

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

ECOLOGIE DES SAPINS MEDITERRANEENS
EN PROVENCE ET LANGUEDOC

Mémoire de 3ème année présenté par Michel COLOMBET
en Septembre 1984

Avril 1988

CEMAGREF
GROUPEMENT D'AIX-en-PROVENCE
DIVISION TECHNIQUES FORESTIERES MEDITERRANEENNES

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux avec qui j'ai eu le plaisir de travailler, en particulier :

- Daniel ALEXANDRIAN, Yvon DUCHE, Pierre CHAMPROUX et Roger OSTERMEYER, ainsi que tous les membres de la Division PFCI du CEMAGREF,*
- Guy GRANDJEAN, Professeur à l'ENITEF.*

PLAN DE L'ETUDE

	Pages
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I - PRESENTATION DES SAPINS MEDITERRANEENS	2
I. LE GENRE ABIES MILLER	3
1. Caractères généraux	3
1.1. Systématique	3
1.2. Morphologie	3
1.2.1. Appareil végétatif	3
1.2.2. Appareil reproducteur	4
2. Répartition du genre Abies dans le monde	4
2.1. Le groupe asiatique	5
2.2. Les sapins américains	5
2.3. Les sapins circumméditerranéens	5
2.3.1. Extension	5
2.3.2. Origine et évolution	5
II. PRESENTATION DES ESPECES DE SAPINS MEDITERRANEENS	6
1. Le sapin Pectiné	6
2. Les sapins de Nordmann	6
3. Le sapin de Céphalonie	7
4. Abies Nebrodensis	8
5. Abies Pinsapo	8
6. Le sapin de Numidie	8
7. Le sapin de Cilicie	8
8. Conclusion	9
III. ECOLOGIE DES SAPINS MEDITERRANEENS	9
1. Comportement général	9
2. Substrat	10
3. Climat	10
4. Etagement des aires d'origine	11
5. Conclusion : classement des espèces	11
5.1. Résistance au froid	11
5.2. Résistance à la sécheresse	12
IV. LES SAPINS MEDITERRANEENS EN REBOISEMENT	13
1. Utilisation	13
2. Méthodes d'introduction	13
2.1. Plantation en plein	13
2.2. Plantation en bandes	14
2.3. Plantation en îlots porte-graines	14
2.4. Plantation sous abri	14
3. Traitement	14
4. Régénération	15
V. DONNEES DE PRODUCTION	15
1. Dans les aires d'origine	15
2. En France	15

VI.	LES ENNEMIS DU SAPIN	16
	1. Le gibier	16
	2. Parasites et maladies	16
	2.1. Le gui	16
	2.2. Le "chaudron" ou "dorge" du sapin	16
	2.3. Les chermès du sapin	17
	2.4. Autres maladies et parasites	17
	 CHAPITRE II - LE PROTOCOLE D'ETUDE	 18
1.	MISE AU POINT DE LA METHODE	19
	1.1. Détermination d'un critère de fertilité	19
	1.2. Délimitation de la zone d'étude, repérage des sites ...	20
	1.2.1. Délimitation de la zone d'étude	20
	1.2.2. Repérage des sites	20
	1.3. Elaboration d'une fiche de mesure	20
	1.4. Choix des espèces de sapins	20
	1.5. Les peuplements à étudier	21
	1.5.1. Critères de sélection	21
	1.5.2. Types de peuplements étudiés	21
	1.5.3. Cas des peuplements mélangés	21
	1.6. Choix d'un type de placette	22
	1.6.1. Forme	22
	1.6.2. Taille	22
2.	LES RELEVES DE TERRAIN	22
	2.1. Implantation de la placette	22
	2.1.1. Conditions d'implantation	22
	2.1.2. Nombre de placettes par boisement	23
	2.2. Les facteurs relevés sur le terrain	23
	2.2.1. Les variables écologiques	23
	2.2.2. Les variables floristiques	23
	2.3. Relevés dendrométriques	23
	2.3.1. Détermination de l'espèce	23
	2.3.2. Mesure de la hauteur dominante	24
	2.3.3. Mesure de l'âge	24
	2.3.4. Mesures d'accroissement	24
	2.3.5. Autres facteurs	25
3.	LES PROBLEMES RENCONTRES	25
	3.1. Identification des espèces	25
	3.2. Le couvert forestier	26
	3.3. Hétérogénéité des boisements mesurés	26
	3.4. Choix de la hauteur dominante comme critère de ferti- lité	26
4.	RESULTATS	26
	4.1. Répartition des relevés par département	27
	4.2. Répartition par espèce	27
	4.3. Répartition par classe d'âge	28

CHAPITRE III - COURBES ET INDICE DE CROISSANCE	29
I. CONSTRUCTION D'UNE COURBE MOYENNE	30
1. Méthode employée : la régression curvilinéaire	30
1.1. Exposé de la méthode	30
1.2. Application à notre cas	31
1.2.1. Les données expérimentales	31
1.2.2. Problèmes des différentes espèces	31
1.3. Tracé de la courbe	32
1.4. Résultats	32
1.4.1. Courbes à asymptote horizontale	32
1.4.2. Courbes à asymptote oblique	33
1.5. Conclusion sur la méthode	33
2. Tracé de la courbe à la main	34
2.1. Collecte de nouvelles données	34
2.2. Tracé de la courbe - octroi d'une formule mathématique	35
2.3. Conclusion	36
II. ETABLISSEMENT DU FAISCEAU DE COURBES	36
1. La méthode	36
2. Résultats	36
3. Problèmes	37
III. L'INDICE DE CROISSANCE	37
1. Choix d'un indice	37
2. Calcul de H50	37
3. Répartition des indices de croissance	38
4. Moyenne d'indice par espèce	38
CHAPITRE IV - ANALYSE DE LA CROISSANCE	39
I. INFLUENCE DE CHAQUE VARIABLE ECOLOGIQUE CONSIDEREE ISOLEMENT	40
1. Méthode d'étude : l'analyse de variance	40
2. Influence des variables climatiques	42
2.1. Pluviosité annuelle	42
2.2. Pluie d'été	43
2.3. Température moyenne des maxima du mois le plus chaud	43
2.4. Données de synthèse	43
2.4.1. Quotient pluviothermique d'Emberger	43
2.4.2. Nombre de mois secs selon Gaussen	44
2.5. Résultats	44
2.6. Conclusions	45
3. Influence des variables édaphiques	46
3.1. La roche-mère	46
3.2. Réaction à l'acide chlorhydrique	47
3.3. La texture	47
3.4. Profondeur du sol	48
3.5. Pourcentage de cailloux dans le sol. Pourcentage de cailloux en affleurement	48
3.6. Conclusion	49

4.	Influence des variables stationnelles	49
4.1.	La topographie	49
4.2.	Autres variables stationnelles	50
5.	Conclusion	50
II.	UTILISATION DES DONNEES FLORISTIQUES	51
1.	L'information mutuelle	51
1.1.	Principe	51
1.2.	Résultats	52
1.3.	Les tests botaniques	56
2.	L'analyse factorielle des correspondances	57
2.1.	Elaboration des groupes floristiques	58
2.2.	Diagonalisation	61
2.3.	Critères de définition des stations	61
2.4.	Mise en relation avec les facteurs écologiques	63
2.4.1.	Facteurs climatiques	63
2.4.2.	Facteurs géographiques	65
2.4.3.	Facteurs géologiques et édaphiques	66
2.5.	Explicitation des stations, relation avec la ferti- lité	66
2.6.	Croissance comparée des différentes espèces	70
2.7.	Problème	71
III.	SYNTHESE	71
	CHAPITRE V - AUTRES RESULTATS	72
I.	ETUDE DES PEUPEMENTS MELANGES	73
II.	ETUDE SOMMAIRE DE LA REGENERATION	78
	CONCLUSION	81

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, d'importants efforts de reboisement sont consentis en région méditerranéenne française. Malheureusement, ceux-ci se heurtent souvent à des conditions naturelles difficiles (sécheresse, relief, incendie).

C'est pourquoi le CEMAGREF a décidé d'étudier chaque essence de reboisement susceptible d'être utilisée en zone méditerranéenne française afin de mieux connaître ses exigences écologiques et ses potentialités. De telles études ont déjà été réalisées sur le cèdre, le cyprès vert, le pin pignon, le pin laricio.

Le présent travail se propose de faire de même sur les sapins méditerranéens. Encore peu introduits en France voici une vingtaine d'années, ils connaissent depuis un intérêt accru ; l'INRA a même engagé une étude de provenance à leur sujet.

Notre étude va essayer de faire le point sur leur introduction en région méditerranéenne. A partir de nombreux relevés effectués en Languedoc et en Provence, nous évaluerons dans un premier temps leur croissance en hauteur, représentée par un faisceau de courbes (âge, hauteur dominante).

Nous étudierons ensuite, pour chaque espèce de sapins, l'action des facteurs du milieu sur la croissance, et nous essayerons de la chiffrer. Dans un dernier temps, nous comparerons brièvement les croissances des différentes espèces de sapins méditerranéens à partir des quelques peuplements mélangés que nous avons rencontrés.

CHAPITRE I

PRESENTATION DES SAPINS MEDITERRANEENS

Le terme "sapins méditerranéens" regroupe plusieurs espèces de sapins réparties tout autour de la Méditerranée et composant l'un des trois groupes géographiques du genre *Abies*. Examinons le genre *Abies* dans son ensemble avant de nous intéresser plus spécialement au groupe méditerranéen.

1. LE GENRE *Abies* MILLER (1754)

1. Caractères généraux

1.1. Systematique

Le genre *Abies* appartient à la famille des Pinacées, et plus précisément la tribu des Abiétées (présence de rameaux longs uniquement). D'un point de vue systématique, il se caractérise par un cône dressé se désarticulant à maturité, des aiguilles fixées directement sur le rameau (c'est-à-dire sans coussinet) et des chatons mâles insérés isolément (Debazac, 1964).

1.2. Morphologie

1.2.1. Appareil végétatif

Les sapins sont des arbres atteignant généralement des dimensions importantes, à tige normalement unique et droite.

. Port : conique dans le jeune âge, il devient tabulaire chez les sujets âgés ; cela provient d'une diminution de la croissance de la flèche terminale qui se voit alors rattrapée par les branches latérales.

. Ramification : chez le sapin, il n'existe que des rameaux longs (auxiblastes). Chaque année, la flèche édifie une nouvelle pousse terminale possédant des ramifications latérales peu vigoureuses réparties sur toute la longueur du rameau, ainsi qu'un pseudoverticille de branches latérales nettement marqué.

. Aiguilles : elles persistent plusieurs années sur le rameau. Deux facteurs influent sur leur disposition :
 - la situation du rameau vis à vis de l'éclairement (rameau d'ombre, de lumière) ;
 - le fait que le rameau soit sexué ou non (rameau fertile ou stérile).

1.2.2. Appareil reproducteur

Le genre *Abies* est un genre monoïque à inflorescences unisexuées en chatons mâles et femelles, situées sur les rameaux d'un an. Après fécondation, l'inflorescence femelle évolue vers un cône dressé à maturation annuelle, constitué d'un axe central, le rachis, autour duquel sont fixées les écailles ligneuses.

A chaque écaille correspond une bractée dont la longueur varie suivant les espèces. De ce fait, la bractée peut être saillante ou incluse dans le cône.

A maturité, les écailles se détachent et tombent, ne laissant que le rachis sur le rameau : c'est la désarticulation du cône permettant la dissémination des graines ailées par le vent.


2. Répartition du genre *Abies* dans le monde

Comptant une soixantaine d'espèces environ, il est présent dans tout l'hémisphère Nord. On le trouve depuis le cercle polaire (où il se localise à basse altitude) jusqu'au tropique du Cancer (il se cantonne alors dans les montagnes).

On individualise trois grands groupes géographiques :

Figure n° 1

Aire naturelle des sapins méditerranéens (Quezel, 1974)

- | | | | |
|---|----------------|---|-----------------------|
| 1 | ABIES PINSAPD | 7 | A. EQUI-TROJANI |
| 2 | A. MAROCCANA | 8 | A. BORNMUELLERIANA |
| 3 | A. NUMIDICA | 9 | A. NDROMANNIANA |
| 4 | A. NEBRODENSIS |  | A. BDRISIREGIS |
| 5 | A. CEPHALONICA | — | LIMITE SUD DE A. ALBA |
| 6 | A. CILICICA | | |

2.1. Le groupe asiatique

Il comprend de nombreuses espèces. Rarement introduites en France, leur intérêt forestier est très mal connu.

2.2. Les sapins américains

Ils sont surtout bien représentés dans l'Ouest de l'Amérique du Nord. On y trouve de nombreuses espèces, certaines d'entre elles montrent d'intéressantes possibilités d'utilisation forestière en France.

Nous pouvons citer *Abies grandis* en climat océanique, *Abies concolor* en climat méditerranéen et *Abies lowiana*.

2.3. Les sapins circumméditerranéens

2.3.1. Extension

Localisés sur le pourtour de la Méditerranée, ils se cantonnent essentiellement sur les massifs montagneux.

2.3.2. Origine et évolution

Au début du tertiaire, il n'existait qu'un seul sapin dans toute la zone périméditerranéenne : *Abies priscopectinata* (Pauly, 1962). A la suite de bouleversements géologiques (effondrement de la Méditerranée, formation des Alpes), son aire s'est morcelée, des barrières écogéographiques se sont formées, séparant les populations et permettant ainsi à l'espèce initiale de se différencier.

De nos jours coexistent différentes espèces distinctes morphologiquement, à aires disjointes pour la plupart et réparties tout autour de la Méditerranée. La figure 1 précise l'aire naturelle de chacune des espèces. Ces espèces sont toutes capables de s'hybrider entre elles et donnent des hybrides vigoureux et fertiles ; on parle d'espèces syngamiques. Par contre, sapins américains et méditerranéens ne s'hybrident pas entre eux.

Espèces	Rameau de l'année	Aiguilles des rameaux stériles	Bourgeon	Bractée du cône	Coul. de l'écorce
<i>Abies alba</i>	. Beige verdâtre . PUBESCENCE ROUSSATRE ou NOIRATRE	. Disposition SUBDISTIQUE . Pas de stomates sur la face supérieure . Apex tronqué ou échancré . 15-30 mm de long	Ovoïde NON RESINEUX	. Bractée SAIL- LANTE à pointe dressée ou réflé- chie	GRIS ARGENTE
<i>Abies nordmann- iana</i>	. Brun verdâtre . Rapidement glabre ou peu pubescent	. En brosse relevée, et rabattues vers l'extrémité du rameau qu'elles cachent . Pas de stomates sur la face supérieure . APEX ARRONDI ET ECHANCRE . 20-35 mm de long	Ovoïde NON RESINEUX	Bractée SAILLANTE et réfléchie	Gris brunâtre
<i>Abies bornmull- leriana</i>	Idem (mais rameau 2 brun rouge)	Idem, mais présence de stomates à la face supérieure de l'apex	Ovoïde Résineux	Idem	Idem
<i>Abies equi- trojani</i>	Idem (mais rameau 2 brun jaunâtre, glabre)	Idem bornmulleriana, mais apex pointu peu piquant	Ovoïde Résineux	Idem	Idem
<i>Abies cephalo- nica</i>	. Brun jaunâtre . GLABRE	. Insertion RADIALE . Stomates à la face supérieure de l'apex . APEX POINTU, CORNE, TRES PIQUANT	Ovoïde pointu EMPATE DE RESINE	Bractée SAILLANTE et réfléchie	Brun grisâtre
<i>Abies nebroden- sis</i>	. Gris brun . Glabrescent	. En brosse relevée laissant un sillon en forme de V . Apex arrondi avec un petit mucron corné	Ovoïde conique Résineux	Bractée SAILLANTE et réfléchie	
<i>Abies numidica</i>	. Brun rougeâtre . Glabre	. En DEMI-ECOUVILLON laissant un sillon en forme de V . Apex arrondi ou échancré, non piquant . 15-25 mm de long, EPAISSES	Ovoïde pointu Résineux à la base	Bractée INCLUSE (la moitié de l'écaille)	Brun grisâtre
<i>Abies pinsapo</i>	. Brun rougeâtre . Glabre	. EN ECOUVILLON . Faces CONCOLORES . EPAISSES, GLAUQUES, non piquantes . 10-15 mm DE LONG	Ovoïde conique EMPATE DE RE- SINE	Bractée INCLUSE (1/4 à 1/3 de l'écaille)	Brun grisâtre
<i>Abies cilicica</i>	. Brun verdâtre . Rapidement glabre	. En brosse relevée et légèrement rabat- tues vers l'extrémité du rameau qu'ELLES NE CACHENT PAS . Apex ogival, pointu, légèrement échancré . LONGUES : 20-40 mm	Pointu Très peu rési- neux	Bractée INCLUSE (la moitié de l'écaille)	Gris cendré

En majuscules : caractères forts pour la distinction des espèces.

II. PRESENTATION DES ESPECES DE SAPINS MEDITERRANEENS

Leurs principaux caractères distinctifs ont été reportés dans le tableau n° 2.

1. Le sapin pectiné *Abies alba* Mill. (1759)

C'est la principale essence résineuse de l'étage montagnard humide de l'Europe moyenne et méridionale ; il possède aussi l'aire de répartition la plus vaste parmi tous les sapins méditerranéens.

Il est présent dans tout l'arc alpin, en Allemagne (Forêt Noire), dans les Apennins, les monts de Bohême, des Tatras, des Carpathes, les Alpes Dinariques et du Rhodope.

En France, il occupe tous les massifs montagneux :

- les Alpes (700 à 1700 m),
- les Pyrénées (900 à 1500 m),
- le Massif Central (jusqu'à 1300 m),
- le Jura (500 à 1350 m),
- la Corse (1000 à 1800 m).

On le trouve aussi dans les collines du Perche (400 m d'altitude), où il est considéré comme une relique datant des dernières glaciations. L'humidité du climat lui a permis de résister au réchauffement climatique.

Le sapin pectiné se montre très sensible à la sécheresse ; néanmoins, en limite sud de son aire, il existe des races méridionales plus résistantes à la sécheresse.

En France, nous pouvons citer :

- le sapin de l'Aude (Corbières occidentales),
- le sapin de l'Issole (Alpes de Haute Provence).

De tels écotypes semblent également exister en Corse.

2. Les sapins de Nordmann

Ce terme regroupe les trois espèces de sapins de la Turquie du Nord, très voisines, mais dont les aires sont disjointes :

- *Abies nordmanniana* Spach (Caucase occidental)
- *Abies bornmulleriana* Mattfeld (centre et Ouest de la chaîne pontique). Très proche du précédent,
- *Abies equi-trojani* Ascherson et Sintenis, à l'extrême Ouest de la chaîne pontique. Ce dernier semble être un hybride entre *Abies bornmulleriana* et *Abies cephalonica* (Grèce), dont il n'est distant que de quelques centaines de kilomètres.

3. Le sapin de Céphalonie : *Abies cephalonica* Loud. (1838)

Il occupe tous les massifs montagneux de la Grèce méridionale où il forme des forêts continues de 700 jusqu'à 1800 m d'altitude ; il a donc une extension altitudinale remarquable.

Dans le centre et le Nord de la Grèce, il présente des caractères d'hybridation avec le sapin pectiné ; on l'appelle alors *Abies borisii-regis* Mattfeld. Le gradient d'hybridation augmente au fur et à mesure qu'on va vers le Nord pour atteindre des peuplements de sapins pectinés de race pure aux confins du pays.

Cette hybridation semble trouver sa cause dans la succession de réchauffements et de refroidissements du quaternaire. Les glaciations auraient favorisé la migration du sapin pectiné vers le Sud, le mettant au contact du sapin de Céphalonie avec lequel il se serait hybridé.

Après la dernière glaciation, le sapin pectiné s'est réfugié dans les montagnes de l'extrême Nord de la Grèce alors que les hybrides, mieux adaptés, sont restés dans le Nord de la Grèce continentale.

La population hybride, formée par le mélange pied à pied de tous les intermédiaires morphologiques entre le Pectiné et le Céphalonie montre que l'hybride n'est pas encore fixé, et continue à évoluer à chaque génération, éliminant les individus extrêmes pour se rapprocher d'une population homogène constituée des sujets les mieux adaptés aux conditions locales.

4. Abies nebrodensis Mattei

Cette espèce relique subsiste dans les montagnes de Sicile vers 1500 m d'altitude. En 1969, on comptait seulement 22 individus vivant à l'état spontané et beaucoup ne fructifiaient plus (Morandini, in Barbero et Quezel, 1975).

Morphologiquement, ce sapin se rapproche à la fois du sapin pectiné et du sapin de Céphalonie.

5. Abies pinsapo Boiss.

Nous avons choisi de regrouper dans cette espèce le sapin d'Espagne (*Abies pinsapo* Boiss.) et le Sapin du Maroc (*Abies pinsapo* Boiss. ssp *marocana* Trabut) bien que ce dernier soit parfois élevé au rang d'espèce.

Le sapin d'Espagne possède une aire restreinte dans les montagnes du Sud de l'Espagne entre 1200 et 1800 m d'altitude; des individus isolés descendent jusqu'à 500 m. Le sapin du Maroc est un endémique du Rif où il occupe environ 5000 hectares.

6. Le sapin de Numidie : Abies numidica De Lannoy

C'est une relique qui possède une aire très restreinte (300 ha) en Kabylie orientale (massif des Babors). Il montre des affinités avec *Abies pinsapo*.

7. Le sapin de Cilicie : Abies cilicica Carrière

Il est présent dans les montagnes du Sud de l'Asie mineure (Taurus, Antitaurus), et dans le Nord des Monts du Liban entre 1300 et 2000 m d'altitude. Rarement introduit en France, ce sapin y est peu connu.

8. Conclusion

La présence de formes hybrides et d'espèces aux caractères voisins met en relief la forte affinité existant entre les différentes espèces. D'autre part, le morcellement des aires et l'existence d'espèces reliques montre une importante évolution qui poursuit son cours de nos jours.

III. ECOLOGIE DES SAPINS MEDITERRANEENS

Toutes ces espèces présentent de nombreux points communs dans leurs exigences écologiques.

1. Comportement général

. Tous les sapins méditerranéens sont des "essences d'ombre". En effet, ils peuvent supporter un couvert arborescent prolongé (s'il n'est pas trop dense) sans que cela ne gêne trop leur croissance.

Pour les semis, le couvert arbustif se révèle même très favorable pendant les dix premières années ; surtout en région méditerranéenne. Passé ce stage juvénile, les sapins méditerranéens réclament la pleine lumière pour exprimer totalement leurs potentialités de croissance.

. Ils trouvent leurs meilleures conditions de croissance aux expositions Nord. En effet, la majeure partie de leur aire naturelle se développe en versant Nord.

. Les sapins méditerranéens ont une croissance juvénile lente. Le jeune plant semble commencer par installer un puissant système racinaire et un important feuillage d'ombre. Ce dernier assurerait la majeure partie de la photosynthèse ; les branches supérieures ne servant qu'à créer un abri vis à vis de la lumière (Descroix, 1981).

Après ce stade d'installation, qui dure environ 10 ans en conditions favorables, le jeune arbre entre dans sa phase active de croissance en hauteur.

2. Substrat

Les sapins sont réputés indifférents à la roche-mère. En effet, les limites de leur aire naturelle ne correspondent pas à des variations de la roche-mère. Les sapins méditerranéens dont l'aire est suffisamment vaste poussent sur des types de substrat variés : calcaire, marnes, schistes, roches éruptives, grès... sans montrer d'affinité particulière pour l'un d'entre eux.

Par contre, les sapins aiment les sols frais. Il s'accommode bien des sols superficiels pourvu qu'ils soient bien alimentés en eau ou suffisamment fissurés. Ils craignent les sols compacts surtout s'ils ont tendance à être mouilleux.

Pour les sapins méditerranéens, le facteur hydrique semble primordial, d'où l'importance déterminante des qualités physiques du sol, principalement ses capacités à retenir l'eau.

3. Climat

Chaque espèce possède des exigences climatiques propres. La répartition des aires naturelles permet de le comprendre aisément.

