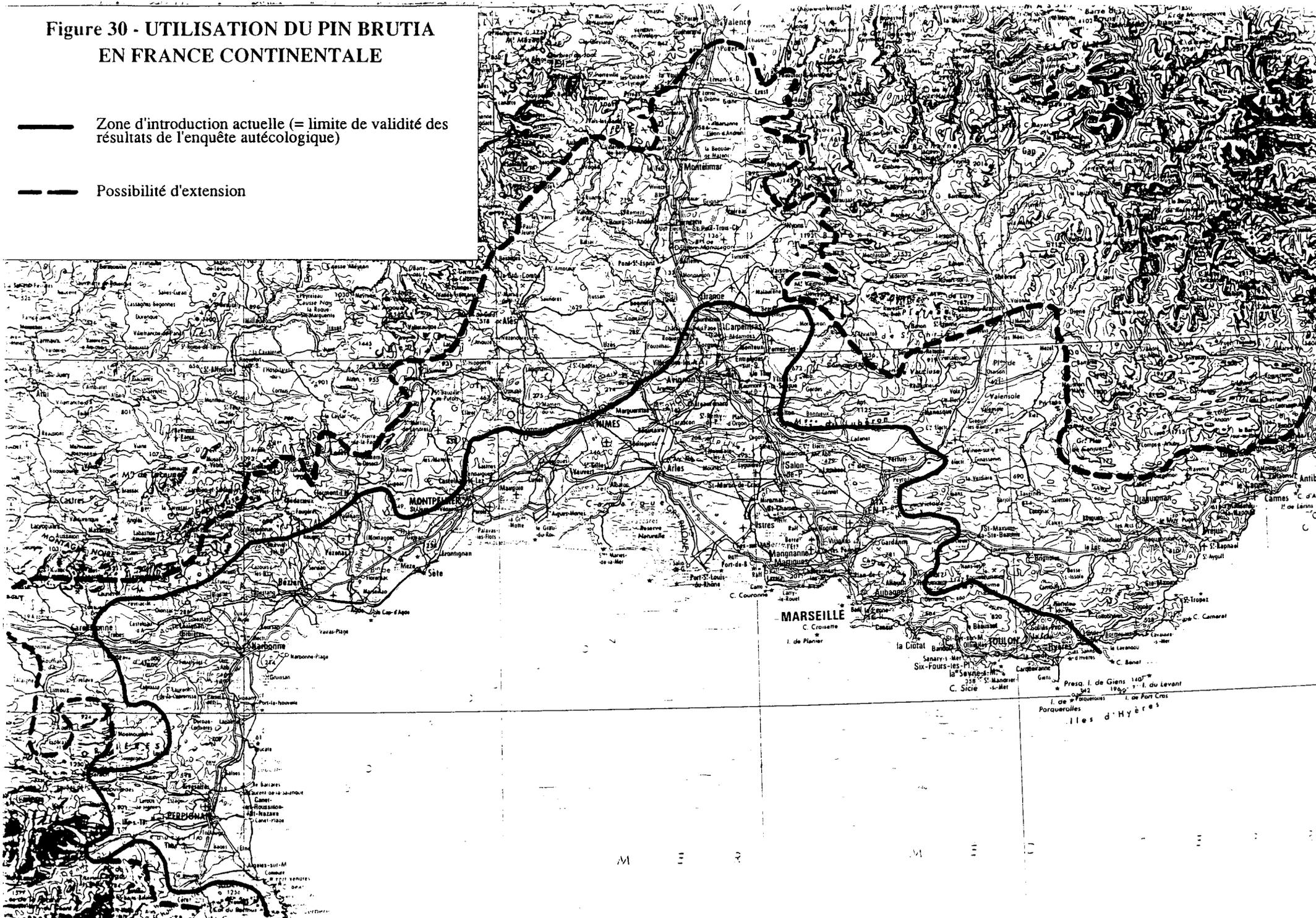
La variabilité génétique du Pin brutia est telle qu'il est primordial pour cette essence de choisir une provenance adaptée au site et à l'objectif qu'on lui destine.

L'avancement du programme international de recherche sur les provenances du groupe halepensis rend possible dans un avenir relativement proche la diffusion de matériel végétal de qualité adapté aux diverses conditions du milieu.