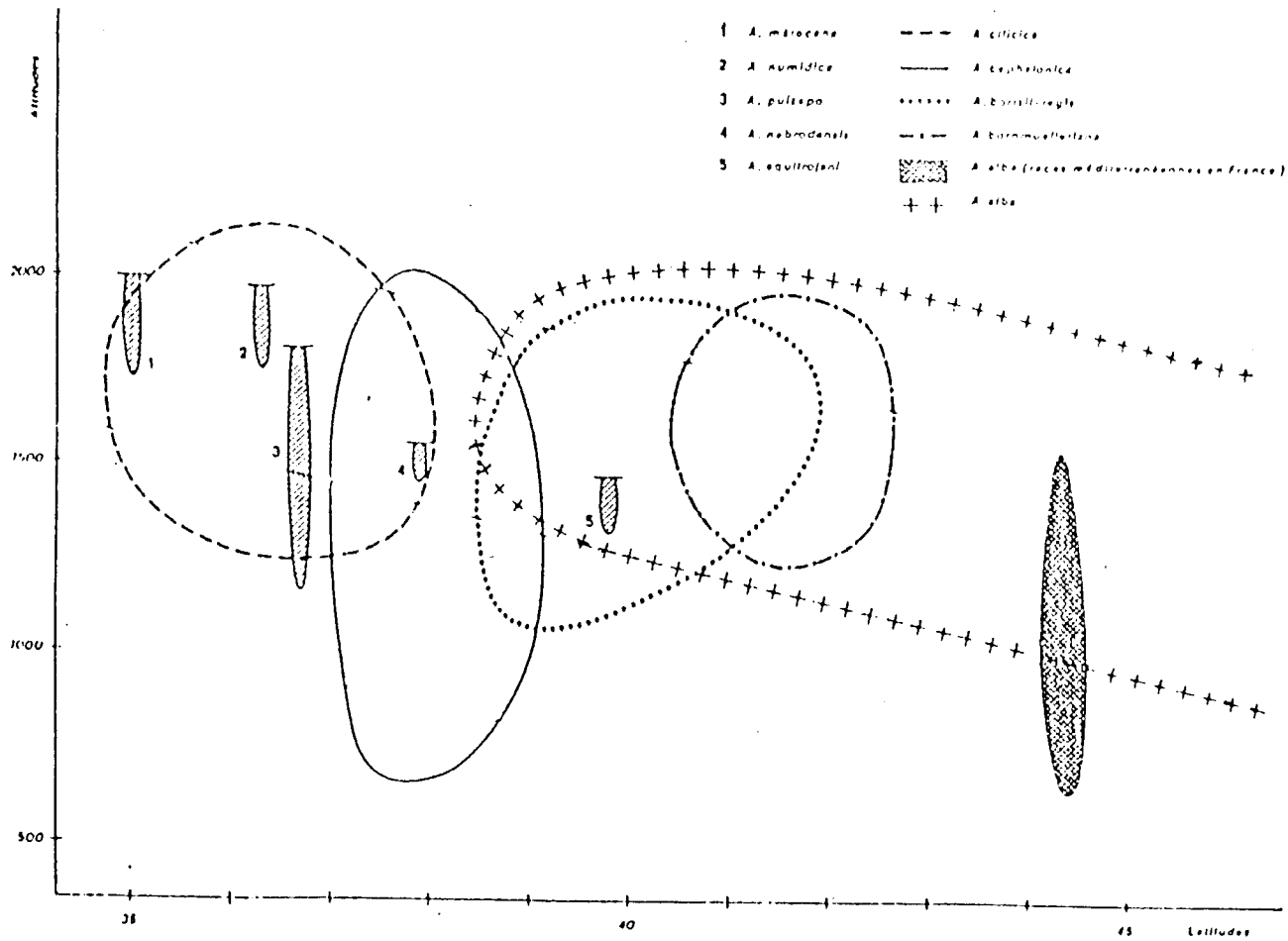
Néanmoins, les sapins méditerranéens réclament en général une pluviosité annuelle supérieure à 1000 mm pour croître dans de bonnes conditions.

Il existe des espèces plus tolérantes que d'autres à la sécheresse (sapin de Céphalonie).

La plupart des sapins subissent une sécheresse estivale très marquée, bien que "tempérée" par l'altitude.

Toutes ces espèces fonctionnent de façon optimale avec une température moyenne modérée et une humidité atmosphérique importante.

La température moyenne annuelle optimale varie entre 7 et 11 °C suivant les espèces, mais certaines peuvent supporter 14-15°C. Quelques données climatiques des aires d'origine sont données en annexe.



LOCALISATION SCHEMATIQUE DE L'ARE DES DIFFERENTS SAPINS MEDITERRANEENS • (BARBERO et QUEZEL, 1975).

Figure n° 3

4. Etagement des aires d'origine

Ne disposant pas de documents relatifs à la place des différents sapins sur le climagramme d'Emberger, nous avons reproduit un graphique (figure n° 3) permettant de comparer entre elles les aires naturelles de chaque espèce. Bien que très schématique, il apporte quand même des précisions sur

- leur extension altitudinale ;
- la situation des espèces les unes par rapport aux autres.

5. Conclusion : Classement des espèces

La roche-mère ayant peu d'influence, les facteurs à prendre en compte sont essentiellement d'ordre climatique si l'on envisage une introduction de sapins (en France, par exemple). La discrimination entre les espèces s'effectuera d'après leurs adaptations au froid (débourrement tardif) et à la sécheresse (période d'élongation brève et précoce, régulation de la transpiration).

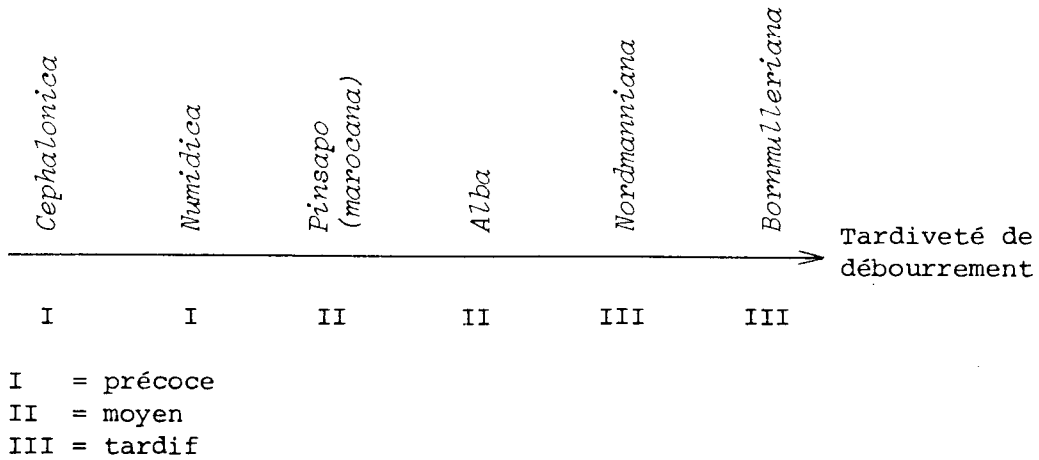
5.1. Résistance au froid

Le manque de résistance entraîne deux conséquences néfastes :

- les gélivures dues aux températures très basses ;
- la gelée des pousses de l'année due aux gels tardifs.

Certains sapins méditerranéens sont sujets aux gélivures : *Abies pinsapo*, *Abies numidica* et, à un degré moindre, *Abies cephalonica*.

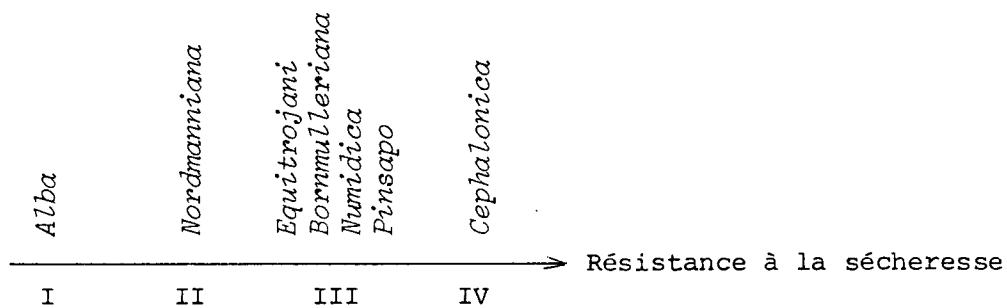
D'après leur date de débourrement, nous pouvons dresser un classement de leur résistance aux gelées tardives (Debazac, 1967).



L'INRA (Descroix, 1981) a trouvé à peu près le même classement.

5.2. Résistance à la sécheresse

Les différentes espèces ont été classées d'après les résultats d'essais menés par l'INRA qui a étudié les potentiels de sève de rameaux excisés pour chaque espèce (Descroix, 1981).



REMARQUE : Ces graphes ne représentent en fait qu'une tendance. Il ne faut pas oublier la notion de provenance qui revêt certainement un aspect primordial pour les espèces à large répartition (Céhalonie, Pectiné...). La variabilité intraspécifique est peut-être plus forte que celle existant entre certaines espèces.

IV. LES SAPINS MEDITERRANEENS EN REBOISEMENT

1. Utilisation

Ils pourront constituer, dans les cas les plus favorables, des boisements denses et résistants à l'incendie, la végétation combustible du sous-bois étant ainsi éliminée. On pourra également les introduire de façon éparses afin de coloniser les forêts dégradées contribuant ainsi, en mélange avec les chênes, à former un couvert arboré dense.

Dans les étages supérieurs (chêne pubescent et hêtre), leur introduction aura surtout pour objectif la création de forêts productives ou bien l'enrichissement de taillis.

2. Méthodes d'introduction

Elles dépendent :

- de l'objectif de la plantation,
- de la végétation en place et de sa vigueur,
- du climat local,
- des possibilités financières et techniques du reboiseur.

L'idéal serait, en zone méditerranéenne et conformément à ce qui se passe dans la nature, d'introduire les sapins sous un couvert arbustif. Ce couvert doit pouvoir être dégagé au bout d'une dizaine d'années de manière à ne pas retarder ou stopper la croissance des arbres.

Chaque méthode d'introduction possède ses contraintes.

2.1. Plantation en plein

Elle se justifie si l'on cherche à mettre en place un peuplement de production. Pour cela, le climat ne doit pas être trop sec.

2.2. Plantation en bandes

Elle consiste à ouvrir des layons dans le maquis puis à planter après travail du sol (sous-solage.....). Cette méthode possède l'avantage de procurer un abri latéral aux jeunes plants. On devra exploiter l'interbande avant qu'elle ne devienne gênante pour les sapins.

2.3. Plantation en îlots porte-graines

Elle permet de réaliser de petits boisements denses, aptes à coloniser les alentours par voie naturelle. L'investissement, par rapport à la surface considérée reste faible. Cette solution semble intéressante en région méditerranéenne où le concept de production n'est pas primordial.

2.4. Plantation sous abri

L'abri doit rester relativement clair. Cette méthode exclut toute mécanisation et demande un suivi régulier et délicat, surtout pour enlever progressivement l'abri.

3. Traitement

Il dépend de la méthode d'introduction. Bien que délicat à conduire, le traitement en fûtaie jardinée, avec mise en lumière progressive des semis semble le plus favorable. Par rapport à une régénération artificielle, il permet de conserver intacte la couverture végétale du sol et d'éviter ainsi toute dégradation par l'érosion.

Pour le sapin de Grèce, Makris (1960) préconise des trouées de régénération de quelques ares, conduisant le peuplement vers une fûtaie jardinée par bouquets.

4. Régénération

La régénération des sapins est en général facile à partir de 40-50 ans sous couvert. Elle peut même devenir exubérante et conquérir des dizaines d'hectares de taillis. Localement, et pour certaines espèces, elle peut avoir lieu en l'absence de tout couvert forestier (*Abies pinsapo* dans les garrigues du Languedoc). Les sapins ne paraissent pas capables de coloniser les milieux trop dégradés. Ils ont besoin d'espèces colonisatrices qui assurent une première couverture pour s'installer ensuite.

V. DONNEES DE PRODUCTION

1. Dans les aires d'origine

Pour le sapin de Céphalonie en Grèce méridionale, Makris (1960) avance des chiffres de 1 à 5-6 m³/ha-an suivant les stations. Les meilleurs peuplements d'*Abies Borisii-Regis* produisent jusqu'à 13 m³/ha.an et plus (Pauly, 1962). Le sapin de Cilicie, sur calcaires dolomitiques karstifiés, atteint des niveaux de production de 4-5 m³/ha.an dans les thalwegs et dépressions et seulement 2-3 m³/ha.an dans les peuplements mixtes à chêne kermès et *Juniperus excelsa*. (Akman, Barbero, et Quezel, 1979).

2. En France

- *Abies alba* : ses productions annuelles s'échelonnent de 4-7 m³/ha et jusqu'à 15 m³/ha dans les meilleures stations.
- *Abies nordmanniana* : aux Barres, il donne en moyenne 9 à 10 m³/ha.an de bois fort (diamètre supérieur à 7 cm) pour des peuplements de 60-70 ans. Dans la bordure Sud du Massif Central, des peuplements de 70 ans donnent plus de 13 m³/ha.an (BVF, n° 66/10).

VI. LES ENNEMIS DES SAPINS

1. Le gibier

Les lapins aiment beaucoup les jeunes aiguilles des sapineaux. Leur croissance initiale lente les défavorise en les exposant plus longtemps aux abrutissements.

2. Parasites et maladies

Les sapins dans les stations leur convenant sont peu sujets aux maladies.

2.1. Le gui

Le gui atteint surtout les sapins en stations sèches, en particulier ceux situés sur le passage des grives.

2.2. Le "chaudron" ou "dorge" du sapin : *Melampsorella caryophyllacearum*

Cette rouille, répandue dans l'ensemble des sapinières françaises se développe sur deux hôtes :

- un hôte principal : le sapin pectiné et d'autres sapins ;
- un hôte alternant : diverses stellaires et ceraistes, de la famille des Caryophyllacées.

Cette rouille cause deux types de dégâts sur les sapins :

- . le chaudron : c'est une boursoufflure de la tige principale ou des branches latérales. Il présente de nombreuses craquelures qui favorisent la pénétration d'autres parasites du bois. C'est aussi un point de moindre résistance où l'arbre peut casser.

- . le "balai de sorcière" : il s'agit d'une prolifération de rameaux dressés, touffus, à aiguilles courtes et jaunâtres issues d'une tumeur ligneuse. Le champignon fructifie sous forme de spores sur les balais de sorcière.

Actuellement, le seul moyen de lutte connu consiste à

rompre le cycle biologique de la rouille, en coupant puis brûlant les balais de sorcière avant la dissémination des spores.

2.3. Les chermès du sapin : *Dreyfusia nordmanniana* et *Dreyfusia piceae*

. *D. nordmanniana* attaque les jeunes plants; les piqûres de l'insecte entraînent la déformation des aiguilles. Les attaques répétées provoquent le dessèchement des rameaux et peuvent conduire l'arbre jusqu'à la mort.

. *D. piceae* colonise l'écorce. Il provoque la mort de certaines zones de l'écorce et des déformations tumorales des rameaux.

2.4. Autres maladies et parasites

Ceux-ci attaquent de nombreux résineux et entre autres les sapins :

- la maladie du rond (*Fomes annosus*) : ce champignon provoque une pourriture rouge du coeur. Elle n'est pas mortelle chez les sapins.
- l'Armillaire couleur de miel (*Armillariella mellea*). Ce champignon attaque surtout les arbres en mauvaises conditions édaphiques ou climatiques et entraîne une pourriture des racines et un dessèchement de l'arbre.
- différents insectes (dendroctones, typographes, sténographes...) peuvent également attaquer les arbres affaiblis ou les boisements fortement touchés par les chablis.

CHAPITRE II
LE PROTOCOLE D'ETUDE

Le but de ce travail est de mieux connaître le comportement des sapins méditerranéens en fonction des conditions du milieu (autécologie) et de déterminer les facteurs écologiques les plus explicatifs pour leur croissance.

Pour cela nous avons repris la méthode déjà utilisée par le CEMAGREF pour les études précédentes et nous l'avons adaptée à notre cas.

1. MISE AU POINT DE LA METHODE

Avant de commencer réellement l'enquête, nous avons dû résoudre certains problèmes.

1.1. Détermination d'un critère de fertilité

Il a fallu définir un critère qui permette de chiffrer la croissance d'un peuplement, c'est-à-dire la fertilité de la station sur laquelle il pousse. En théorie, dans un peuplement équilibré et plein, le critère de fertilité de la station est la production totale ramenée à l'hectare.

Il nous était impossible de prendre la production totale comme critère de fertilité à cause de la difficulté pour la mesurer sur le terrain.

Or, la production totale d'un peuplement est fortement corrélée à sa hauteur dominante (moyenne des hauteurs des 100 plus gros arbres à l'hectare), beaucoup plus facile à appréhender sur le terrain. C'est pourquoi nous avons adopté comme indice de fertilité de la station la hauteur dominante ramenée à un âge de référence, en l'occurrence 50 ans.

1.2. Délimitation de la zone d'étude, repérage des sites

Pour que les résultats revêtent une certaine signification statistique, il nous fallait mesurer un nombre important de peuplements, que nous avons estimé a priori aux environs de 300.

1.2.1. Délimitation de la zone d'étude :

Nous avons décidé de travailler sur les 2 régions administratives Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur. En effet, une seule région n'aurait pas suffi pour atteindre le nombre de relevés voulu.

1.2.2. Repérage des sites

Pour le Languedoc-Roussillon, nous avons utilisé les fiches d'enquêtes effectuées en 75-76 par l'ONF, la DDA, le CRPF et le CEMAGREF. En Provence-Alpes-Côte d'Azur, le repérage a été effectué par le CEMAGREF avec l'appui des services forestiers. Les peuplements des Alpes Maritimes n'étant pas repérés, nous avons éliminé ce département de notre enquête.

Toutes ces fiches de repérage portent sur des peuplements d'origine artificielle.

1.3. Elaboration d'une fiche de mesure

Nous avons adapté une fiche d'enquête déjà utilisée par le CEMAGREF afin de prendre en compte les facteurs susceptibles d'être intéressants a priori.

Un exemplaire est donné en annexe.

1.4. Choix des espèces de sapins

Au départ, nous avons choisi d'étudier toutes les espèces de sapins méditerranéens et d'y ajouter un sapin américain : *Abies concolor*, dont les exigences écologiques sont réputées voisines.

L'étude préalable des fiches nous a conduit à éliminer *Abies cilicica* trop peu représenté.

1.5. Les peuplements à étudier

1.5.1. Critères de sélection

Ont été retenus les peuplements :

- âgés de plus de 10 ans,
- en conditions forestières : les arbres isolés ou en trop petit nombre ont été éliminés,
- en condition naturelle : ceux ayant reçu des soins particuliers (arbres de parc, reboisements arrosés) ont été écartés.

1.5.2. Types de peuplements étudiés

Pour atteindre les 300 relevés prévus, nous avons été conduit à prendre en compte tous les boisements existants et répondant aux conditions énumérées plus haut. Toute stratification préalable de l'échantillon était donc exclue et nous avons été contraint d'accepter qu'il comporte une importante hétérogénéité.

En effet, nous avons mesuré :

- des peuplements artificiels issus de reboisement,
- des boisements naturels : nous avons jugé intéressant de visiter des peuplements naturels de sapin pectiné (Aude, Alpes de Haute Provence),
- des peuplements issus de régénération naturelle, sous réserve qu'ils aient reçu une certaine sylviculture (dégagements en particulier) et que leur âge dépasse 20 ans.

1.5.3. Cas des peuplements mélangés

Quand plusieurs espèces de sapin coexistaient sur la même placette, nous avons rempli une fiche de mesure par espèce. Nous y avons reporté les mêmes renseignements stationnels, et des mesures dendrométriques propres à chaque espèce.

1.6. Choix d'un type de placette

1.6.1. Forme

Nous avons opté pour une placette de forme circulaire de préférence à une placette carrée car elle est plus facile à mettre en place à l'aide d'un décimètre.

1.6.2. Taille

Elle a été définie en fonction du nombre d'arbres que l'on voulait mesurer. Une étude préliminaire nous a montré que la mesure de la hauteur de 3 arbres dominants suffisait pour appréhender la hauteur dominante avec une précision convenable. Pour se ramener exactement à la définition de la hauteur dominante, nous avons fixé la taille de la placette à 3 ares. Cette surface circulaire de 3 ares était d'autant plus pratique qu'elle donnait un rayon de placette de 10 m environ.

2. LES RELEVÉS DE TERRAIN

2.1. Implantation de la placette

2.1.1. Conditions d'implantation

L'emplacement de la placette devait satisfaire à plusieurs impératifs :

- homogénéité des conditions écologiques sur la placette ;
- représentativité du peuplement ;
- nombre d'arbres suffisant.

Dans un boisement de 2000 tiges/ha, la placette contient 60 arbres,

"	1000	"	"	30	"
"	500	"	"	15	"

Dans le cas de peuplements très clairsemés, nous avons recherché les zones les plus denses pour implanter notre placette de relevés.

2.1.2. Nombre de placettes par boisement

Dans un peuplement très étendu (cas relativement rare) nous avons effectué un relevé séparé pour toute variation d'un ou plusieurs facteurs écologiques (topographie, exposition).

Dans un boisement restreint, où les conditions écologiques varient peu, nous n'avons implanté qu'une placette.

2.2. Les facteurs relevés sur le terrain

Ils sont reportés sur la fiche d'enquête.

2.2.1. Les variables écologiques

Variables stationnelles : exposition, position topographique et pente.

Variables édaphiques : nature de la roche-mère, nature de la formation superficielle, texture et réaction à l'acide chlorhydrique N/10 de la terre fine à 20 cm ; nature de l'horizon de surface, ainsi que "profondeur du sol" (résultat de 5 sondages à la tarière à vis hélicoïdale de 3 cm de diamètre) ; appréciation à l'oeil du pourcentage d'affleurement de la roche-mère, des pourcentages de cailloux en affleurement et dans le sol.

2.2.2. Les variables floristiques

Inventaire complet des plantes reconnaissables en toutes saisons présentes sur la placette (la phase "terrain" se déroule d'août à janvier).

2.3. Relevés dendrométriques

2.3.1. Détermination de l'espèce

Nous avons utilisé 8 codes :

- 01 Pectiné
- 02 Nordmann (bornmulleriana et nordmanniana ont été confondus à cause de la difficulté à les distinguer)
- 03 Céphalonie
- 04 Pinsapo
- 05 Hybride Nordmann-pectiné (il s'agirait en fait des provenances françaises de sapin de Nordmann, hybridées avec le sapin pectiné - Arbez, 1967)

- 06 Hybride indéterminé
- 07 Concolor
- 08 Numidie.

2.3.2. Mesure de la hauteur dominante

- Hauteur des trois plus grands arbres de la placette prise :
- à la perche IFN dans les jeunes reboisements ;
 - au dendromètre Suunto lorsque la hauteur dépasse 9-10 m.

2.3.3. Mesure de l'âge

Sondage à la tarière de Pressler des 3 arbres mesurés précédemment. Le sondage, qui devait passer par le coeur de l'arbre, a été effectué à 40 cm du sol. Six ans ont été rajoutés pour obtenir l'âge total.

Si le second sondage ne s'écartait pas de plus de 5 % en plus ou en moins du premier, leur moyenne a été prise sans effectuer de 3ème sondage. Ce fut presque toujours le cas.

Sinon, nous effectuions un 3ème sondage et nous calculions la moyenne des 3 âges. Cette moyenne nous donnait l'âge du peuplement, considéré comme équienne.

Cet âge était éventuellement confirmé par le propriétaire ou les archives.

Cas des régénérations naturelles : En présence d'une forte hétérogénéité dans les âges, notamment lorsque plusieurs générations coexistaient, nous avons recherché un bouquet à peu près équienne pour appliquer le protocole précédent. La même opération a été effectuée sur 2 taches de régénération d'âge visiblement différent de façon à obtenir 2 couples (âge, hauteur), et à vérifier ultérieurement qu'ils entraient à peu près dans la même classe de fertilité.

2.3.4. Mesures d'accroissement

Dans les jeunes peuplements (25 ans), les verticilles sont bien visibles chez les sapins. Nous avons pu en mesurer une succession à l'aide de perches IFN : les pseudo-analyses

de tige sont très utiles pour connaître le départ des courbes de croissance.

2.3.5. Autres facteurs

Nous avons relevé l'abri (absent, latéral, total), la présence de fructification, de régénération, le recouvrement des différentes strates, la densité à l'hectare, la technique de plantation pour les reboisements récents ainsi que tout ce qui pouvait avoir une influence sur la croissance (maladie, pâturage, hydromorphie, gelées...).

2.4. Les facteurs notés au bureau

- Facteurs de situation : latitude, longitude, région IFN, distance au littoral, altitude sont notées au bureau à partir des cartes IGN au 1/100 000 où sont localisés les relevés.

- Variables climatiques : à chaque placette a été associée la station météorologique la plus proche. Sont notées les variables suivantes : pluviosité moyenne annuelle, pluviosité estivale, température moyenne annuelle, températures moyennes des maxima du mois le plus chaud et des minima du mois le plus froid, quotient pluviothermique d'Emberger, et nombre de mois secs suivant Gaussen.

3. LES PROBLEMES RENCONTRES

3.1. Identification des espèces

L'espèce était normalement notée sur les fiches de repérage. Quand ce n'était pas le cas, la distinction des espèces s'est faite essentiellement sur les caractères des rameaux et des cônes. Lorsqu'il n'était pas possible de nous prononcer (en régénération naturelle surtout), nous avons noté hybride indéterminé. Ce cas ne s'est produit que 11 fois.

3.2. Le couvert forestier

En de nombreux endroits, les sapins ont été plantés sous un abri dense (hêtre, châtaignier...). Quand cet abri subsistait et gênait manifestement la croissance des sapins, nous n'avons pas effectué de relevé.

Par contre, l'influence d'un couvert moins dense sur la croissance était beaucoup plus difficile à déceler. Nous avons implanté une placette ne sachant pas si nous introduisions un biais ou non.

3.3. Hétérogénéité des boisements mesurés

Un biais a pu également être commis à cause de l'hétérogénéité des peuplements : bouquets de quelques arbres, reboisements artificiels, peuplements naturels, régénérations naturelles, plantation avec abri.

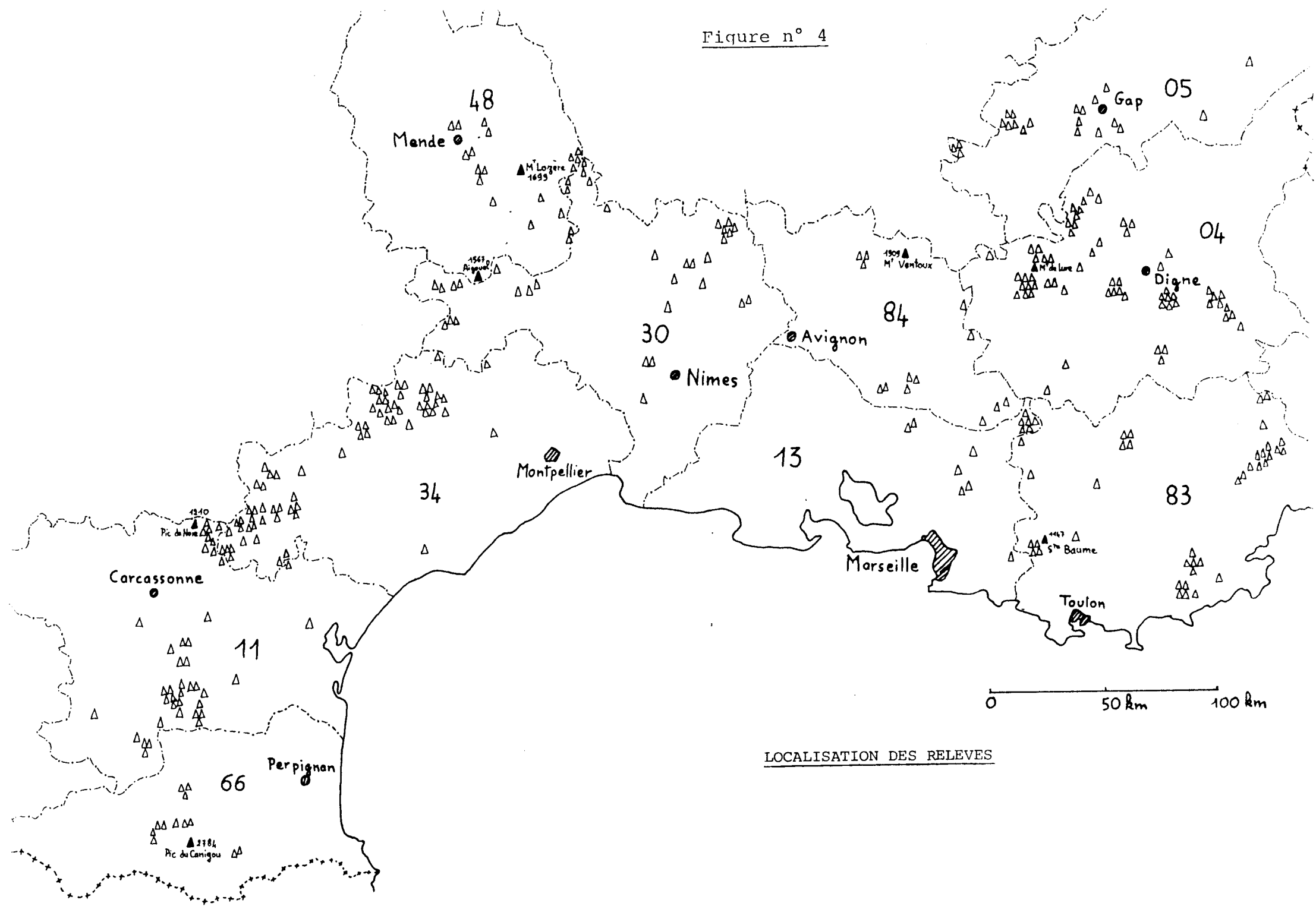
3.4. Choix de la hauteur dominante comme critère de fertilité

Dans les jeunes peuplements (moins de 25 ans), nous avons été confronté à une très grande hétérogénéité dans les hauteurs. De ce fait, la moyenne des hauteurs mesurées reflétait assez mal la physionomie réelle du peuplement.

4. RESULTATS

343 relevés ont été effectués dont 134 par un chargé d'étude du CEMAGREF. 12 ont été éliminés ensuite, principalement pour des raisons de couvert trop dense.

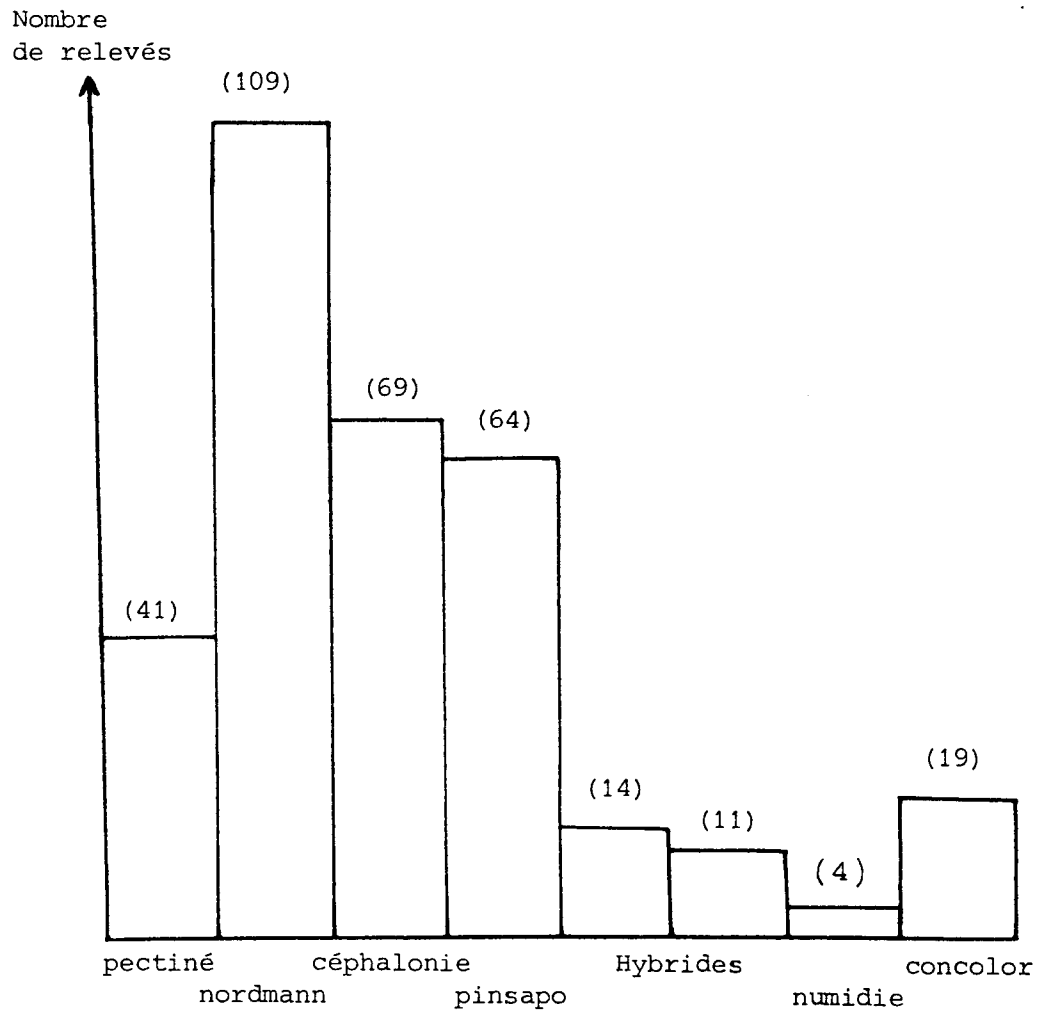
Figure n° 4



LOCALISATION DES RELEVES

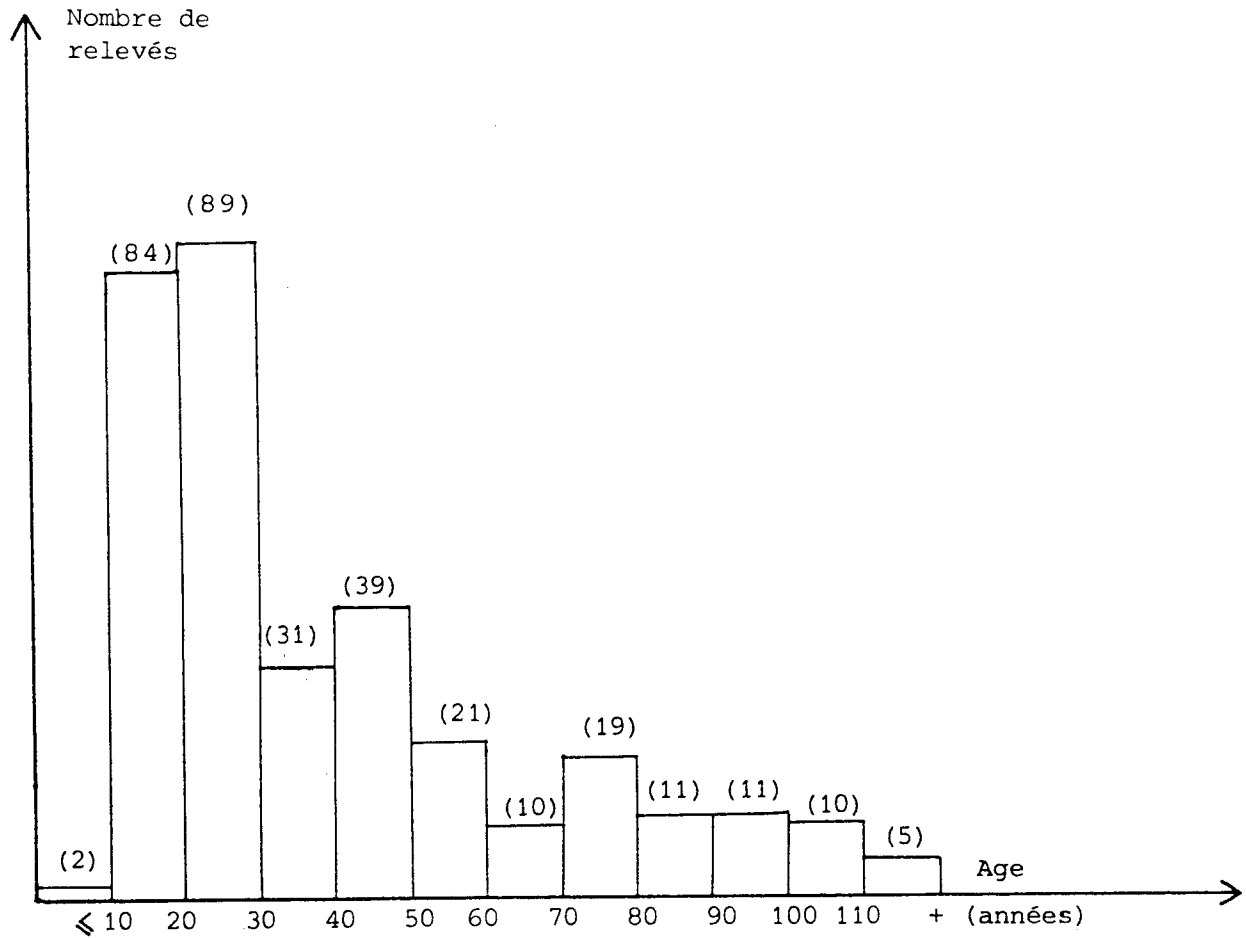
4.1. Répartition des relevés par département (figure n° 4)

Languedoc-Roussillon		Provence-Alpes-Côte d'Azur	
Lozère :	19	Bouches-du-Rhône :	20
Gard :	35	Var :	39
Hérault :	69	Vaucluse :	12
Aude :	41	Alpes-de-Haute Provence :	66
Pyrénées orientales :	12	Hautes-Alpes	18
	176		155

4.2. Répartition par espèce

4.3. Répartition par classe d'âge

Les âges s'échelonnent de 10 à 124 ans.



CHAPITRE III
COURBES ET INDICE DE CROISSANCE

Avant d'essayer d'expliquer la croissance des sapins par l'action des facteurs du milieu, il nous faut la quantifier à partir d'un modèle théorique : les courbes de croissance.

Nous commencerons par établir une courbe moyenne. A partir de celle-ci, nous associerons une courbe de croissance à chaque peuplement étudié et nous lui affecterons un indice de croissance. Cela nous permettra de comparer la croissance des peuplements entre eux, donc les fertilités entre elles.

I. CONSTRUCTION D'UNE COURBE DE CROISSANCE MOYENNE

1. Méthode employée : la régression curvilinéaire

1.1. Exposé de la méthode

La régression curvilinéaire s'effectue à partir d'un nuage de points constitué de couples (âge, hauteur). Nous proposons à l'ordinateur une équation sous forme paramétrique. Il calcule les valeurs des paramètres qui donnent la meilleure courbe d'ajustement, c'est-à-dire celle dont la somme des distances des points à la courbe est minimale.

Pour obtenir des résultats valables, le nuage de points doit être bien fourni et bien équilibré (aussi bien dans sa répartition en âge qu'en fertilité), et le modèle d'équation proposé doit être adéquat.

1.2. Application à notre cas

1.2.1. Les données expérimentales

- Le nuage de points : toutes espèces de sapins méditerranéens confondues, nous disposons de 312 couples (âge, hauteur dominante) = (moyenne des âges des 3 arbres dominants mesurés, moyenne de la hauteur de ces 3 arbres); les 19 relevés de Concolor ont été exclus du calcul de régression. La répartition par classes d'âge montre que le nuage est déséquilibré par un excès de jeunes peuplements.

- Les mesures d'accroissements : nous possédons une quinzaine de séries de mesures d'accroissements sur des peuplements de moins de 30 ans. Elles proviennent de plusieurs espèces de sapins et recouvrent une vaste gamme de fertilité. Elles n'entrent pas dans le calcul de régression mais peuvent servir à départager plusieurs courbes.

1.2.2. Problème des différentes espèces

Les 312 points de notre nuage se répartissent de la façon suivante :

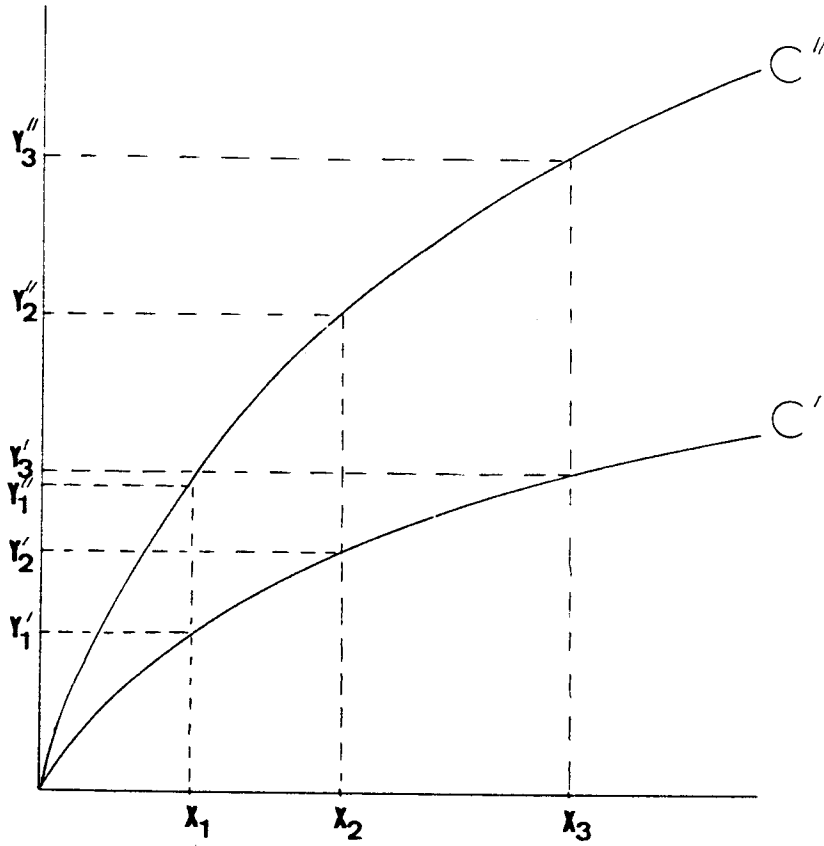
- pectiné :	41
- Nordmann :	109
- Céphalonie :	69
- Pinsapo :	64
- Autres :	29

Il est difficile d'envisager d'obtenir des résultats significatifs pour chaque espèce, étant donné :

- les faibles effectifs,
- les différences d'échantillonnage entre les espèces. Il est préférable de regrouper les espèces et effectuer la régression curvilinéaire sur le nuage total constitué des 312 points.

L'emploi de ce procédé se justifie par le fait que tous les sapins méditerranéens semblent pousser sur le même modèle de croissance (Deblaize, 1979). Nos observations de terrain et nos analyses de tige chez les jeunes tendent aussi à le confirmer.

FIGURE N° 5:Présentation de 2 courbes affines



C' et C'' sont affines équivalent à :

$$\frac{y_1}{y'_1} = \frac{y_2}{y'_2} = \frac{y_3}{y'_3}$$

1.3. Tracé de la courbe

Plusieurs modèles de courbes sigmoïdes ont été testés :

- 4 modèles à asymptote horizontale : ils tendent vers k à l'infini :

$$(1) \quad y(t) = k (1 - e^{-At})^b$$

$$(2) \quad y(t) = k (1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b})$$

$$(3) \quad y(t) = k (1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b})^c \quad (4 \text{ paramètres})$$

$$(4) \quad y(t) = k e^{-\frac{a}{t^b}} \quad (\text{équation de Schumacher}).$$

- 4 modèles à asymptote oblique : il s'agit des mêmes modèles auxquels est rajouté le paramètre p . Cela donne $(k+pt)x$ (terme exponentiel). Ainsi, les courbes deviennent équivalentes à pxt à l'infini.

1.4. Résultats

1.4.1. Courbes à asymptote horizontale

Nous avons obtenu les équations suivantes :

$$(1) \quad y(t) = 307,4 (1 - e^{-0,0265t})^{2,09}$$

$$(2) \quad y(t) = 289,8 (1 - e^{-\left(\frac{t}{57,39}\right)^{1,589}})$$

$$(3) \quad y(t) = 307,4 (1 - e^{-\left(\frac{t}{50}\right)^{1,22}})^{1,436}$$

$$(4) \quad y(t) = 476,2 e^{-29,37/t^{0,845}}$$

Nous avons reporté nos courbes sur le nuage de points.

Les courbes (1), (2), (3) coïncident très mal avec le nuage de points. En effet, les 3 courbes passent au-dessus du nuage jusqu'à 15 ans et s'ajustent évidemment très mal avec les jeunes analyses de tige.

La courbe de Schumacher (4) passe bien dans le nuage mais confirme très mal les jeunes analyses de tige. Toutes ces courbes sont donc à éliminer.

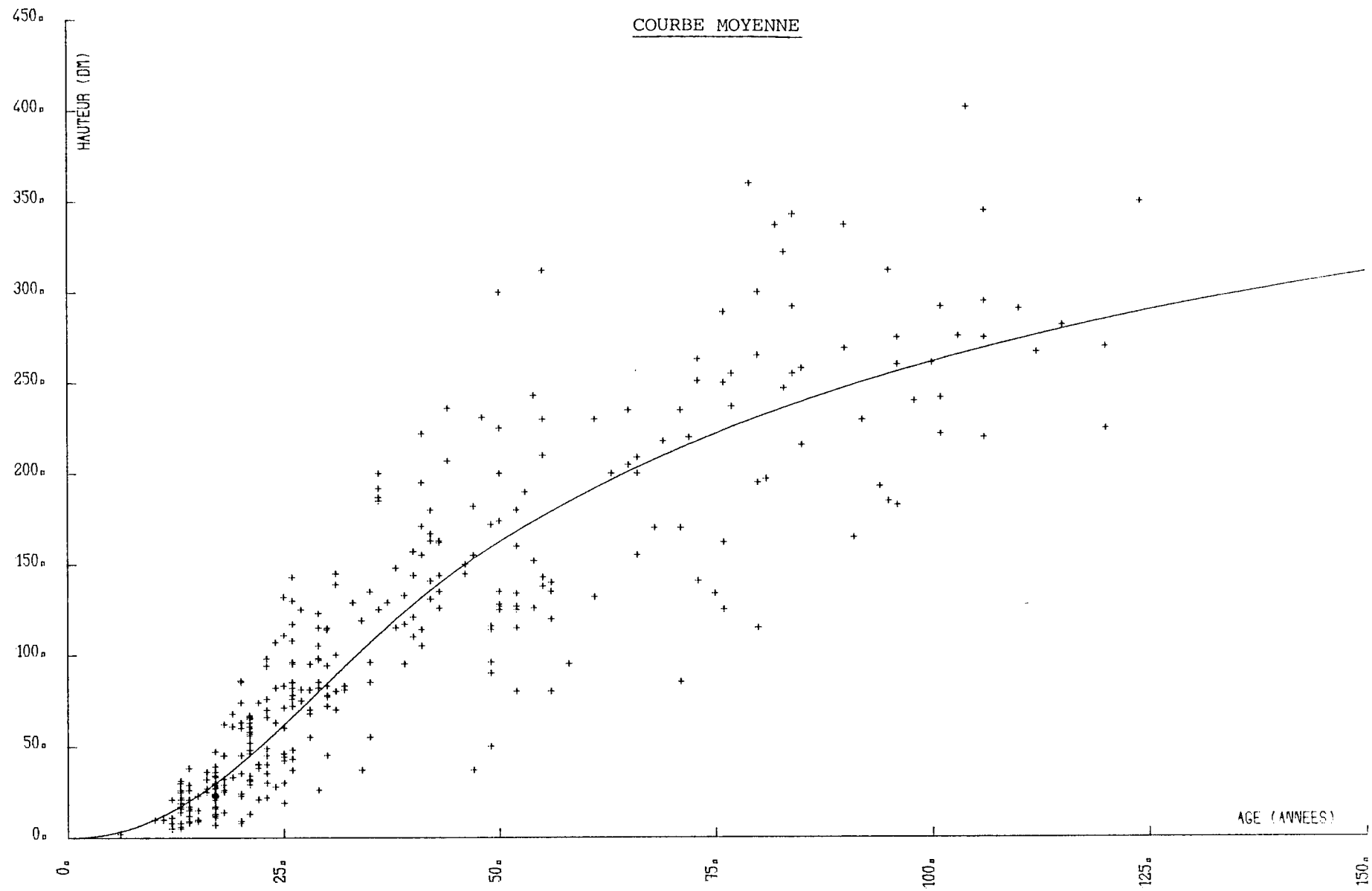


Figure n° 6

1.4.2. Courbes à asymptote oblique

Voici leur pente à l'infini :

(1) $p = 0,1 \text{ dm/an}$

(2) $p = 2,1 \text{ dm/an}$ $y(t) = (56,5 + 2,1t) (1 - e^{-\left(\frac{t}{24,67}\right)^{2,69}})$

(3) $p = 0,1 \text{ dm/an}$

(4) $p = 0,01 \text{ dm/an}$

- (1), (3), (4) ont des pentes de 1 mm/an à 1 cm/an.