**Figure 30 - UTILISATION DU PIN BRUTIA
EN FRANCE CONTINENTALE**

— Zone d'introduction actuelle (= limite de validité des résultats de l'enquête autécologique)

--- Possibilité d'extension



BIBLIOGRAPHIE

1 - Bibliographie générale

- Y. AKMAN, M. BARBERO, P. QUEZEL
Contribution à l'étude de la végétation forestière d'Anatolie méditerranéenne -
phytocoenologia, vol. 5 - 1978
- M. ARBEZ
Répartition écologique et variabilité de *Pinus brutia* en Turquie, 1974
- M. BARBERO, N. CHALABI, I. NAHAL, P. QUEZEL
Les formations à conifères méditerranéens en Syrie littorale - *Ecologia mediterranea*, 1976
- M. BARITEAU
Expériences Internationales sur les provenances de *Pinus halepensis* et *Pinus brutia-eldarica* -
bilan provisoire - Non publié, février 1990
- R. BELLEFONTAINE
Synthèse des premiers essais de provenances de *Pinus brutia*, résultats provisoires - *Ann.
Rech. for. Maroc*, 1980
- A. BRETHERS
La typologie des stations forestières en Haute-Normandie - *Colloques phytosociologiques*,
1985
- P. DAGET
Atlas d'aréologie périméditerranéenne - *Nat. Monspel.*, 1980
- P. DUPLAT, M. TRAN-HA
Modèles de croissance en hauteur dominante pour le Hêtre, le Sapin pectiné et le Pin
Sylvestre dans le massif de l'Algoual - *Section technique ONF*, 1986
- A. ECCHER, E. FUSARO, F. PELLER
Résultats de l'expérimentation italienne sur les principales provenances des pins de la
section *halepensis* dix ans après la plantation - *Forêt Méditerranéenne*, t. IX, n° 1, 1987
- C. GRUNWALD, G. SCHILLER
Needle xylem water potential and water saturation deficit in provenances of *Pinus
halepensis* and *Pinus brutia* - *Forêt Méditerranéenne*, t. X, n° 2, 1988
- D. HETH and E. SPETTER
Growth of Aleppo and brutia pines as affected by thinning intensities - *Colloque INRA*, n° 19,
1983
- S.L. KRUGMAN
Note sur le *Pinus eldarica* (*Pinus brutia* var. *eldarica*), le soi-disant Pin de Mondell - *Revue
Forestière Française* XXXI, 5, 1979
- N. LIPHSCHITZ, Z. MENDEL
comparative radial growth of *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Israël - *Forêt Méditer-
ranéenne*, t. IX, n° 2, 1987
- N.T. MIROV
The genus *Pinus* - *Ronald Press N.Y.*, 1967

- I. NAHAL
Le Pin brutia, 1ère et 2ème partie - Forêt Méditerranéenne, t. V, n° 2, 1983 - t. VI, n° 1, 1984
- T. ÖZDEMİR, Ü. ELER, U. SİRLAC
Effects of release cutting for natural Pinus brutia stands in ANTALYA forest region, 1987
- K. PANETSOS
Monograph of Pinus halepensis and Pinus brutia - ANALES FORESTALES - zagreb, 1981
- P. QUEZEL
Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen
- P. QUEZEL
Esquisse phytogéographique de la végétation climatique potentielle des grandes îles méditerranéennes - Bull. Ecol., t. 19, 1988
- P. QUEZEL, M. BARBERO
Carte de la végétation potentielle de la région méditerranéenne - Editions CNRS, 1985
- SEMINAIRE sur le Pin d'Alep et le Pin brutia dans la sylviculture méditerranéenne - Tunis - 1985
A. GEZER - The sylviculture of Pinus brutia in Turkey,
I. NAHAL - taxonomie et aire géographique des pins du groupe halepensis,
P. QUEZEL - Les pins du groupe halepensis - Ecologie, végétation, écophysiologie.
- D.J. SPENCER
Dry country pine : Provenance evaluation of the Pinus halepensis - Pinus brutia complex in the semi-arid region of south-east Australia - Aust. For. Res., 1985
- H. MAYER
wälder europas, 1984
- Y. ZOHAR, A. WEINSTEIN, A. GOLDMAN, A. GENEZI
Fire behaviour in conifer plantations in Israël - Forêt Méditerranéenne, t. X, n° 19, 1988

2 - Publications du CEMAGREF d'Aix-en-Provence relatives à l'autécologie des essences forestières méditerranéennes