Le fait de rajouter le paramètre p n'a pas été sensible.

- Ces courbes s'apparentent toujours très fortement à celles de type "asymptote horizontale" et présentent les mêmes défauts dans le jeune âge.

- (2) s'ajuste assez bien aux jeunes analyses de tige mais prend une forme de croissance linéaire à partir de 45 ans. En effet, à cet âge, le terme exponentiel vaut $(1 - e^{-\left(\frac{45}{24,67}\right)^{2,69}})$ soit 0,9935. Il ne reste donc plus que le terme linéaire : $y = 56,5 + 2,1t$. Une régression linéaire sur les arbres de plus de 50 ans donne un résultat très proche : $y = 53 + 2,13t$. Quelques mesures des derniers accroissements en hauteur sur des peuplements de 50-60 ans ont été effectuées alors. Elles ont montré que ce modèle linéaire au-dessus de 50 ans ne reflète absolument pas la croissance réelle des sapins.

Toutes ces courbes sont donc aussi à éliminer.

1.5. Conclusion sur la méthode

La méthode de la régression curvilinéaire s'est révélée défectueuse dans notre cas. Elle a confirmé qu'il faut proposer un modèle de courbe très proche de la croissance réelle de l'espèce étudiée pour obtenir un résultat correct. Nous n'avons pas trouvé ce modèle. Il doit être plus compliqué à cause de la lenteur de la croissance initiale des sapins, phénomène encore plus accentué en région méditerranéenne.

D'autre part, cela nous a confirmé qu'il est difficile de se passer d'analyses de tige pour juger correctement la validité d'un modèle testé.

FAISCEAU DE COURBES

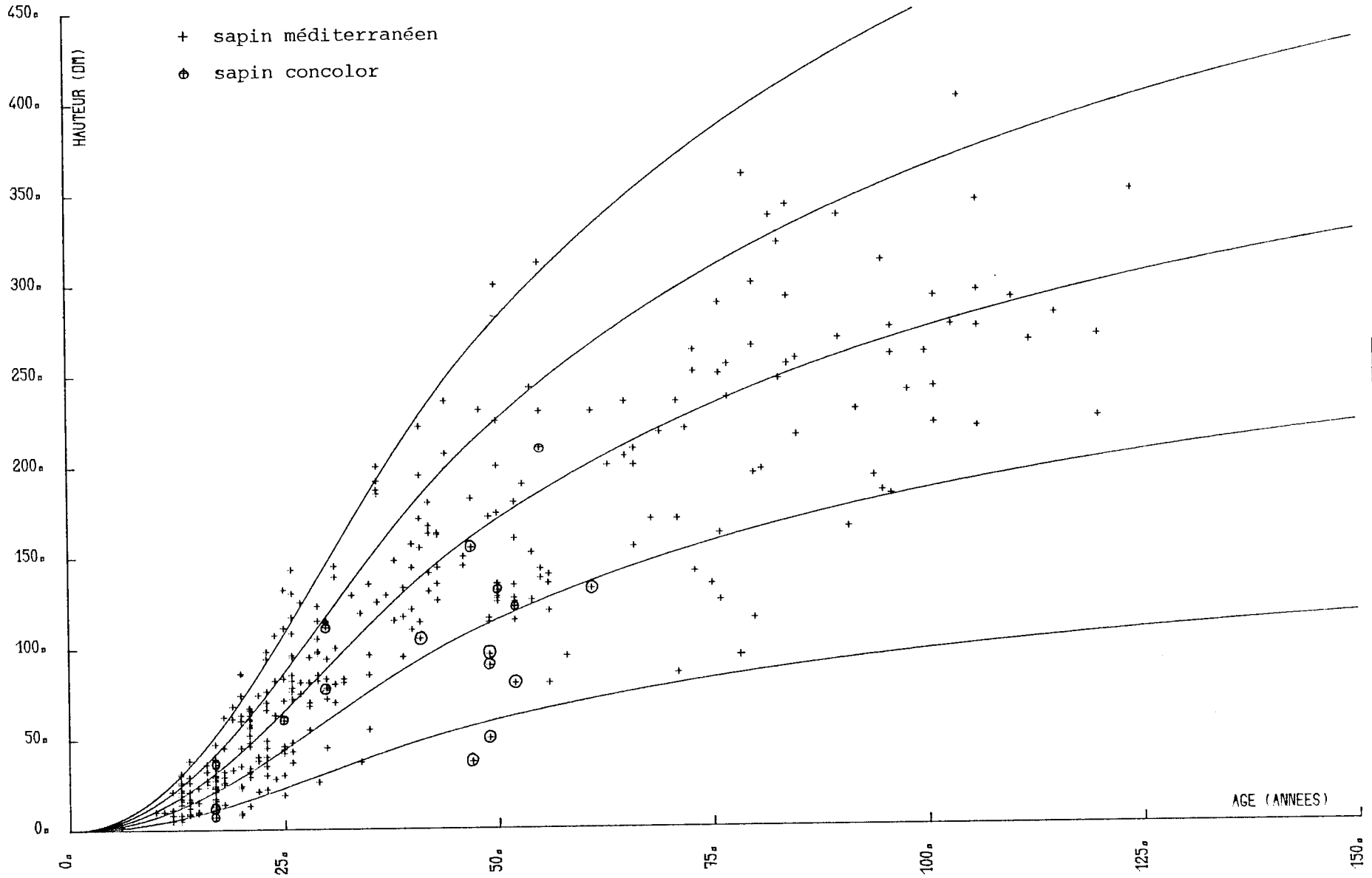


Figure n° 7

2. Tracé de la courbe à la main

Ne connaissant pas d'autres modèles d'équation plus performants, nous avons utilisé un autre procédé : tracer les courbes à la main.

2.1. Collectes de nouvelles données

Les données précédentes (nuage de points et segments d'analyses de tige) ne suffisent plus, il faut obligatoirement des analyses de tige complètes pour un emploi sérieux d'une telle méthode. Devant les problèmes posés par les analyses de tige "classiques" (difficulté d'abattage, coût des produits...) et faute de temps pour attendre d'éventuelles autorisations administratives d'abattage, nous avons donc été contraint d'avoir recours à divers expédients pour obtenir ces données d'accroissements.

. Mesures d'accroissements successifs : Nous avons appliqué cette méthode sur des peuplements de 50-55 ans, ne dépassant pas 15 m de haut. A l'aide des perches IFN, et en partant de la cime de l'arbre, il est possible de mesurer à rebours tous les interverticilles jusqu'à ce que les entrenœuds deviennent difficiles à déterminer. Nous avons pu descendre très bas (1 ou 2 m) à cause du mauvais élagage des branches basses.

L'arbre est ensuite sondé pour connaître son âge et le confronter au nombre de verticilles.

Il faut signaler l'excellente précision de cette méthode à laquelle il n'était pas évident de faire confiance a priori.

Nous avons appliqué la même méthode à des arbres atteignant jusqu'à 35 m de haut en mesurant tous les interverticilles au mètre de poche, ce qui, bien sûr, implique de monter jusqu'à la cime de l'arbre. La aussi, la méthode s'est révélée performante.

. Analyses de tige sur arbres abattus : ce cas ne s'est produit qu'une fois, ce qui a fourni trois analyses de tige provenant de la même station. Elles sont pratiquement confondues.

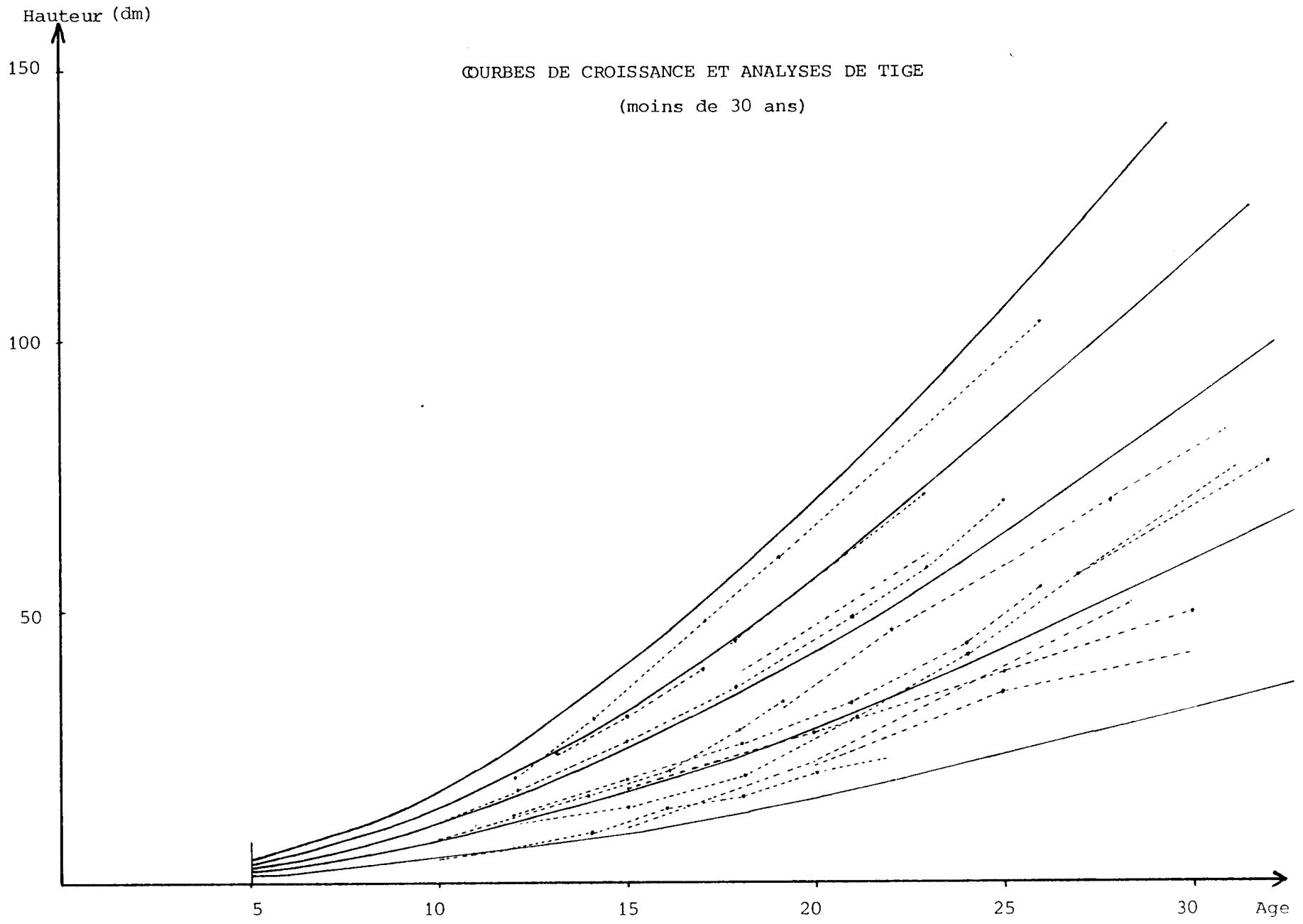


Figure n° 8

. Analyses de tige trouvées dans la littérature : Nous avons reporté trois analyses de tige effectuées par Deblaize (1979), dans la forêt de Valbonne (Gard), où nous avons implanté des placettes.

Nous avons donc rassemblé une vingtaine d'analyses de tige "sur pied" d'arbres dominants, réparties dans une vaste gamme de fertilité et appartenant aux espèces Nordmann, Céphalonie, Pinsapo.

2.2. Tracé de la courbe. Octroi d'une formule mathématique (cf. figure 6)

A partir de toutes les données, nous avons tracé à la main une courbe moyenne. Nous lui avons donné une formule mathématique pour continuer le dépouillement informatique. Cette opération s'est révélée difficile; une équation unique ne suffisant pas, il est nécessaire de distinguer :

- les jeunes boisements, avec pour formule paramétrique notre meilleure courbe de régression chez les jeunes. Le calcul de nouveaux paramètres pour l'ajuster à la courbe tracée à la main a donné l'équation suivante : $y = 271 (1 - e^{-(\frac{t}{40})^{2,15}})$;
- les vieux peuplements pour lesquels nous avons repris la formule de Schumacher qui s'était révélée la meilleure pour les boisements âgés : $y = 476,2 e^{-29,37/t^{0,8452}}$.

Les 2 courbes coïncident à 48 ans et demi (même ordonnée, même tangente), ce qui permet de les associer sans la moindre discontinuité.

Ensuite, nous avons utilisé un artifice mathématique (les parties entières) pour donner une équation unique à toute la courbe. La voici :

$$y(t) = \underbrace{\left[1 - E\left(\sqrt{\frac{2t}{97}}\right) \right]}_{\substack{= 1 \text{ avant} \\ 48 \text{ ans } 1/2 \\ = 0 \text{ après}}} \left[271 (1 - e^{-(\frac{t}{40})^{2,15}}) \right] + \underbrace{\left[E\left(\sqrt{\frac{2t}{97}}\right) \right]}_{\substack{= 0 \text{ avant} \\ 48 \text{ ans } 1/2 \\ = 1 \text{ après}}} \left[476,2 e^{-29,37/t^{0,8452}} \right]$$

FAISCEAU DE COURBES ET ANALYSES DE TIGE
(plus de 20 ans)

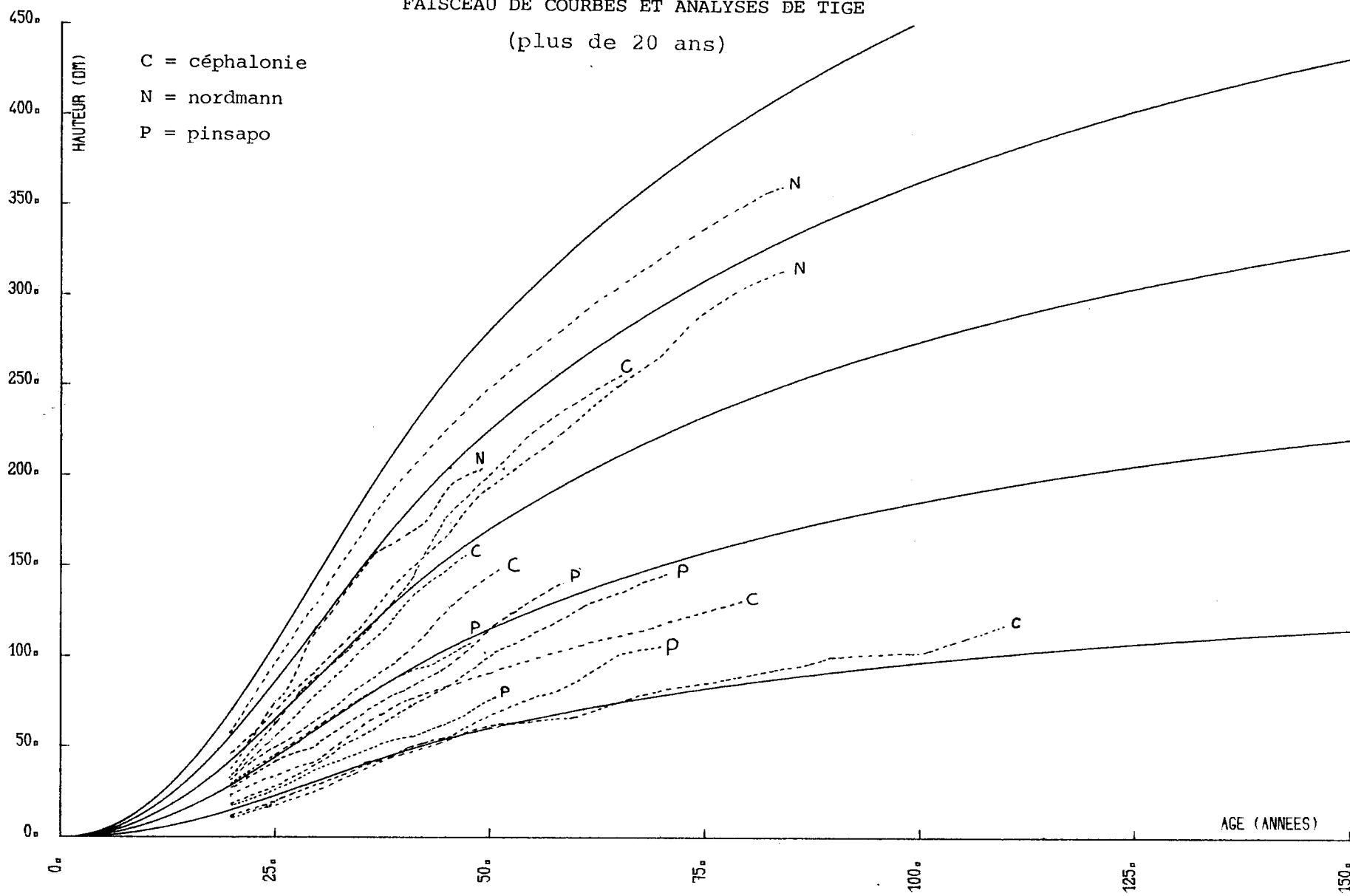


Figure n° 9

2.3. Conclusion

La méthode utilisée peut paraître un peu fantaisiste. Il faut bien voir que nous nous sommes heurté à un problème que nous n'avions absolument pas prévu et que nous avons dû résoudre en peu de temps. C'est pourquoi, en matière d'analyse de tige en particulier,

- nous n'avons pas utilisé la méthode classique (abattage),
- nous n'avons pas effectué plus d'analyses de tige "sur pied".

II. ETABLISSEMENT DU FAISCEAU DE COURBES

1. La méthode

Nous avons utilisé la méthode des courbes affines (Bruce et Schumacher in Ottorini et Nys, 1981). Deux courbes sont dites affines si le rapport des hauteurs à un âge donné est indépendant de l'âge (figure n° 5).

2. Résultats (cf. figures 7, 8 et 9)

A partir de la courbe moyenne, nous avons tracé 5 courbes se déduisant par affinité. Voici l'équation du faisceau :

$$y(t) = \left[1 - E\left(\sqrt{\frac{2t}{97}}\right) \right] \left[75 + 68,7(k-1) \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{40}\right)^{2,15}} \right) \right] + \left[E\left(\sqrt{\frac{2t}{97}}\right) \right] \left[176,5 + 161,7(k-1) e^{-29,37/t^{0,845}} \right]$$

Les 5 courbes de notre faisceau prennent les valeurs 1, 2, 3, 4, 5 de k.

3. Problèmes

Le faisceau de courbes devrait théoriquement recouvrir en totalité le nuage de points. Or, ce n'est pas le cas :

. En mauvaise fertilité, il s'agit :

- de peuplements de moins de 20 ans qui sont condamnés à plus ou moins brève échéance. Il était inutile de leur prévoir un avenir en leur traçant une courbe ;
- de 2 peuplements de Concolor. Le faisceau de courbes a été construit pour les sapins méditerranéens, les concolor ne sont là qu'à titre de comparaison.

. En excellente fertilité, plusieurs jeunes peuplements dépassent la meilleure courbe de croissance. N'ayant aucun boisement de plus de 50 ans atteignant ces ordres de grandeur, nous avons préféré les laisser en classe "exceptionnellement bonne", ne pouvant préjuger de leur avenir.

III. L'INDICE DE CROISSANCE

1. Choix d'un indice

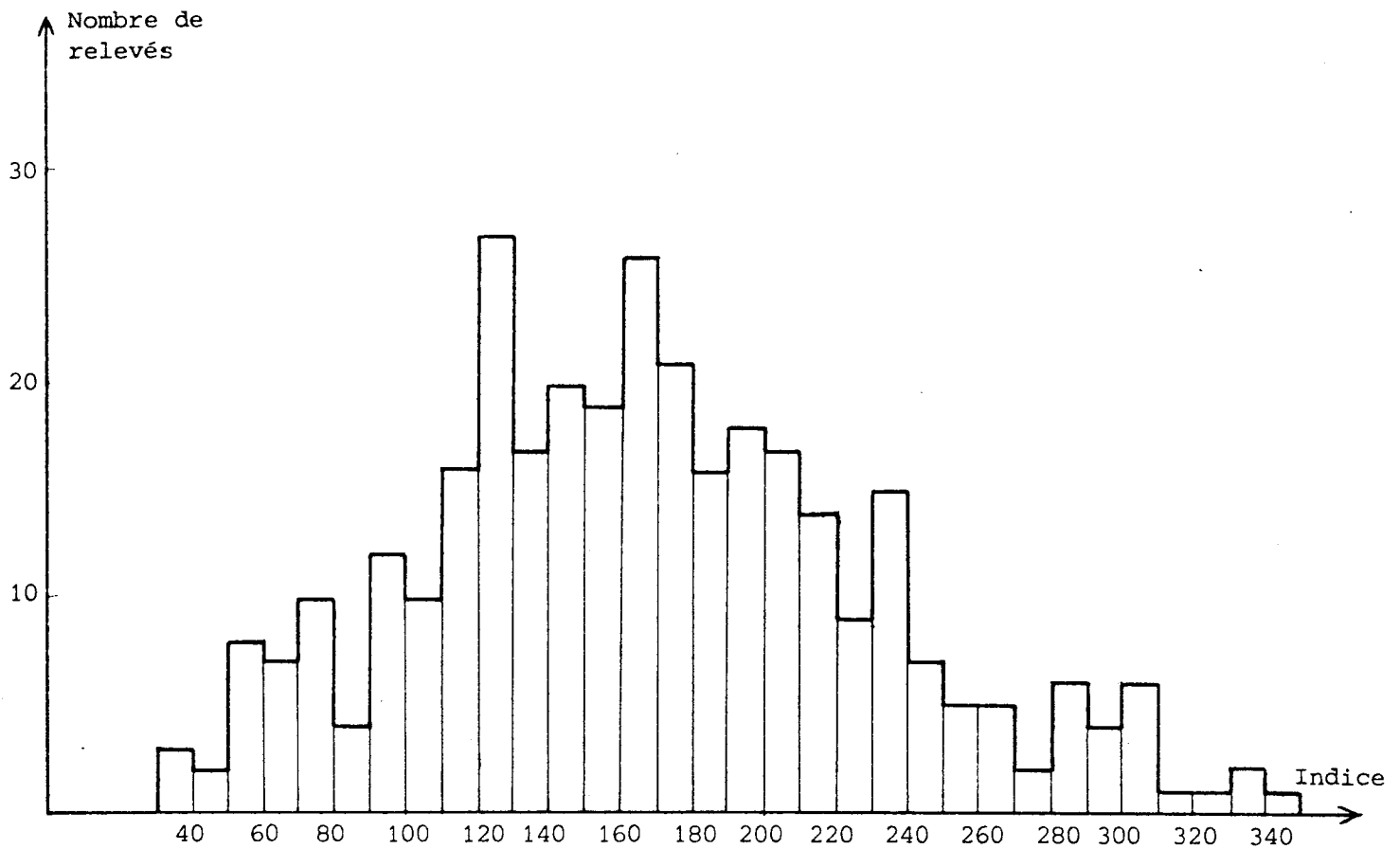
Nous utilisons la hauteur dominante à un âge de référence, en l'occurrence 50 ans, comme il est d'usage pour les peuplements résineux équiennes. Nous notons cet indice H50.

2. Calcul de H50

Chaque peuplement est représenté par un point du nuage par lequel nous pouvons faire passer une courbe affine de la courbe moyenne. L'indice de croissance de chaque peuplement nous est donné par la hauteur à 50 ans exprimée en décimètres de la courbe qui lui est associée. Cet indice représente la croissance du peuplement. Si l'on considère chaque espèce de sapins isolément, cet indice représente aussi la fertilité de la station sur laquelle pousse le peuplement en question. On peut donc utiliser cet indice H50 pour comparer entre elles les fertilités des stations possédant une même espèce de sapins.

3. Répartition des indices de croissance

Ayant travaillé en confondant les espèces, nous donnons un histogramme du même type. Une répartition des indices par espèce est donnée en annexe 5.



4. Moyennes d'indice par espèce

Pectiné :	198
Nordmann :	180
Céphalonie :	148
Pinsapo :	143
Hybride Nordmann X pectiné :	216
Hybride indéterminé :	210
Numidie :	141
Concolor :	120

CHAPITRE IV
ANALYSE DE LA CROISSANCE

Dans le présent chapitre, nous allons essayer d'expliquer la croissance des différents sapins méditerranéens par l'action des facteurs écologiques au moyen d'analyses de variance dans un premier temps, puis en faisant intervenir les relevés floristiques.

1. INFLUENCE DE CHAQUE VARIABLE ECOLOGIQUE CONSIDEREE ISOLEMENT

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

Chaque variable est tout d'abord subdivisée en classes. La moyenne des indices de croissance est calculée pour chaque classe de la variable considérée.

Il s'agit de savoir si les différences de moyennes interclasses sont dues au hasard de l'échantillonnage ou reflètent au contraire un effet réel de la variable étudiée sur la croissance. Pour cela, on utilise 2 tests statistiques :

- un test F de Fischer : il permet de tester l'influence globale de la variable sur la croissance. Si le seuil de significativité obtenu est inférieur à 5 %, nous dirons que la variable a une action significative sur la croissance, sinon, nous dirons qu'elle n'a aucune influence ;
- un test T de Student : il permet de comparer les moyennes des modalités prises 2 à 2 de la variable considérée. Si le seuil de significativité est inférieur à 5 %, nous dirons que les 2 moyennes sont significativement différentes, donc que les 2 modalités agissent de façon différente sur la croissance.

Tous ces tests reposent sur 2 hypothèses :

- Les fertilités suivent une loi de répartition normale.
- Les variances de chaque modalité sont égales. Ces conditions

idéales ne sont jamais parfaitement remplies, mais les tests restent quand même valables lorsque ces hypothèses ne sont que "grossièrement" vérifiées.

Dans ce chapitre, nous allons étudier séparément chaque espèce de sapins méditerranéens. Les tests d'analyse de variance seront effectués sur les espèces suivantes :

- Pectiné (41 placettes)
- Nordmann (109 placettes)
- Céphalonie (69 placettes)
- Pinsapo (64 placettes).

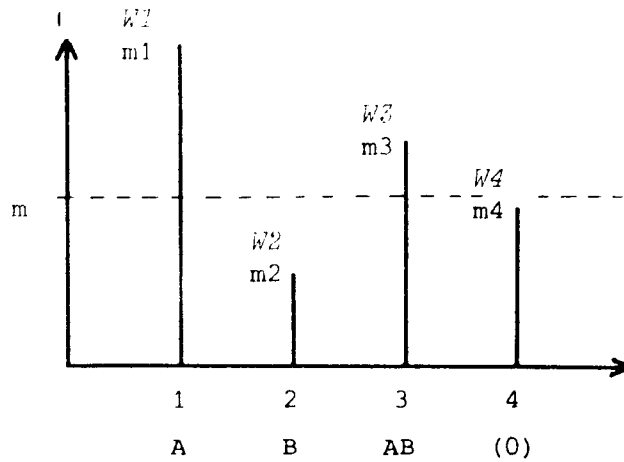
(Signalons que le pectiné est un peu marginal dans cette partie vu son faible effectif. Il est là surtout à titre de comparaison).

Pour chaque facteur ayant une influence globale significative pour plusieurs espèces, nous donnons les résultats sous forme d'un tableau par espèce. Il comprend :

- (W_i) le nombre de placettes où ladite modalité a été relevée ;
- m_i la moyenne des indices de croissance pour la modalité considérée.

Sous chaque modalité, on trouvera une ou plusieurs lettres majuscules. Deux modalités ayant une lettre en commun ont des moyennes non significativement différentes au seuil de 5 %. Si l'effectif d'une modalité est trop faible (≤ 5) pour réaliser un test significatif, nous notons (0). Sur chaque graphe, la moyenne d'indice est matérialisée par des pointillés. Pour éviter de les noter sur chaque schéma, rappelons les :

- Pectiné : 198 dm
- Nordmann : 180 dm
- Céphalonie : 148 dm
- Pinsapo : 143 dm.



Sur cet exemple, les modalités 1 et 2 ont des moyennes m_1 et m_2 significativement différentes. La modalité 4 a un effectif trop faible pour effectuer un test. La modalité 3 a une moyenne qui ne diffère significativement d'aucune des 2 autres moyennes.

Les 4 tableaux spécifiques sont placés les uns sous les autres pour faciliter les comparaisons.

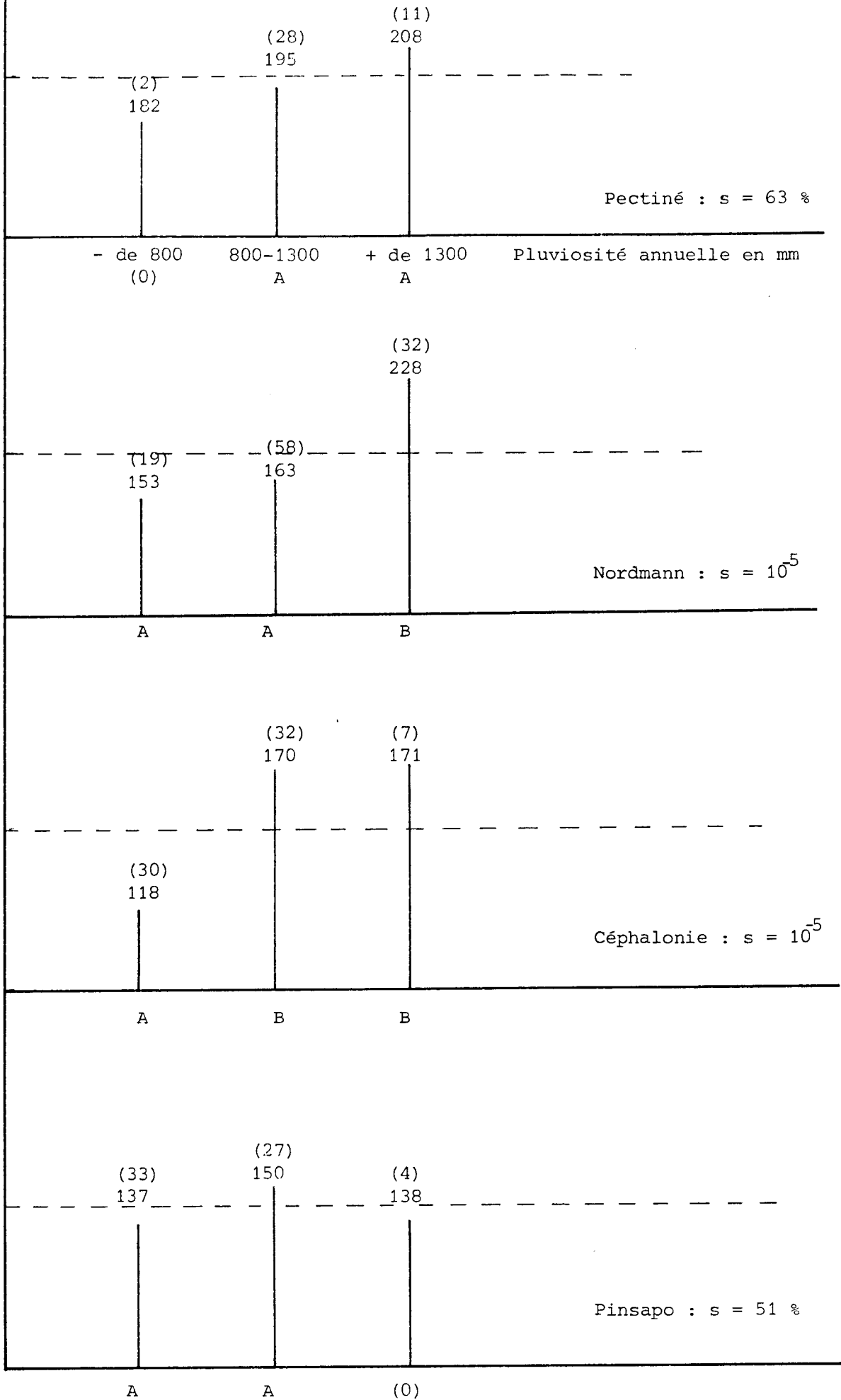
2. Influence des variables climatiques

La plupart des données météorologiques proviennent de stations localisées dans les vallées. Or, la majorité de nos relevés ont été effectués sur les versants donc beaucoup plus haut en altitude. Les températures y sont certainement plus basses et les pluviosités plus importantes. Cet effet s'avère surtout prépondérant pour le sapin pectiné : 56 % des relevés ont été réalisés au-dessus de 900 m (25 % pour le Nordmann, 6 % pour le Céphalonie et le Pinsapo).

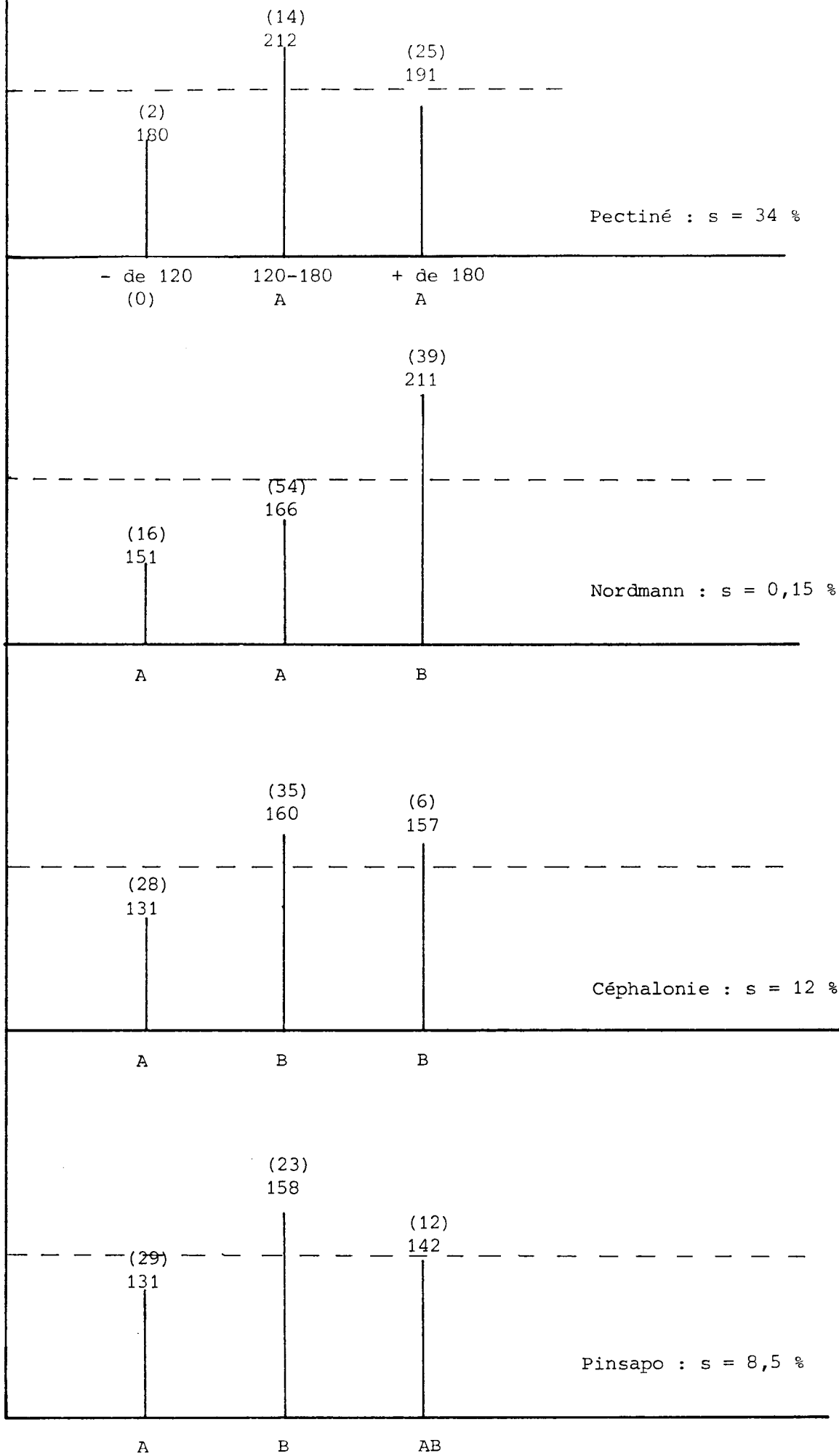
2.1. Pluviométrie annuelle

Ce facteur est bien ressorti pour 2 espèces. Les sapins demandent de l'eau : la modalité < 800 mm est toujours la plus mauvaise. D'autre part, on peut remarquer :

PLUVIOSITE ANNUELLE



PLUIE D'LTE



- que le Nordmann trouve ses meilleures conditions de croissance pour des pluviosités supérieures à 1300 mm ;
- que l'optimum de pluviosité se situe au-dessus de 800 mm pour le Céphalonie et il semble qu'une pluviosité supérieure à 1300 mm n'apporte aucun bienfait supplémentaire sur la croissance (ce dernier résultat est à manier avec prudence, la modalité >1300 mm ne comporte que 7 relevés) ;
- que l'influence de la pluviosité annuelle sur le pinsapo s'est peu faite sentir (< 800 mm est plus mauvais mais ce n'est pas significatif).

2.2. Pluie d'été

La pluie du trimestre d'été (juin, juillet, août) n'a pas une influence globale très déterminante mais va dans le même sens que les résultats précédents (la modalité <120 mm est la plus mauvaise pour les 4 espèces, le Nordmann demande plus de 180 mm...).

2.3. Température moyenne des maxima du mois le plus chaud

Ce facteur est ressorti pour 3 espèces, isolant la modalité $< 26^{\circ}\text{C}$ comme significativement la meilleure. Ce n'est pas le cas du Céphalonie, cela semble confirmer que c'est le plus "méditerranéen".

2.4. Données de synthèse

2.4.1. Quotient pluviothermique d'Emberger :

Il s'agit de celui modifié par Sauvage :

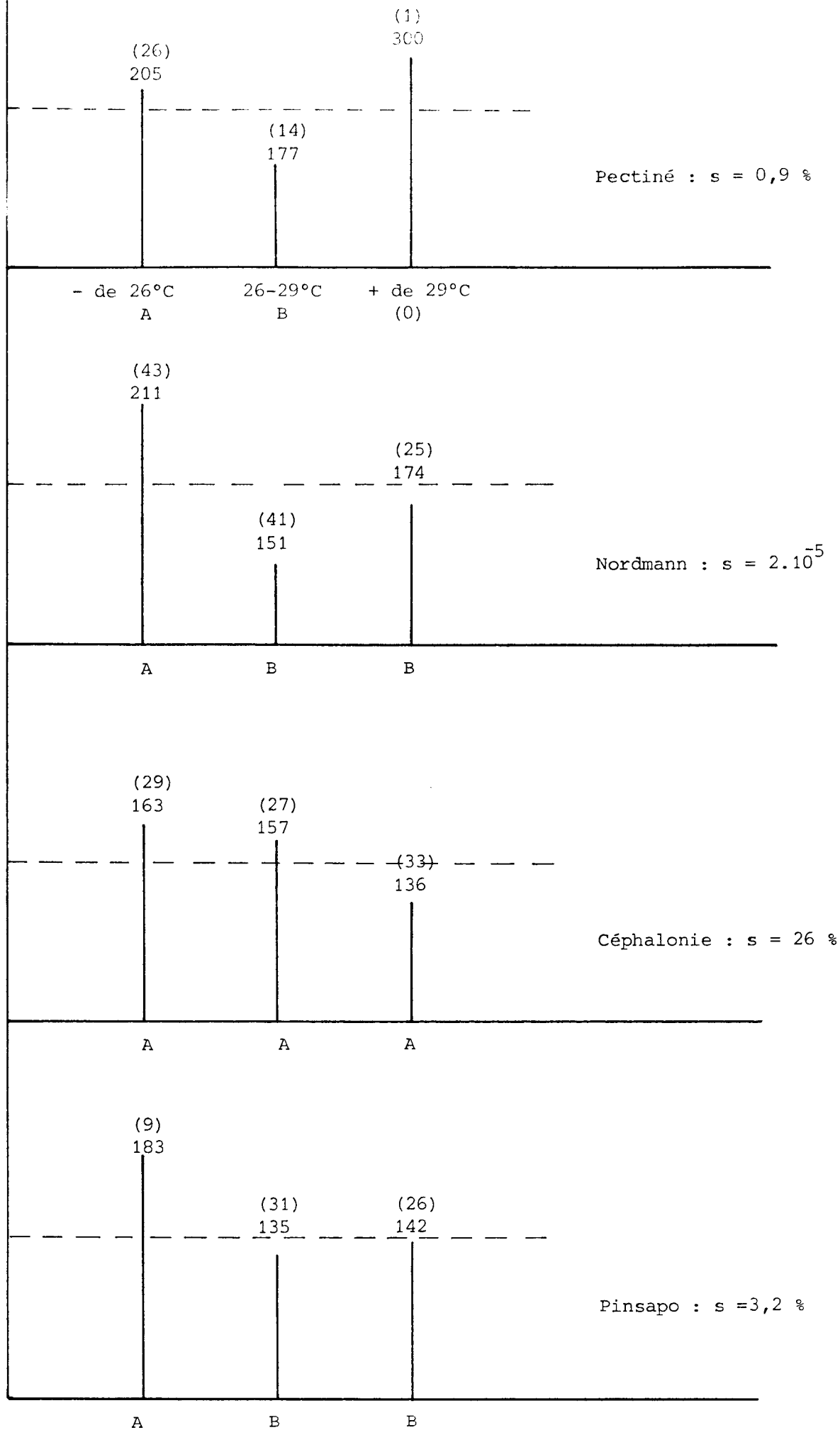
$$Q = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

P = pluie annuelle en mm
 M = T° moyenne des maxima du mois le +chaud
 m = T° " minima " froid

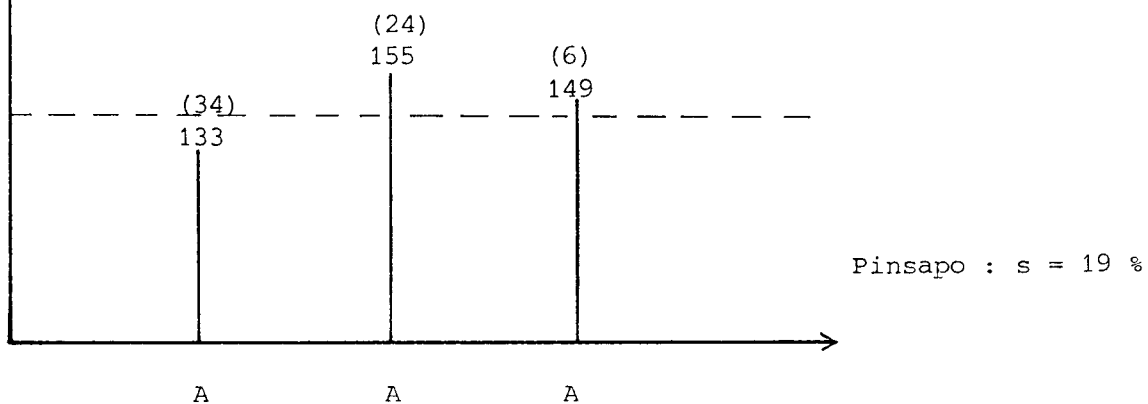
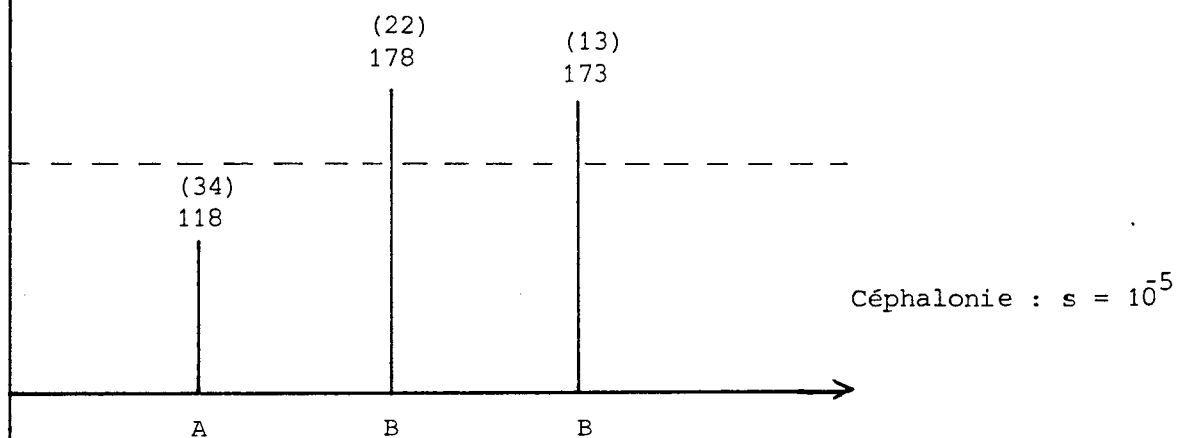
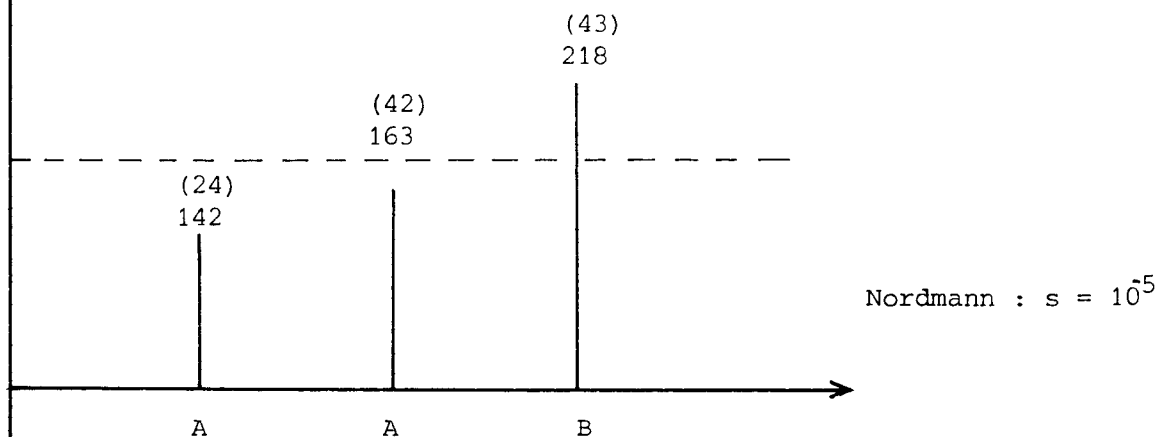
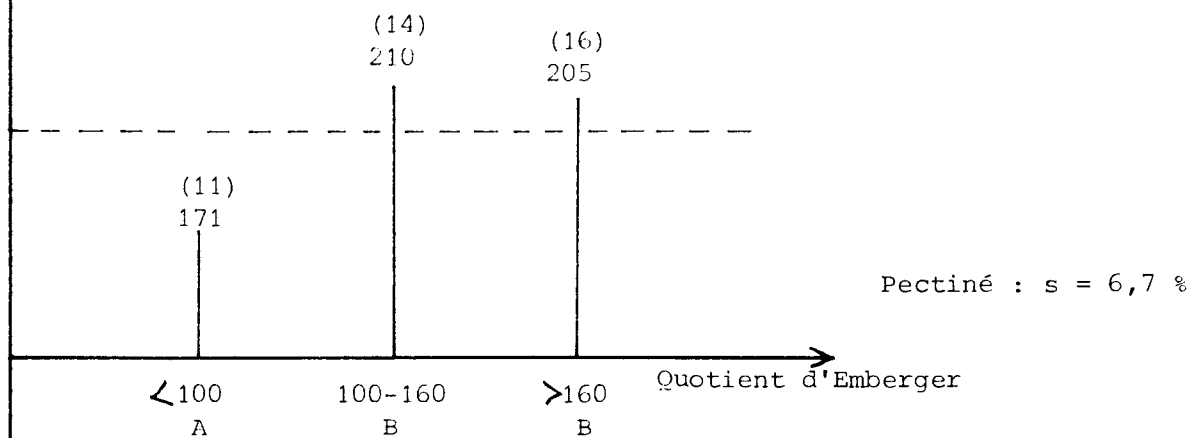
M et m sont exprimées en Kelvins.