- Ph. BOURDENET
Enquête sur le Cèdre en Languedoc-Roussillon et possibilité d'extension - Mémoire ENITEF, 1977.
- J.Y. BOUVET
Le cyprès vert "Cupressus sempervirens" en zone méditerranéenne française - Mémoire de stage ENITEF, Nov. 1983 (137 p.).
- J. LABADIE
Etude des exigences écologiques du Pin pignon en région méditerranéenne française - Mémoire de Stage ENITEF, Nov. 1983 (100 p.).
- D. BICHARD
Classes de croissance du chêne vert dans le Sud-Est de la France. Leur relations avec quelques caractéristiques de la station, Août 1983. (56 p. + annexes).
- R. COMMERÇON
Comportement du Pin laricio en Région Méditerranéenne Française - Mémoire de 3ème année de l'ENITEF, Juin 1984.

- M. COLOMBET
Ecologie des sapins méditerranéens en Provence et Languedoc, Mémoire de 3ème année de l'ENITEF, Sept. 1984.
- R. OSTERMEYER
Enquête sur les cèdres en Languedoc-Roussillon : résultats complémentaires - Mémoire TSTFE-CFTMA, 1984 (164 p.).
- J. de MONTGOLFIER
Comment gérer la forêt méditerranéenne ? In POUR LA SCIENCE, n° 96, Oct. 1985 (12 p.).
- D. ALEXANDRIAN
Le choix des essences de reboisement en région méditerranéenne française : un exemple de liaison station/production. Colloque Phytosociologie et Foresterie, ENGREF-Nancy, Nov. 1985 (8 p.).
- C. GOMBAULT
Etude des Grands Types de Stations Forestières Méditerranéennes : Première synthèse de l'autécologie des essences de reboisement - Mémoire de stage ENITEF, Nov. 1986 (66 p. + annexes).
- CEMAGREF
Le choix des essences de reboisement en région méditerranéenne française : un exemple de liaison station/production - Informations Techniques du CEMAGREF - cahier n° 63-5, Sept. 1986 (5 p.).
- DRAF du Languedoc-Roussillon, CEMAGREF - T.F. Clermont-Ferrand, APMN Grenoble, TFM Aix
Choix des essences de reboisement en Languedoc-Roussillon - Affiche 120 x 80
- CEMAGREF
Guide Technique du Forestier Méditerranéen Français, Chapitre 3 : Essences Forestières + Classeur (33 fiches), 1987 (96 p.).
- D. ALEXANDRIAN, C. GOMBAULT
Le climat de la région méditerranéenne française. Définition des grands types climatiques en vue des études de station (projet d'article pour la RFF), 1987 (21 p.).
- C. RIPERT, D. NOUALS
Proposition de découpage interrégional en secteurs écologiques homogènes dans la zone méditerranéenne française, 1988 (43 p. + cartes).
- C. RIPERT, D. NOUALS, A. FRANC
Découpage du Languedoc-Roussillon en petites régions naturelles, 1990 (26 p. + cartes et notice).

LISTE DES ANNEXES

- 1 - Clé de détermination des pins méditerranéens du groupe halepensis**
- 2 - Fiche de relevé**
- 3 - Méthode de segmentation**

ANNEXE 1

X - CLE DE DETERMINATION DES PINS MEDITERRANNEENS DU GROUPE HALEPENSIS (NAHAL)

- 1 -- Cône largement pédonculé et réfléchi vers la base du rameau.....A
 2 -- Cône sessile ou courtement pédonculé, non réfléchi vers la base du rameau ; perpendiculaire ou dressé sur le rameau.....B

A -- Feuilles très fines, < 1 mm, molles, très finement serrulées sur les bords, 5 à 10 cm de long ; réunies par deux, rarement par trois dans une gaine ; groupées en pinceaux à l'extrémité des rameaux ; couleur vert jaunâtre.

Cônes isolés ou par paires, rarement verticillés ; écusson de l'écaille portant au centre un ombilic relevé et muni d'un petit mucron saillant ; graine à aile allongée et droite des deux côtés.

Encore adulte formée d'écailles minces et aplaties et non fissurée,

Pinus halepensis Mill

B -- Feuilles plus épaisses, > 1 mm, rigides, rugueuses, rudement serrulées sur les bords ; longues de 10 à 18 cm (23), réunies par 2, non groupées en pinceaux à l'extrémité des rameaux couleur vert foncé.
 Cônes fréquemment verticillés ; écusson de l'écaille portant un ombilic déprimé et muni d'un mucron large ; graine à aile plus large, droite du côté interne, convexe et élargie vers la base du côté externe.