Nous l'avons subdivisé en 3 classes, cela correspond approximativement aux étages bioclimatiques du climagramme d'Emberger (pour $m = 0^{\circ}\text{C}$) :

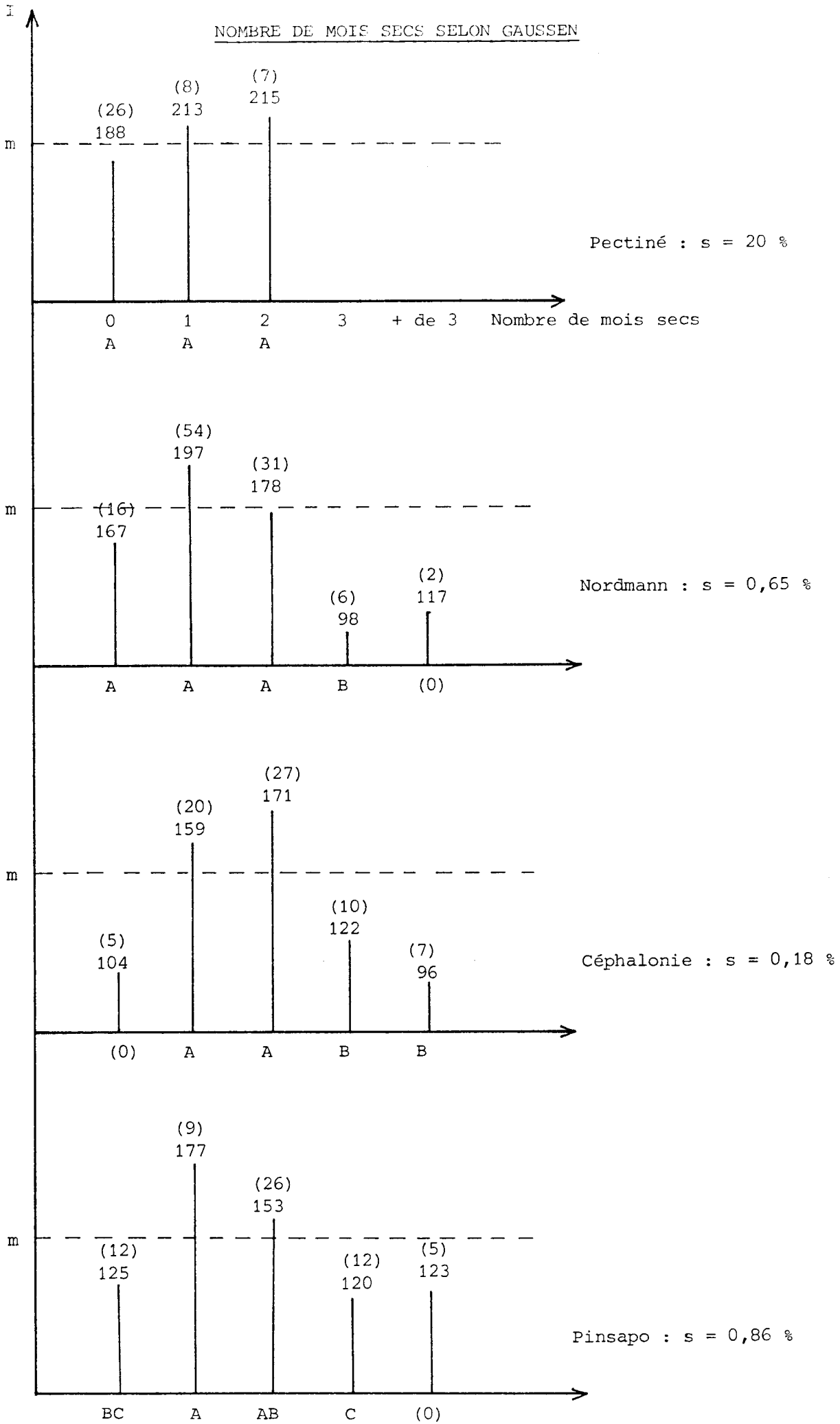
TEMPERATURE MOYENNE DES MAXIMA DU MOIS LE PLUS CHAUD



QUOTIENT POLYLOTHÉRMIQUE I'EMBERGER



NOMBRE DE MOIS SECS SELON GAUSSEN



- < 100 : subhumide
- 100-160 : humide
- > 160 : perhumide (européen)

2.4.2. Nombre de mois secs selon Gaussen

Mois sec si $P < 2t$:

P : pluviosité en mm du mois considéré

t : température moyenne en °C de ce mois.

2.5. Résultats

A partir des données précédentes et des données de synthèse climatique, nous pouvons tenter d'établir une comparaison entre les espèces :

- Le sapin pectiné :

Le facteur climat est assez peu ressorti. Cela provient du fait que nous avons mesuré une majorité de peuplements naturels, donc en harmonie avec le climat, et que le sapin pectiné a été rarement introduit hors de zones climatiques favorables. Bien que préférant le bioclimat humide, nous remarquons qu'on trouve souvent le sapin pectiné en climat subhumide. Il faut préciser qu'il s'agit toujours de subhumide froid ($m < 0$) (3 placettes) ou très froid ($m < -3$) (8 placettes). Il demande aussi une certaine fraîcheur estivale ($M < 26^{\circ}\text{C}$). Cela montre que les races méridionales de sapin pectiné ont un rôle à jouer en climat méditerranéen montagnard.

- Le sapin de Nordmann :

Il a réagi à tous les facteurs climatiques précédents à des seuils < 1 %. Il semble très exigeant en pluie (plus de 1300 mm/an et plus de 180 mm l'été) pour croître dans de bonnes conditions. L'étude des bioclimats appuie ce résultat : le bioclimat "perhumide" se révèle significativement le plus favorable. D'autre part, il semble préférer un mois sec. Cela montre qu'il possède tout de même un léger tempérament d'essence méditerranéenne. Néanmoins, il vaudrait peut-être mieux l'appeler sapin "subméditerranéen". Il craint la

forte sècheresse ; au-dessus de 2 mois biologiquement secs il a beaucoup de peine à croître, voire survivre.

- Le sapin de Céphalonie :

Il se montre beaucoup plus méditerranéen que le précédent :

- il est tout à fait à son aise en bioclimat humide, contrairement au Nordmann ;
- il est indifférent à M (moyenne des maxima) alors que tous les autres sapins demandent une certaine fraîcheur estivale ;
- c'est avec la modalité "2 mois secs" qu'il pousse le mieux ;
- il semble moins bien croître en l'absence de mois secs (5 relevés seulement). Si c'est vrai, la raison réelle est plutôt sa sensibilité au gel, les placettes sans mois sec étant généralement les plus froides.

- Le sapin d'Espagne :

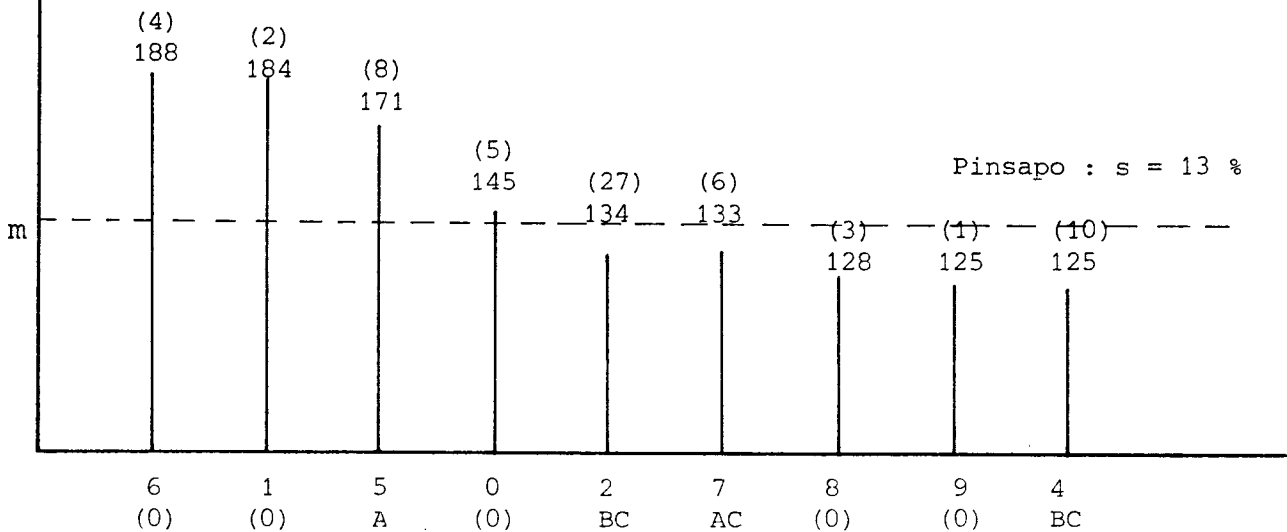
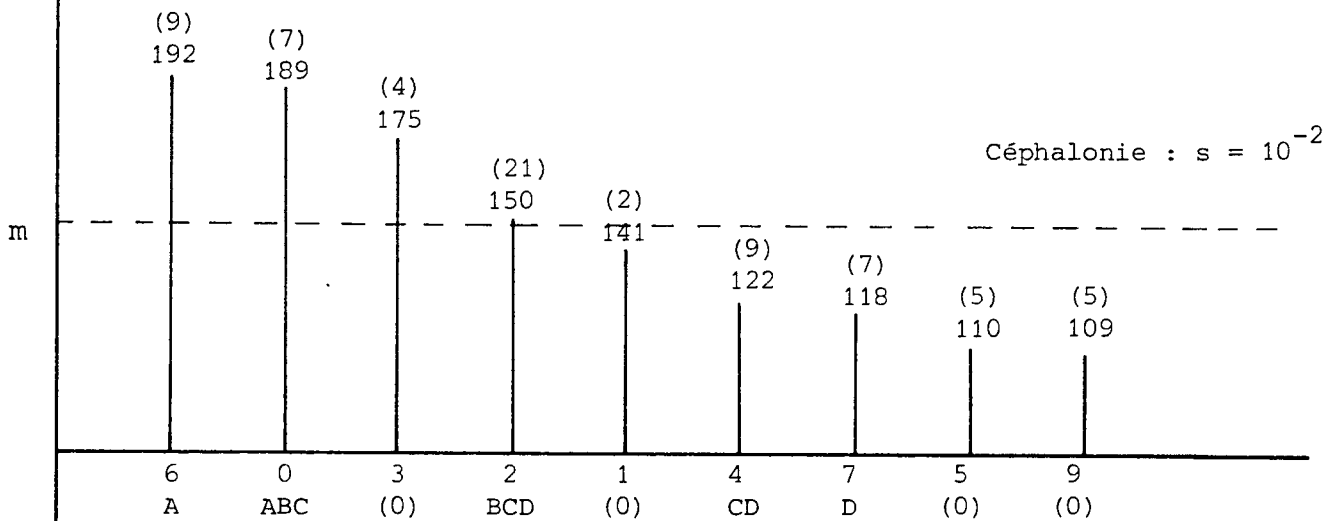
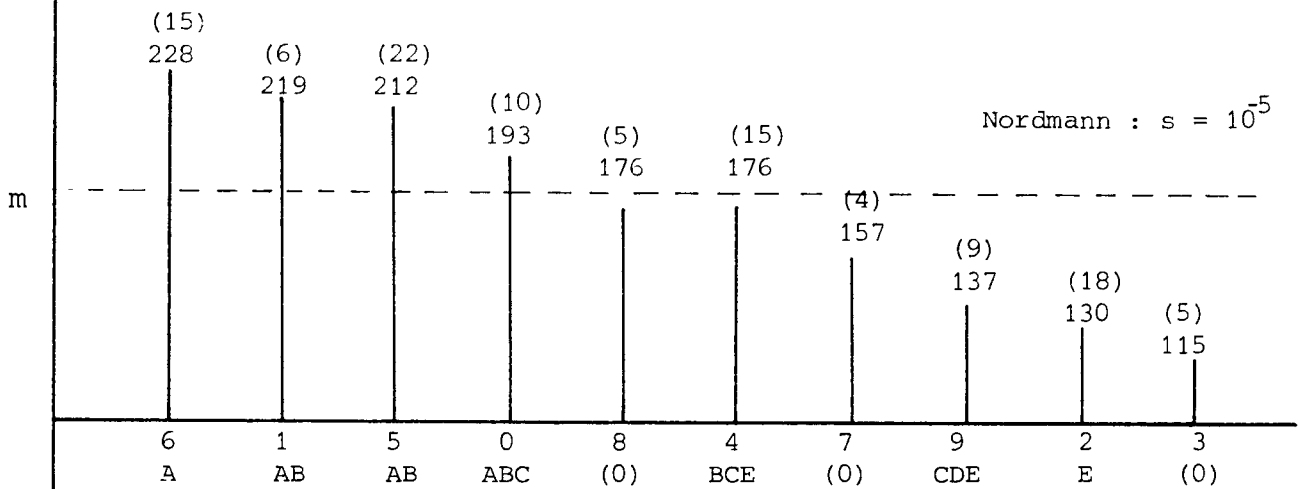
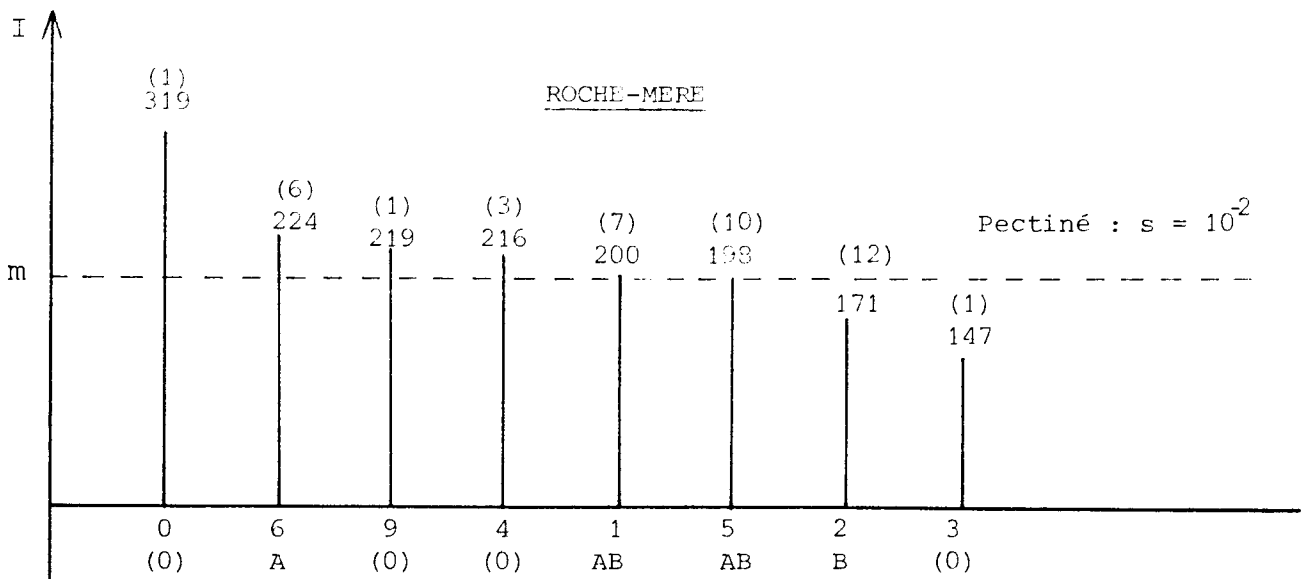
Il n'a pas réagi à tous les facteurs climatiques, les résultats sont plus difficilement interprétables. Il confirme lui aussi son tempérament d'essence méditerranéenne :

- il préfère 1 à 2 mois secs comme le Nordmann, mais là les chiffres ne sont pas faussés par l'altitude ;
- il craint l'absence de mois sec , certainement pour les mêmes raisons que le Céphalonie. Notons que dans les Alpes ainsi qu'en fond de vallon nous avons trouvé des traces de gélivures alors que ce n'était pas le cas du Céphalonie ;
- il semble préférer le bioclimat humide et une pluviosité supérieure à 800 mm mais ces résultats ne sont pas significatifs au seuil de 5 %.

2.6. Conclusions

Les sapins ont en général réagi aux mêmes facteurs climatiques. En effet, les facteurs qui se sont révélés sans influence (moyenne des minima, température moyenne annuelle) l'ont été pour les 4 espèces. On peut insister sur deux points communs à tous les sapins :

- ils demandent une importante pluviométrie : + de 800 mm d'après les données météorologiques ;
- ils supportent mal plus de 2 mois biologiquement secs.



3. Influence des facteurs édaphiques

3.1. La roche-mère

Voici les codes utilisés :

- 1 granite
- 2 calcaire dur ou en plaquettes
- 3 calcaire dolomitique
- 4 marne , calcaire marneux et alternance marno-calcaire
- 5 schiste et formation grésoschisteuse
- 6 micaschiste et gneiss
- 7 alluvions
- 8 dépôt glaciaire
- 9 poudingue et conglomérat calcaire
- 0 autres (grès, argile, basalte , conglomérat siliceux, marbre)

Les roches trop peu représentées ont été regroupées avec d'autres aux caractères proches à condition que les moyennes d'indice soient du même ordre de grandeur.

Le facteur roche-mère s'est révélé significatif sauf pour le pinsapo ($s = 13 \%$).

Les roches-mères siliceuses présentent les meilleures fertilités pour toutes les espèces.

Le micaschiste semble le meilleur pour les 4 espèces.

Pour le Céphalonie, on remarque une forte différence d'indice entre micaschiste et schiste. Cela provient d'un défaut de l'échantillonnage : les schistes ont été trouvés dans le Minervoï, très sec, alors que les micaschistes viennent en majorité des Maures où les conditions sont meilleures.

On peut noter aussi la bonne fertilité de la catégorie "autre roche-mère" : signalons qu'il s'agit surtout de roches siliceuses. On trouve ensuite les calcaires (calcaires marneux et marnes, puis calcaires durs ou en plaquettes) puis les sols alluviaux (hautes terrasses).

Malgré leur faible effectif, poudingue et conglomérat calcaire semblent parmi les plus mauvais. Le calcaire dolo-

REACTION HCl

(30)
209

(2)
170

(3)
153

(6)
171

Pectiné : s = 4 %

0
A

1
(0)

2
(0)

3
B

Codes de réaction

(62)
206

(12)
112

(15)
176

(20)
144

Nordmann : s = 10⁻⁵

A

B

AC

C

(25)
166

(14)
154

(4)
153

(26)
126

Céphalonie : s = 10 %

A

AB

(0)

B

(19)
168

(6)
112

(5)
132

(34)
135

Pinsapo : s = 1,3 %

A

B

(0)

E

mitique et les dépôts glaciaires sont trop peu répandus pour être bien jugés.

Il se dessine une grande variation d'indice entre roche-mère siliceuse et calcaire. Cela ne confirme pas le fait qu'on dise les sapins indifférents à la roche-mère. Nous attribuons cela aux propriétés qui découlent de la roche-mère. En région méditerranéenne, les substrats calcaires ont tendance à donner des sols plus superficiels et plus caillouteux que les roches mères acides, qui s'altèrent mieux. Nous avons calculé la moyenne des profondeurs dans chaque cas :

- roche mère calcaire : 40 cm
- roche-mère acide : 55 cm.

Notons aussi que l'on trouve plus de roches calcaires que de roches acides en conditions très sèches.

3.2. Réaction à l'acide chlorhydrique

Elle confirme le résultat précédent, à savoir que tous les sapins préfèrent les réactions nulles. Les réactions "nulle" et "très forte" sont toujours significativement différentes.

Les sapins trouvent leurs conditions de croissance optimale sur sol décalcarifié, cela ne signifie pas pour autant qu'ils ne poussent pas sur les sols calcaires.

3.3. La texture

Le facteur est assez bien ressorti pour 3 espèces. Il met en évidence la meilleure fertilité des limons par rapport aux argiles. La différence est significative 3 fois sur 4. En ce qui concerne les textures équilibrée et sableuse, elles se classent au milieu. Leur ordre varie suivant les espèces ne nous autorisant pas à un classement. Cela nous amène à la conclusion suivante : les sapins craignent les sols compacts (argileux). Mais un biais est commis du fait que les textures argileuses proviennent généralement des roches mères calcaires. (Un tableau texture en fonction de

TEXTURE

(17)
223

(13)

(8)
177

(4)
164

189

Pectiné : s = 2 %

Argile A Equilibrée (0) sable A limon B

(37)
103

(26)
156

(26)
184

(20)
163

Nordmann : s = 3,4 %

A AB AB B

(15)
177

(22)
141

(19)
131

(13)
150

Céphalonie : s = 11 %

AB A B AB

(10)
167

(13)
161

(22)
124

(19)
139

Pinsapo : s = 2,3 %

A A B B

la roche-mère est donné en annexe).

Il s'agit de savoir si les sapins craignent réellement le calcaire ou la compacité du sol, les 2 étant souvent liés. Pour cela, nous avons dressé le tableau suivant, où nous avons distingué pour chaque type de texture la présence ou non de réaction HCl.

Code de réaction 0 (absence de réaction)	Codes de réaction 1, 2, 3 (présence de réaction)
Argile : n=24, I=165	n=71, I=138
Équilibrée : n=23, I=197	n=54, I=135
Sable : n=55, I=184	n=15, I=130
Limon : n=62, I=215	n=27, I=154

Pour calculer les moyennes d'indice, nous avons confondu toutes les espèces. Ce procédé est critiquable, ne sachant pas si toutes les espèces réagissent de la même façon, mais il permet d'avoir un aperçu global du problème.

Ce tableau montre que les sapins semblent globalement préférer l'absence de calcaire actif dans le sol. Mais un biais s'introduit : en effet, la plupart des terrains calcaires se trouvent dans les régions les plus sèches ; ce qui nous amène donc à nuancer quelque peu nos conclusions.

Le cas de la texture est plus complexe. Les sapins semblent craindre l'argile en terrain acide, beaucoup plus qu'en terrain calcaire où la texture paraît avoir moins d'influence.

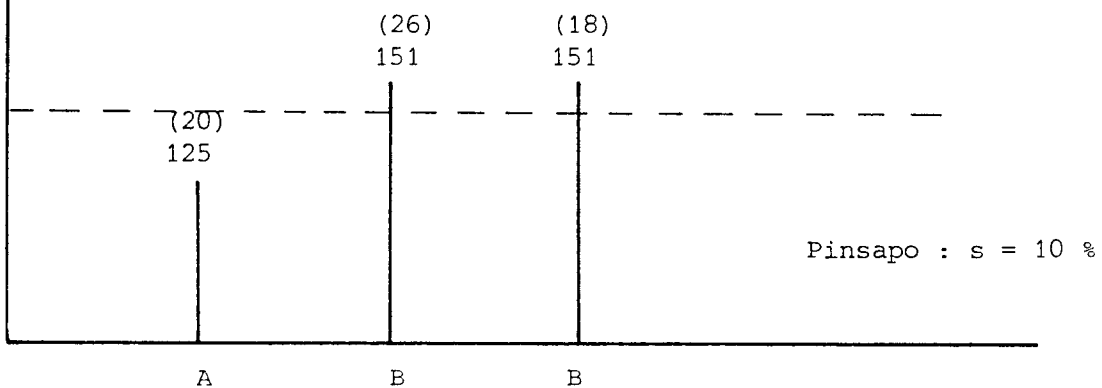
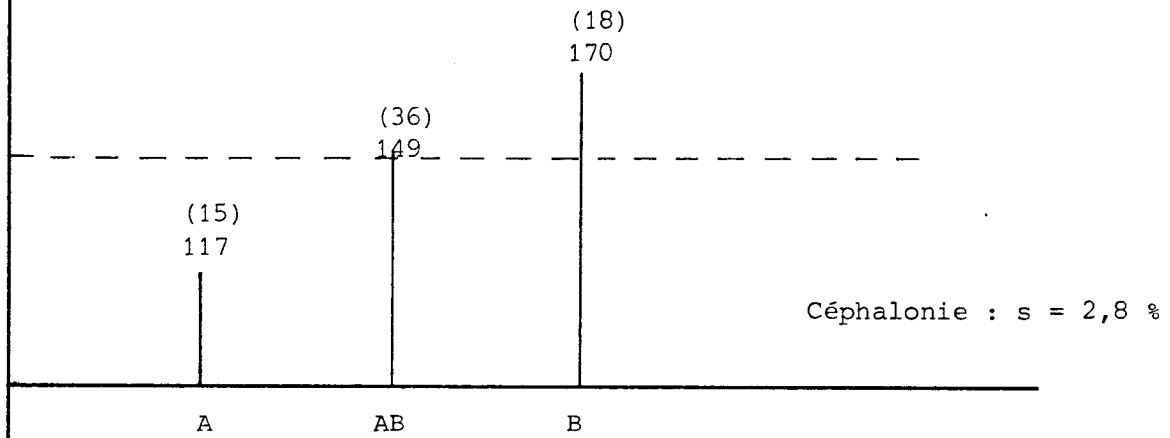
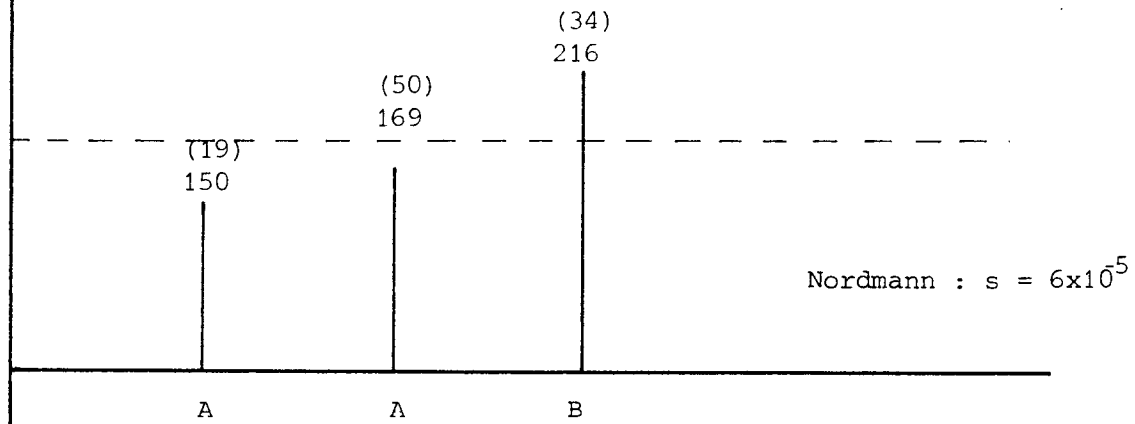
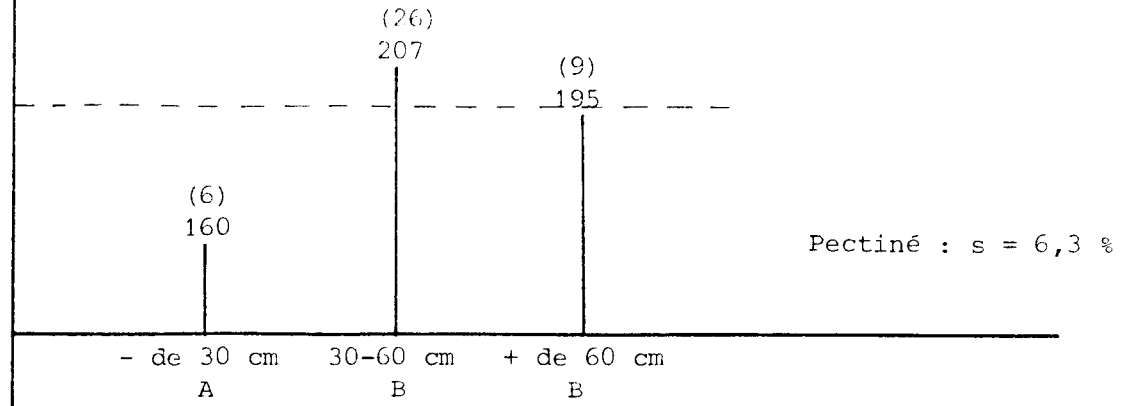
3.4. Profondeur du sol

Plus le sol est profond, meilleure est la croissance. On isole la modalité "< 30 cm" comme étant nettement la plus mauvaise.

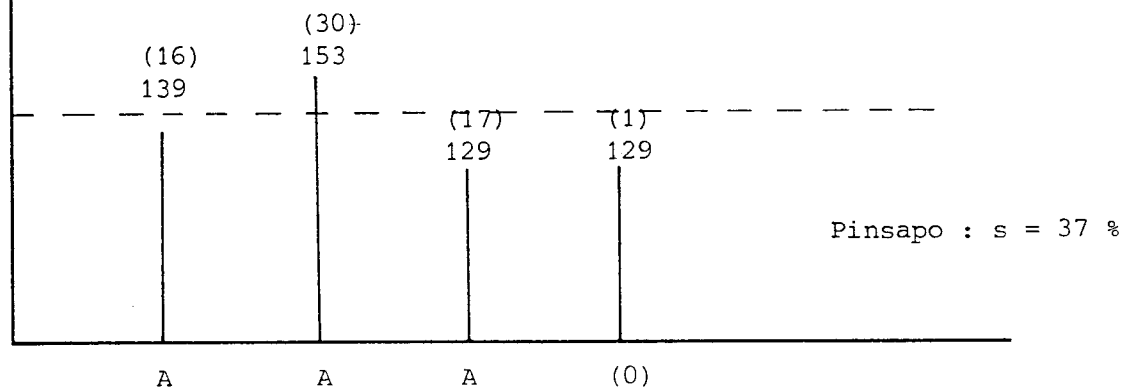
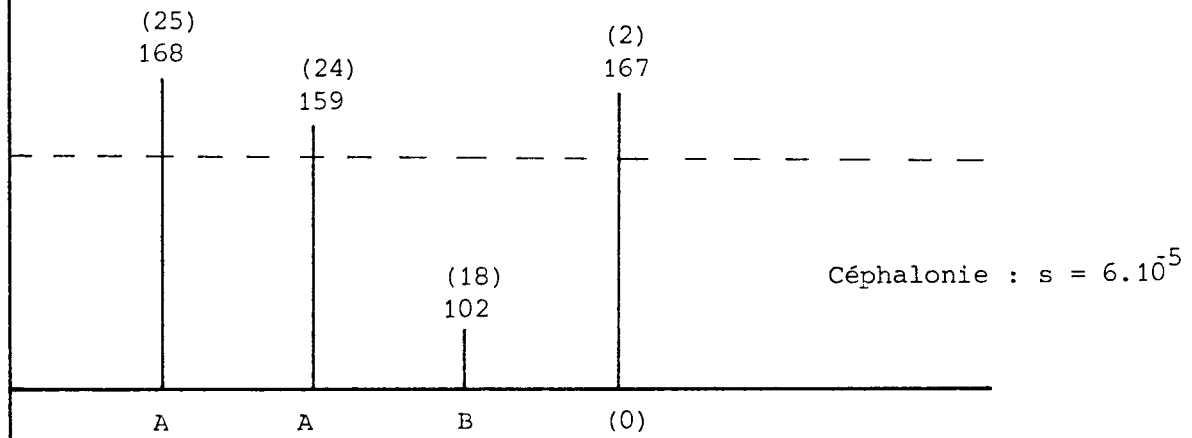
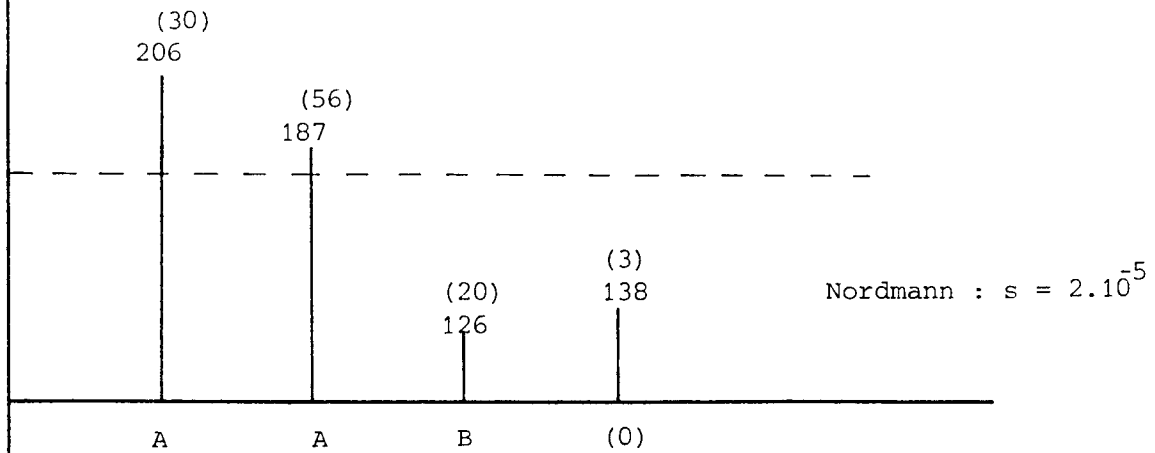
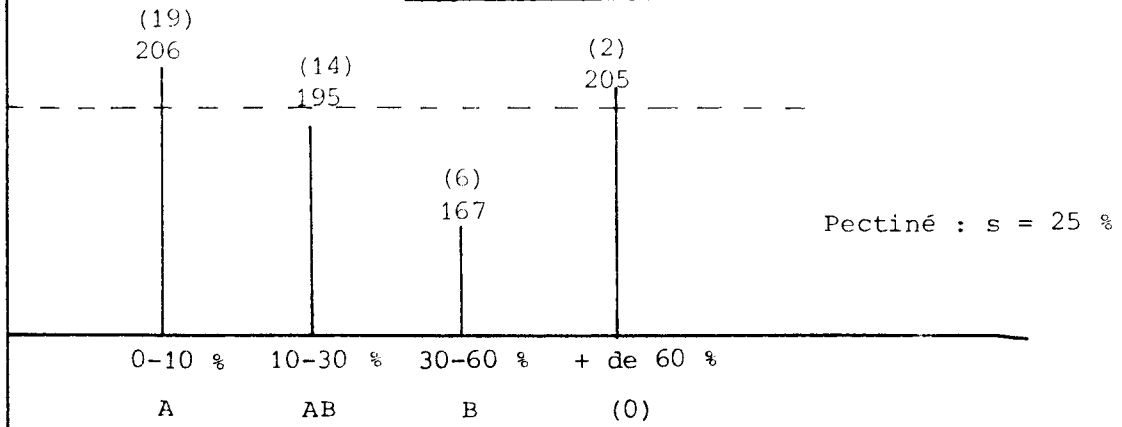
3.5. % de cailloux dans le sol - % de cailloux en affleurement

Ces 2 facteurs ont montré une action significative pour 2 espèces seulement. Néanmoins, une influence globale

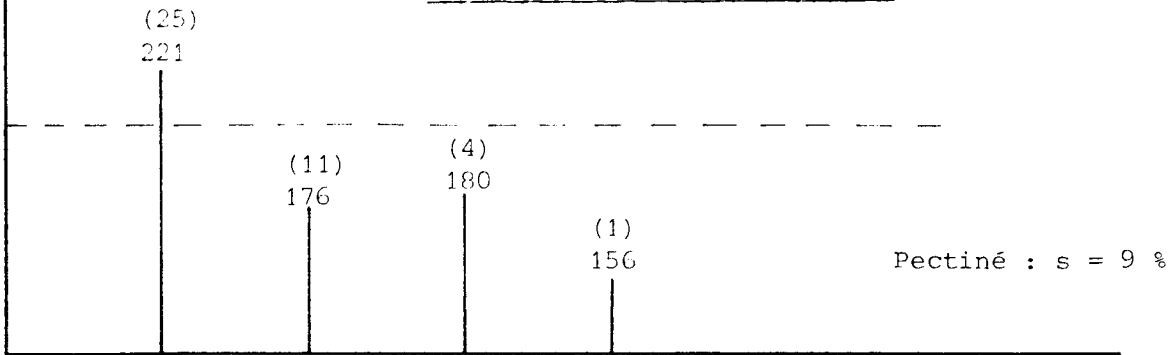
PROFONDEUR MOYENNE DU SOL



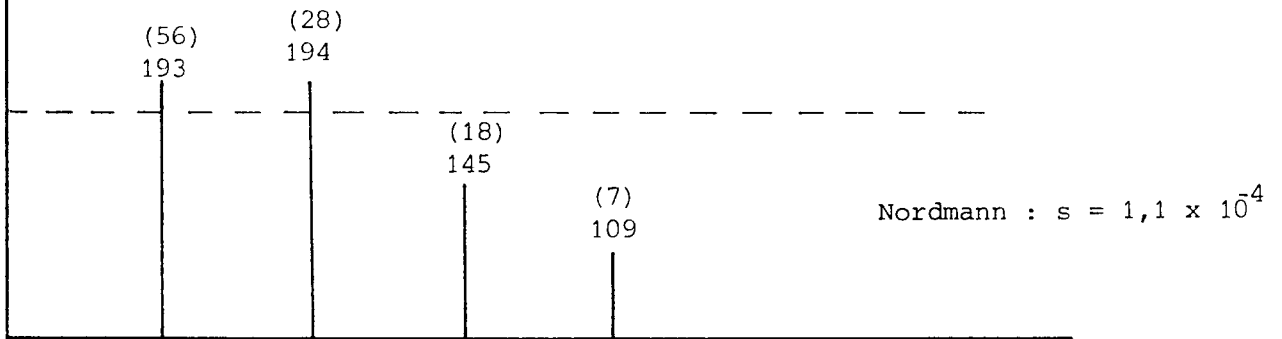
‰ DE CAILLOUX DANS LE SOL



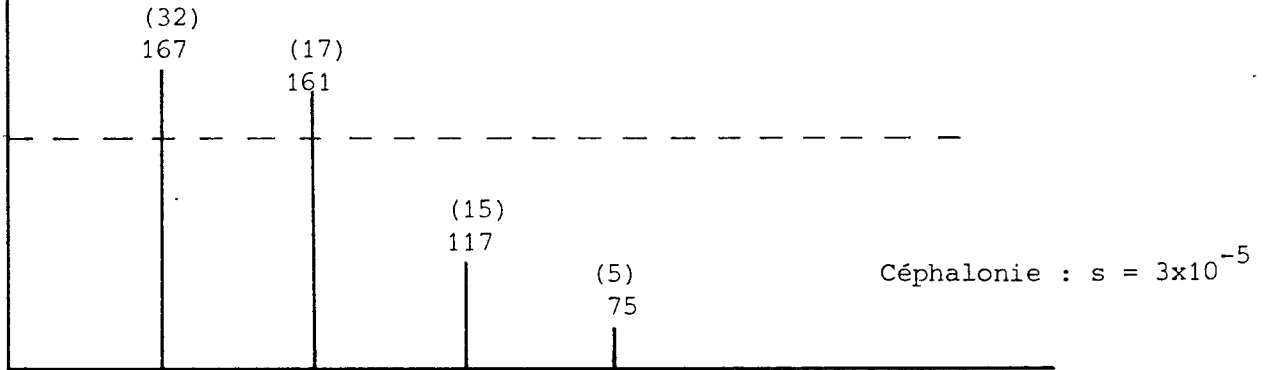
‰ DE CAILLOUX EN AFFLEUREMENT



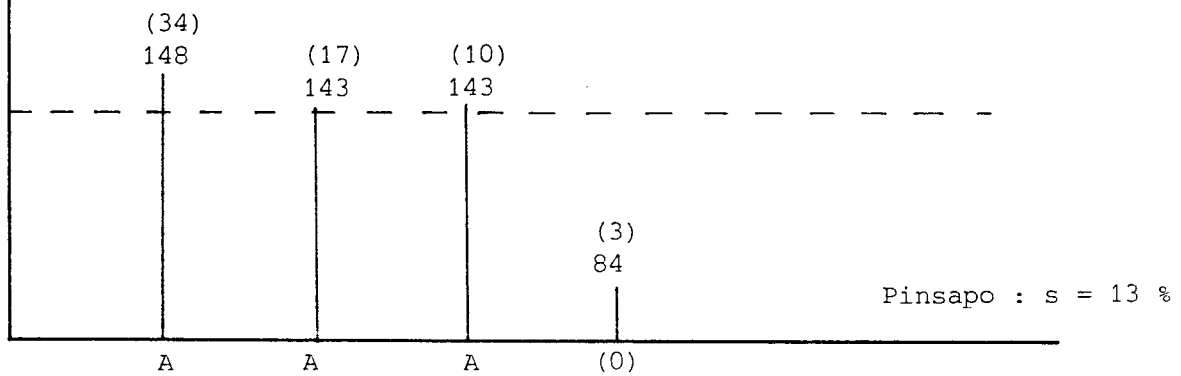
0-10 % 10-30 % 30-60 % + de 60 %
 A B (0) (0)



A A B B



A A B (0)



A A A (0)

se dégage : plus le pourcentage de cailloux est fort, moins bonne est la croissance ; il existe un seuil ($> 30 \%$) à partir duquel la croissance devient nettement plus mauvaise.

3.6. Conclusion

Malgré le biais introduit par une mauvaise répartition des roches-mères en fonction du climat, les sapins semblent préférer les roches-mères acides, certainement à cause des meilleures propriétés physiques du sol qu'elles engendrent (sols plus profonds, moins caillouteux, sols moins compacts) et peut-être aussi en raison de l'absence de calcaire actif dans le sol. Ce dernier résultat demande confirmation, et ne signifie absolument pas que les sapins ne poussent pas sur calcaire. Tout au plus leur croissance est-elle un peu inférieure sur ces terrains.

Comme beaucoup d'autres espèces, ils préfèrent aussi les sols profonds, peu caillouteux, qui assurent une meilleure économie de l'eau et une nutrition plus favorable.

4. Influence des variables stationnelles

4.1. La topographie

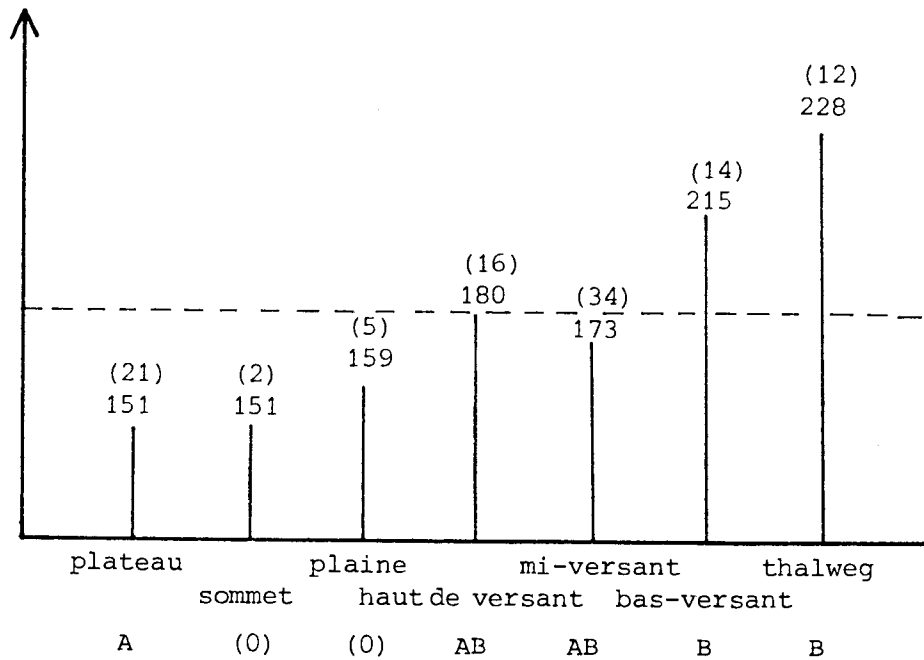
Son effet est apparu significatif pour le Nordmann seulement ($s = 0,42 \%$). Nous attribuons cela au fait que les autres espèces ont un effectif trop faible.

On peut isoler trois types de positions topographiques avec des fertilités décroissantes :

- les positions basses (thalweg et bas-versant)
- les positions de versant (mi-versant et haut de versant)
- les positions plates (plateau).

Les modalités "plaine" et "sommet" sont trop peu représentées pour être classées.

En étudiant les effets de la topographie pour les autres espèces, on s'aperçoit qu'ils vont dans le même sens, à savoir la fertilité supérieure des fonds de vallon et thalwegs par rapport aux autres positions.



4.2. Autres variables stationnelles

- L'altitude : fait surprenant, elle n'est ressortie pour aucune des 4 espèces.

- La pente, l'exposition semblent aussi influencer sur la croissance, mais ces deux facteurs sont masqués par d'autres plus importants et de ce fait ne sont pas ressortis.

5. Conclusion

Les facteurs climatiques sont finalement apparus comme primordiaux pour expliquer la croissance. Ils permettent d'autre part de discriminer assez bien les espèces. Les facteurs édaphiques sont ressortis mais moins nettement. Les espèces paraissent répondre de la même façon, mais notre échantillonnage était trop faible pour se faire une idée plus précise, en particulier savoir s'il n'existe pas de facteur édaphique comme la texture ou la roche-mère qui permette de discriminer plus finement les espèces entre elles.

II. UTILISATION DES DONNEES FLORISTIQUES

1. L'information mutuelle

1.1. Principe

Cette technique, dont les fondements reposent sur l'analyse fréquentielle de la répartition des espèces, permet d'évaluer l'information fournie par une plante relativement à un facteur écologique, en l'occurrence la fertilité.

Pour chaque plante, on calcule un coefficient (IM), appelé information mutuelle (pour la procédure de calcul, se reporter à l'annexe 13).

La valeur de ce coefficient est d'autant plus grande que l'espèce apporte plus d'information sur les différents états de la variable étudiée. Cette procédure s'applique pour chaque espèce prise en tant qu'individualité ; elle ne s'appuie à aucun moment sur une quelconque notion de groupes de plantes.

Nous avons subdivisé chacune de nos quatre espèces de sapin en trois classes d'indices :

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Pectiné	+ de 220	175-220	- de 175
Nordmann	+ de 260	115-260	- de 115
Céphalonie	+ de 215	100-215	- de 100
Pinsapo	+ de 190	100-190	- de 100

Les bornes des classes ne sont pas les mêmes étant données les différences de croissance observées entre les espèces.

Les plantes présentant une forte information mutuelle vis-à-vis des classes 1 et 3 seront respectivement quali-

fiées de plantes de "mauvaise croissance" ou de "bonne croissance".