Pinus brutia Ten.

Les sous-espèces de *Pinus brutia* peuvent être distinguées de la façon suivante :

- B.0 -- Ecusson de l'écaille à rayures étoilées ; apophyse saillante ; ombilic presque plat, gros.

ssp. *brutia*
 (Grèce, Turquie, Syrie, Liban, Chypre)

- B.1 -- Ecusson de l'écaille du cône bombé.
 Feuilles plus épaisses que dans le type, 8,5 à 10 cm de long. Cône dressé sur un pédoncule court, jeune : plus ou moins sphérique, mûr : ovoïde allongé, 5 à 9 cm, brun clair.

ssp. *eldarica* (Medw.) Nahal
 (Transcaucasie Centrale)

- B.2 -- Ecusson de l'écaille du cône presque plat.

- B.21 -- Ombrilic large, légèrement déprimé.
Apophyse non proéminente.
Feuilles 10 à 15 cm X 0,1.
Cône robuste, courtement pédonculé, ovoïde, légèrement
allongé, plus court que les feuilles, brun rougeâtre.

ssp. pithyusa (Stevenson)Nahal
(Côte orientale de la Mer Noire, Thrace, Turquie, Syrie)

- B.22 -- Ombrilic elliptique, profondément déprimé.
Apophyse proéminente.
Feuilles 13 à 20 cm.
Cône ovoïde, pointu, jaunâtre, écaille carénée.

ssp. stankewiczii (Sukaczew)Nahal
(Crimée méridionale, Cap Aya près de Soudak).

III - DESCRIPTION DU BOISEMENT

Département :/N° d'ordre

Espèce ou hybride

1) OBSERVATIONS SUR LE PEUPEMENT

Surface d'extension du boisement (en hectares et ares)

Recouvrement : strate arborescente/arbustive/herbacée (1/10)

Recouvrement relatif de l'espèce étudiée dans sa strate (1/10)

Nombre de plants/ha : bouquet ou alignement (1) disséminés moins de 50/ha (2) de 50 à 200/ha (3) plus de 200/ha (4) en plein
ou en bandes moins de 500/ha (5) de 500 à 1000/ha (6) de 1000 à 2000/ha (7) plus de 2000/ha (8)

Mesures dendrométriques : Age lu sur carotte | | | | |

Hauteur (en dm) | | | | |

Analyse de tige | | | | |

non (0) oui (1)

Age connu par archives ou lu sur souche (années)

Hauteur prélèvement carotte (en dm - 3)

2) REGENERATION NATURELLE

Semis : moins de 20 cm : absent (0) rare (1) fréquent (2) abondant (3)

de 20 à 200 cm : absent (0) rare (1) fréquent (2) abondant (3)

plus de 200 cm : absent (0) rare (1) fréquent (2) abondant (3)

3) PLANTATION RECENTE - TRAVAUX - MATERIEL VEGETAL

Antécédents culturaux : terre de culture (1) lande (2) garrigue ou maquis (3) forêts (4) autres (5)

Mode plantation : en plein sur terrain nu (1) en mélange sur terrain nu (2) en sous-étage (3) en bandes (4) autres (5)

Travail du sol : aucune préparation (1) potets plochés (2) labour en bande ou total (3) rootage en ligne (4)
rootage défoncement total (5) banquettes sou-solées (6)

Mise en place : au coup de pioche (1) potet ploché (2) autres (3)

Matériel végétal : semis naturels (1) semis artificiels (2) plants RN 1 an (3) plants RN 2 ans et repliés (4)
plants 1.0.G (5) plants G 1+1 (6) plants RN sans précision d'âge (7) plants godets sans autres
précisions (8) autres (préciser (9)

Provenance ou pépinière : (en clair)

Entretiens : désherbage (1) binage (2) dégagement (3) / réalisés pendant 1, 2, 3 ans et plus

Taux de reprise : (/10) / Nombre de passages en regarnis :

OBSERVATIONS GENERALES (en clair)

Etat sanitaire :

Accidents :

Caractères remarquables :

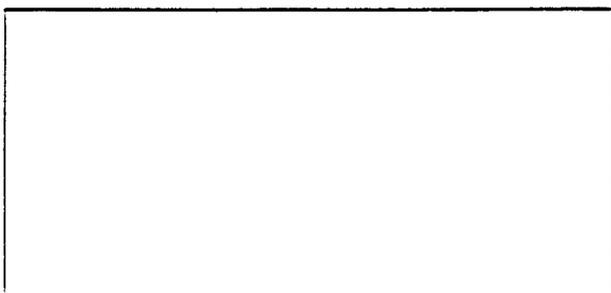
Nombre d'arbres dans le cas d'un bouquet :

Observations sur la régénération :

Observations sur la plantation :

Autres observations sur le boisement :

.....



Date :

Nom du rédacteur :

Croquis de repérage

(Indiquer les autres fiches du même boisement, souligner celles de la même station portant sur d'autres essences)

ANNEXE n°3

METHODE DE SEGMENTATION

Le programme utilisé, dit programme AID (automatic interactions detector) ne s'applique que lorsque la variable à expliquer est quantitative (c'est bien le cas pour notre indice de croissance).

On a, au départ un ensemble N de n placettes. Chaque placette est caractérisée par

- H_i : son indice de croissance (hauteur à 30 ans)
- p_i : son poids

Dans notre cas, toutes les placettes ont le même poids :
 $p_i = 1$

Le programme va scinder N en 2 sous-groupes N_0 et N_1 ;
 N , N_0 et N_1 sont caractérisés par :

- $P(N)$: poids du groupe N $P(N) = n$
- $P(N_0)$: " sous-groupe N_0 $P(N_0) = n_0$
- $P(N_1)$: " " N_1 $P(N_1) = n - n_0$
- \bar{H} : centre de gravité de N $\bar{H} = \frac{1}{P(N)} \sum_{i=1}^n p_i H_i$; $H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$
- \bar{H}_0 " " N_0 $\bar{H}_0 = \frac{1}{P(N_0)} \sum_{H_i \in N_0} p_i H_i$
 $\bar{H}_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} H_i$ avec $p_i = 1$
- I_N inertie totale du groupe N

$$I_N = \sum_{i=1}^n p_i (\bar{H} - H_i)^2 \quad I_N = \sum_{i=1}^n (\bar{H} - H_i)^2$$

Cette caractéristique est notée T.S.S. dans le programme AID (Total sum of squares).

- (N_0, N_1) l'inertie interclasse, encore appelée B.S.S. (Between sum of squares) dans le programme AID

$$\Delta(N_0, N_1) = \frac{P(N_0) \times P(N_1)}{P(N_0) + P(N_1)} (\bar{H}_0 - \bar{H}_1)^2 \quad \Delta = \frac{n_0(n-n_0)}{n} (\bar{H}_0 - \bar{H}_1)^2$$

Pour chaque variable, la procédure calcule la moyenne des H_i de chaque modalité et elle classe ensuite ces modalités par ordre de fertilité croissante.

Pour une variable dont les k modalités sont ordonnées, il n'y a que $(k-1)$ dichotomies possibles :

N_0 placettes de la 1ère modalité N_1 : 2ème à kème modalité

N_0 placettes de la 1ère et 2ème modalité N_1 : 3ème à kème modalité

.

.

N_0 placettes de la 1ère à la $(k-1)$ ème N_1 : kème modalité.

Pour chaque variable, le programme retient la coupure qui fournit la plus grande inertie interclasse (B.S.S. maximum).

La dichotomie définitive se fait sur la variable pour laquelle la valeur précédemment retenue est la plus forte, c'est-à-dire pour laquelle les 2 groupes créés sont les plus distincts possibles.

La procédure se poursuit ensuite avec les groupes N_0 et N_1 considérés comme groupes de départ.

Conditions d'arrêt de la segmentation

. La dichotomie n'est possible que si l'inertie interclasse est supérieure à un pourcentage fixé à l'avance de l'inertie totale. Nous avons retenu la valeur $p_2 = 1\%$. On impose donc à la procédure B.S.S./T.S.S. $> 2 \%$.

. Un groupe ne peut être créé que s'il renferme un nombre minimum de placettes (5 dans notre cas), et si la somme des H_i^2 de ce groupe est supérieure à un pourcentage p_1 de la somme de H_i^2 de la population de départ (nous avons choisi la valeur $p_1 = 0,8\%$).