1.2. Résultats

PLANTES INDICATRICES DE BONNE CROISSANCE

Espèces	Infor- mation mutuelle	Fré- quence absolue	Fréquence corrigée		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3
PECTINE					
<i>Pteridium aquilinum</i>	0,190	9	2,28	1,07	0
<i>Corylus avellana</i>	0,177	12	2,39	0,60	0,49
<i>Rubus sp.</i>	0,067	15	1,64	0,96	0,59
<i>Teucrium scorodonia</i>	0,050	9	1,82	0,54	0,98
<i>Crataegus monogyna</i>	0,050	6	2,05	0,40	0,98
<i>Calluna vulgaris</i>	0,022	10	1,23	1,20	0,59
<i>Sarothamnus scoparius</i>	0,020	13	1,26	1,11	0,68
<i>Hedera helix</i>	0,017	13	1,26	0,74	1,13
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,014	8	1,03	1,81	0
NORDMANN					
<i>Rubus sp.</i>	0,124	47	1,88	0,99	0,26
<i>Lonicera periclymenum</i>	0,090	17	2,81	0,86	0
<i>Pteridium aquilinum</i>	0,077	33	1,84	1,01	0,18
<i>Sarothamnus scoparius</i>	0,070	20	2,04	1,02	0
<i>Castanea Sativa</i>	0,064	26	2,10	0,95	0,23
<i>Hedera helix</i>	0,062	21	1,62	1,11	0
<i>Teucrium scorodonia</i>	0,052	30	1,59	1,07	0,20
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,045	5	4,09	0,58	0
<i>Ilex aquifolium</i>	0,042	13	0,52	1,34	0
<i>Deschampsia flexuosa</i>	0,037	14	1,46	1,14	0
<i>Corylus avellana</i>	0,018	19	1,08	1,15	0,32
<i>Ribes alpinum</i>	0,014	7	1,95	0,62	0
<i>Prunus avium</i>	0,012	16	1,28	1,09	0,38
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,010	27	1,51	0,91	0,90

PLANTES INDICATRICES DE BONNE CROISSANCE (suite)

Espèces	Infor- mation mutuelle	Fré- quence absolue	Fréquence corrigée		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3
CEPHALONIE					
<i>Castanea sativa</i>	0,135	11	3,49	0,84	0
<i>Pteridium aquilinum</i>	0,086	12	3,19	0,64	0,76
<i>Hedera helix</i>	0,086	24	1,28	1,21	0,19
<i>Crataegus monogyna</i>	0,079	23	1,33	1,20	0,20
<i>Hepatica triloba</i>	0,053	9	1,70	1,19	0
<i>Corylus avellana</i>	0,049	4	3,83	0,77	0
<i>Pinus sylvestris</i>	0,044	8	2,88	0,58	1,15
<i>Rubus sp.</i>	0,036	26	1,47	1,06	0,53
<i>Ruscus aculeatus</i>	0,034	9	2,56	0,85	0,51
<i>Arbutus unedo</i>	0,026	10	2,30	0,77	0,92
<i>Evonymus europaeus</i>	0,019	6	2,56	0,77	0,77
<i>Quercus suber</i>	0,019	6	2,56	0,77	0,77
<i>Cytisus triflorus</i>	0,019	6	2,56	0,77	0,77
PINSAPO					
<i>Hedera helix</i>	0,113	26	1,72	1,06	0,20
<i>Pteridium aquilinum</i>	0,103	7	3,66	0,65	0
<i>Lonicera periclymenum</i>	0,077	5	3,84	0,61	0
<i>Erica arborea</i>	0,068	6	3,20	0,76	0
<i>Evonymus europaeus</i>	0,063	7	2,74	0,87	0
<i>Arbutus unedo</i>	0,061	10	1,92	1,07	0
<i>Ruscus aculeatus</i>	0,060	17	1,13	1,25	0
<i>Viola sp.</i>	0,057	17	1,88	0,99	0,31
<i>Crataegus monogyna</i>	0,045	17	1,88	0,71	1,25
<i>Cistus salviaefolius</i>	0,038	6	2,12	1,02	0
<i>Teucrium scorodonia</i>	0,038	6	2,12	1,02	0
<i>Rubus sp.</i>	0,022	21	1,22	1,09	0,51
<i>Corylus avellana</i>	0,020	4	1,60	1,43	0
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,020	12	1,60	1,02	0,44

PLANTES INDICATRICES DE MAUVAISE CROISSANCE

Espèces	Infor- mation mutuelle	Fré- quence absolue	Fréquence corrigée		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3
PECTINE					
<i>Santolina chamaecyparissus</i>	0,107	5	0	0,48	2,34
<i>Buxus sempervirens</i>	0,099	12	1,02	0,40	1,71
<i>Lavandula officinalis</i>	0,071	4	0	0,60	2,20
<i>Quercus pubescens</i>	0,051	16	0,77	0,75	1,46
<i>Daphné laureola</i>	0,048	11	0,74	0,66	1,60
<i>Pinus sylvestris</i>	0,030	15	0,55	1,12	1,17
<i>Rubia peregrina</i>	0,024	8	0,51	0,90	1,46
<i>Cytisus sessilifolius</i>	0,014	6	0,68	0,80	1,46
<i>Quercus ilex</i>	0,010	8	0	1,57	1,10
NORDMANN					
<i>Genista scorpius</i>	0,097	6	0	0,24	5,05
<i>Amelanchier ovalis</i>	0,088	15	0,45	0,58	3,23
<i>Euphorbia characias</i>	0,077	11	0	0,66	3,30
<i>Cytisus sessilifolius</i>	0,072	12	0	0,73	3,03
<i>Dorycnium suffruticosum</i>	0,064	9	0,34	0,80	3,36
<i>Thymus vulgaris</i>	0,061	20	0	0,65	2,40
<i>Coronilla minima</i>	0,059	10	0	0,73	3,03
<i>Juniperus communis</i>	0,053	23	0,3	0,88	2,11
<i>Viburnum lantana</i>	0,048	15	0	0,96	2,02
<i>Sanguisorba minor</i>	0,046	8	0	0,73	3,03
<i>Aphyllantes monspeliensis</i>	0,039	5	0	0,58	3,63
<i>Buxus sempervirens</i>	0,037	24	0,28	0,97	1,77
<i>Lonicera etrusca</i>	0,037	12	0	0,97	2,02
<i>Prunus mahaleb</i>	0,037	12	0	0,97	2,02
<i>Teucrium chamaedrys</i>	0,037	13	0	1,01	1,86
<i>Rubia peregrina</i>	0,035	26	0,52	0,89	1,86
<i>Lavandula latifolia</i>	0,029	13	0,52	0,78	2,33

PLANTES INDICATRICES DE MAUVAISE CROISSANCE (suite)

Espèces	Infor- mation mutuelle	Fré- quence absolue	Fréquence corrigée		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3
CEPHALONIE					
<i>Thymus vulgaris</i>	0,092	24	0	1,09	1,34
<i>Lonicera implexa</i>	0,063	9	0,85	0,51	2,56
<i>Genista scorpius</i>	0,061	7	0	0,66	2,63
<i>Odontites lutea</i>	0,061	7	0	0,66	2,63
<i>Dorycnium suffruticosum</i>	0,046	10	0	0,92	1,84
<i>Quercus coccifera</i>	0,040	11	0,70	0,70	2,09
<i>Brachypodium ramosum</i>	0,039	6	0	0,70	2,30
<i>Smilax aspera</i>	0,039	6	0	0,70	2,30
<i>Cistus albidus</i>	0,036	11	0	1,11	1,26
<i>Helianthemum sp.</i>	0,036	11	0	1,11	1,26
<i>Genista hispanica</i>	0,035	7	0	0,88	1,97
<i>Juniperus oxycedrus</i>	0,034	10	0	1,07	1,38
<i>Daphné gnidium</i>	0,033	8	0	0,96	1,73
<i>Lavandula latifolia</i>	0,031	17	0,045	0,90	1,62
<i>Asparagus acutifolius</i>	0,025	8	0	1,15	1,15
PINSAPO					
<i>Aphyllantes monspeliensis</i>	0,166	4	0	0	5,33
<i>Genista pilosa</i>	0,121	12	0	0,76	2,67
<i>Astragalus monspessulanus</i>	0,083	7	0	0,65	3,05
<i>Brachypodium ramosum</i>	0,083	7	0	0,65	3,05
<i>Prunus mahaleb</i>	0,083	7	0	0,65	3,05
<i>Pinus sylvestris</i>	0,065	10	0	0,91	2,13
<i>Genista hispanica</i>	0,055	8	0,80	0,57	2,67
<i>Euphorbia characias</i>	0,051	12	0,53	0,76	2,22
<i>Teucrium chamaedrys</i>	0,050	19	0,34	0,96	1,68
<i>Quercus coccifera</i>	0,047	10	0	1,07	1,60
<i>Sorbus aria</i>	0,046	8	0	0,95	2,0
<i>Stachelina dubia</i>	0,043	9	0,71	0,68	2,37
<i>Juniperus oxycedrus</i>	0,043	10	1,28	0,61	2,13

REMARQUE : Chêne vert et chêne pubescent n'apparaissent pas dans ces tableaux (sauf pour le pectiné). C'est normal : présents dans la majeure partie de notre zone d'étude, ils se révèlent caractéristiques d'une croissance moyenne (classe 2). L'analyse des tableaux amène aux conclusions suivantes :

- Il existe des plantes indicatrices de bonne croissance pour plusieurs espèces de sapins à la fois. Le même phénomène se reproduit pour les plantes de mauvaise croissance.
- On retrouve dans les tableaux de nombreuses plantes souvent associées dans la nature.

1.3. Les tests botaniques

Afin de synthétiser toutes ces données floristiques, nous avons créé une nouvelle variable : le "test botanique", qui est la différence entre le nombre de plantes de bonne croissance et celui de mauvaise croissance.

A chaque espèce de sapin, nous avons attribué un test botanique à partir de leurs listes de plantes indicatrices spécifiques.

D'autre part, nous avons créé un test botanique général à partir de plantes indicatrices de bonne ou mauvaise croissance communes à plusieurs espèces.

Pour chacune des quatre espèces étudiées, une segmentation¹ a été faite en introduisant ces deux tests botaniques parmi l'ensemble des variables explicatives. Le "test spécifique" s'est révélé très performant, induisant le premier niveau de segmentation pour les 4 espèces.

Le tableau présentant la variation d'indice en fonction des valeurs du test est très significatif à ce sujet.

1 Pour plus de détail sur la méthode de segmentation, se reporter à l'annexe 14.

Valeur Espèces	< - 7	-7à-6	-5à-4	-3à-2	-1à 0	1 à 2	3 à 4	5 à 6	7 à 8	+ de 8
Pectiné	-	-	142	186	205	218	237	230	238	-
Nordmann	103	84	127	147	148	204	239	234	239	253
Céphalonie	96	73	111	122	145	155	199	224	235	-
Pinsapo	100	78	110	122	138	143	170	194	171	232

Par contre, le "test général" n'est apparu à aucun moment dans la segmentation, ce qui rendait impossible tout essai de comparaison entre les différentes espèces (les segmentations séparées pour chaque espèce ne le permettaient pas).

C'est pourquoi nous avons employé une autre méthode d'étude : l'Analyse Factorielle des Correspondances, afin de définir des stations sur lesquelles il est alors possible de comparer la croissance des différentes espèces de sapins.

2. L'analyse factorielle des correspondances (AFC)

L'A.F.C. permet de mettre en rapport l'ensemble des relevés d'une part et l'ensemble des espèces d'autre part. Elle projette dans un espace à n dimensions l'ensemble des relevés floristiques et forme un nuage constitué par les espèces ; chaque plante est représentée par un point moyen, centre de gravité de sa distribution.

L'A.F.C. recherche ensuite les axes factoriels. Elle commence par isoler celui qui étire le plus le nuage, puis les suivants, de moins en moins explicatifs de la géométrie du nuage. Chaque axe factoriel est caractérisé par un pourcentage d'explication de la forme du nuage. Dans notre cas, les pourcentages d'explication pour les 4 premiers axes sont :

	Pourcentage	Pourcentage cumulé
Axe 1	31,20	31,20
Axe 2	23,51	54,72
Axe 3	13,60	68,32
Axe 4	10,96	79,27

2.1. Elaboration des groupes floristiques

Chaque plante du nuage est caractérisée par :

- sa projection sur chacun des plans factoriels engendrés par 2 axes factoriels ;
 - sa contribution relative à chacun des axes factoriels.
- A partir de ces 2 éléments, nous avons isolé 20 groupes de plantes appelés "groupes AFC" (voir leur projection dans le plan factoriel 1-3 figure 10).

Les groupes AFC sont ensuite réunis en 11 groupes floristiques. Nous obtenons :

- 4 groupes sur l'axe 1 : 1;2 s'opposant à 10;11
- 1 groupe sur l'axe 2 : le 7
- 1 groupe sur l'axe 3 : le 6
- 5 groupes sur l'axe 4 : 4;5;8 s'opposant à 3;9.

Ils sont numérotés de 1 à 11 suivant la "fibre" de l'AFC. Cette "fibre" s'interprète comme le cheminement logique permettant de passer du groupe 1 au groupe 11 ; elle représente le maximum d'étirement du nuage dans l'espace de projection.

GROUPE 1

<i>Ononis natrix</i>	(A11)	<i>Aphyllantes monspeliensis</i>	(009)
<i>Brachypodium ramosum</i>	(021)	<i>Carlina vulgaris</i>	(029)
<i>Genista scorpius</i>	(080)	<i>Brachypodium phenicoides</i>	(020)
<i>Stachelina Dubia</i>	(A74)	<i>Teucrium polium</i>	(A77)
<i>Odontites lutea</i>	(A08)	<i>Juniperus oxycedrus</i>	(091)
<i>Quercus coccifera</i>	(A41)	<i>Bupleurum falcatum</i>	(022)
<i>Eryngium campestre</i>	(062)	<i>Thymus vulgaris</i>	(A80)

GROUPE 2

<i>Cistus albidus</i>	(032)	<i>Helianthemum sp.</i>	(083)
<i>Lavandula latifolia</i>	(093)	<i>Sedum anopetalum</i>	(A66)
<i>Lonicera implexa</i>	(A02)	<i>Bonjeania hirsuta</i>	(019)
<i>Dorycnium suffruticosum</i>	(055)	<i>Coronilla minima</i>	(043)
<i>Rosmarinus officinalis</i>	(A54)	<i>Lonicera etrusca</i>	(A01)
<i>Euphorbia characias</i>	(063)	<i>Teucrium chamaedrys</i>	(A76)

GROUPE 3

<i>Osyris alba</i>	(A14)
<i>Spartium junceum</i>	(A73)
<i>Rubia peregrina</i>	(A55)
<i>Quercus ilex</i>	(A42)
<i>Lavandula vera</i>	(094)
<i>Acer monspessulanum</i>	(003)
<i>Echinops ritro</i>	(056)
<i>Amelanchier ovalis</i>	(007)
<i>Satureia montana</i>	(A65)
<i>Buxus sempervirens</i>	(023)
<i>Astragalus monspessulanus</i>	(015)
<i>Potentilla tormentilla</i>	(A34)

GROUPE 4

<i>Asparagus acutifolius</i>	(012)
<i>Smilax aspera</i>	(A68)
<i>Clematis flammula</i>	(036)

GROUPE 5

<i>Viburnum tinus</i>	(A89)
<i>Ligustrum vulgare</i>	(096)
<i>Ruscus aculeatus</i>	(A58)
<i>Coronilla emerus</i>	(041)

GROUPE 6

<i>Taxus baccata</i>	(A75)
<i>Hepatica triloba</i>	(086)
<i>Ulmus campestris</i>	(A85)
<i>Genista cinerea</i>	(076)
<i>Viburnum lantana</i>	(A88)
<i>Cornus sanguinea</i>	(040)
<i>Acer campestre</i>	(002)
<i>Clematis vitalba</i>	(037)
<i>Helleborus foetidus</i>	(085)
<i>Crataegus monogyna</i>	(047)
<i>Daphné laureola</i>	(053)
<i>Hedera helix</i>	(082)
<i>Evonymus europaeus</i>	(066)

GROUPE 7

<i>Phillyrea angustifolia</i>	(A17)
<i>Helichrysum stoechas</i>	(084)
<i>Cistus salviaefolius</i>	(035)
<i>Erica arborea</i>	(059)
<i>Cistus monspeliensis</i>	(034)
<i>Arbutus unedo</i>	(008)
<i>Calycotome spinosa</i>	(026)
<i>Quercus suber</i>	(A46)
<i>Cytisus triflorus</i>	(051)
<i>Pinus pinaster</i>	(A22)

GROUPE 8

<i>Rosa canina</i>	(A53)
<i>Genista pilosa</i>	(078)
<i>Rubus sp.</i>	(A57)
<i>Prunus spinosa</i>	(A38)

GROUPE 9

<i>Cytisus sessilifolius</i>	(050)
<i>Pinus sylvestris</i>	(A24)
<i>Tilia cordata</i>	(A81)
<i>Primula officinalis</i>	(A35)
<i>Lonicera xylosteum</i>	(A04)
<i>Acer opalus</i>	(004)
<i>Laburnum anagyroides</i>	(092)
<i>Fragaria vesca</i>	(069)
<i>Prunus avium</i>	(A38)

GROUPE 10

<i>Asplenium andiantum nigrum</i>	(014)
<i>Corylus avellana</i>	(044)
<i>Fraxinus excelsior</i>	(070)
<i>Sorbus aria</i>	(A69)
<i>Fagus sylvatica</i>	(067)
<i>Pteridium aquilinum</i>	(A40)
<i>Castanea sativa</i>	(030)
<i>Ilex aquifolium</i>	(088)
<i>Lonicera periclymenum</i>	(A03)
<i>Mercurialis perennis</i>	(A07)

GROUPE 11a

<i>Epilobium montana</i>	(057)
<i>Pirola secunda</i>	(A25)
<i>Acer pseudoplatanus</i>	(005)
<i>Quercus sessiliflora</i>	(A45)
<i>Calluna vulgaris</i>	(025)
<i>Rubus idaeus</i>	(A56)
<i>Polypodium vulgare</i>	(A30)
<i>Sorbus aucuparia</i>	(A70)

GROUPE 11b

<i>Sarothamnus scoparius</i>	(A64)
<i>Teucrium scorodonia</i>	(A78)
<i>Betula verrucosa</i>	(018)
<i>Erica cinerea</i>	(060)
<i>Deschampsia flexuosa</i>	(054)
<i>Vaccinium myrtillus</i>	(A87)
<i>Genista purgans</i>	(079)

Groupes AFC espèces

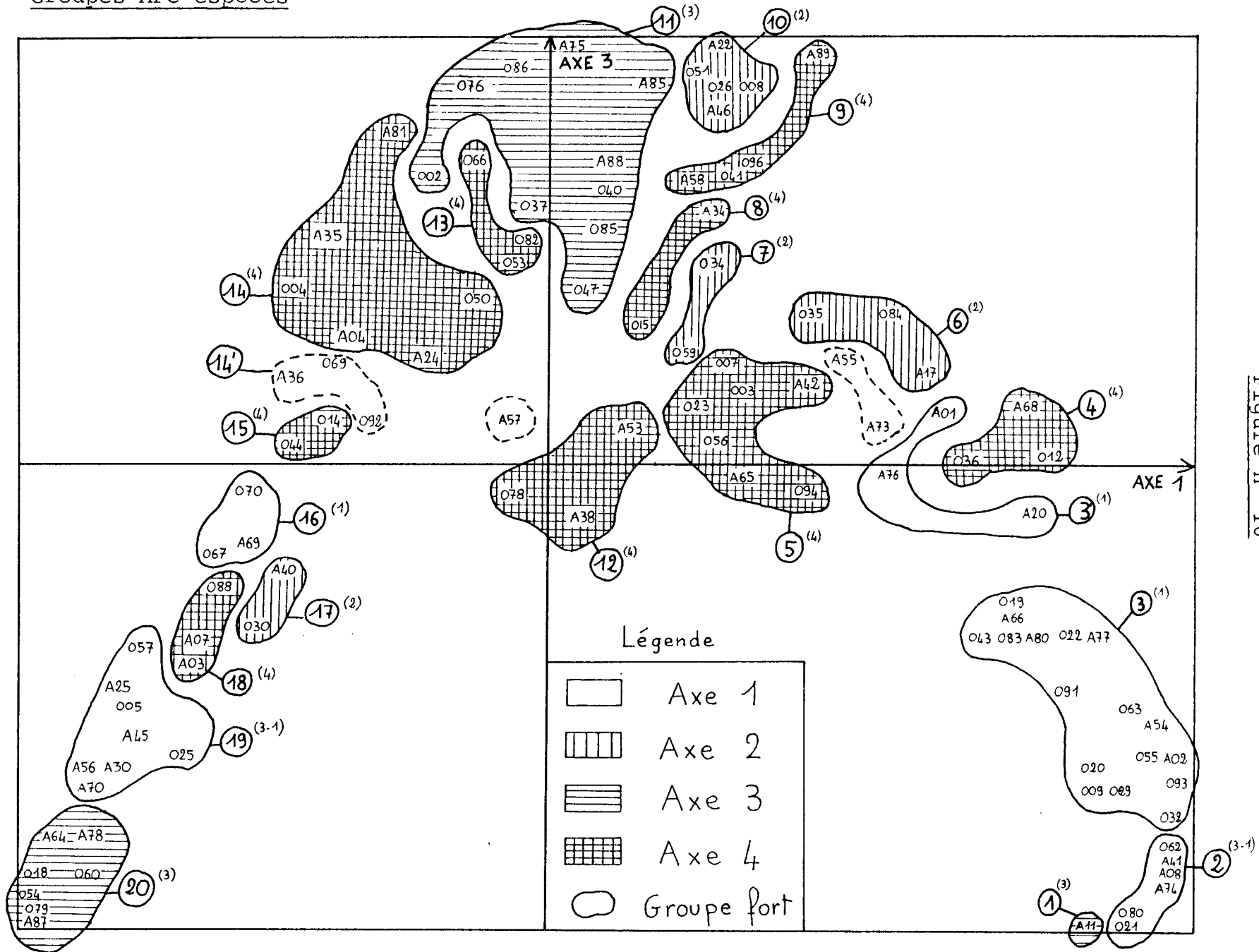


Figure n° 10

. Ecologie des groupes floristiques

Il se dégage un effet de xéricité décroissante du groupe 1 typiquement méditerranéen au groupe 6 dépassant largement le cadre méditerranéen. Cela traduit donc une alimentation en eau de plus en plus favorable. Tous ces groupes sont plus ou moins liés aux substrats calcaires.

Le groupe 7 est typique de la végétation thermophile inféodée aux substrats siliceux. Le groupe 8 est constitué de plantes très répandues à large répartition, traduisant des conditions moyennes.

Quant au groupe 9, il caractérise un climat montagnard sec contrairement au groupe 10 typique d'un climat montagnard plus humide, et peut-être plus acide. Le groupe 11 est montagnard lui aussi, le 11a traduisant surtout une variante plus alticole, et le 11b une variante liée aux substrats acides et sableux.

. Comparaison rapide avec les résultats de l'information mutuelle

- Les plantes indicatrices de bonne croissance ; pour le Nordmann et le Pectiné, elles appartiennent en majorité aux groupes floristiques 10 et 11, deux groupes montagnards. Le 11a, le plus alticole, est peu représenté chez le Nordmann, ce qui laisse penser qu'il serait quelque peu limité en altitude.

Le sapin de Céphalonie et le sapin pinsapo montrent des préférences similaires mais nettement différentes des deux espèces précédentes. En effet, ils trouvent leurs meilleures conditions de croissance dans les groupes 6, 7 et 10. Il s'agit grossièrement du mésophile bien alimenté en eau, du thermophile siliceux, du montagnard humide. Cela traduit donc une préférence pour des climats plus chauds que pour les 2 espèces précédentes, néanmoins relativement bien alimentés en eau.

- Plantes de mauvaise croissance ; pour le sapin pectiné, la plupart des plantes appartiennent au groupe 3, le groupe méditerranéen revêtant la plus grande extension, ainsi qu'au groupe 9, montagnard sec.

Le Nordmann craint les groupes 2 et 3. Il semble plus résistant à la sécheresse que le Pectiné, car le groupe 9 ne représente pas pour lui des conditions défavorables. Pour le sapin de Céphalonie et le Pinsapo, les plantes de mauvaise croissance appartiennent principalement aux groupes 1 et 2, les plus secs. L'analogie entre les 2 espèces se poursuit donc.

Les sapins demandent donc une certaine richesse en eau dans le sol pour croître convenablement, ceci quelle que soit l'espèce. La meilleure adaptation au climat méditerranéen revient sans conteste au sapin de Céphalonie et au sapin d'Espagne qui se départagent difficilement au vu de ces résultats.

2.2. Diagonalisation

Les groupes floristiques ont été disposés suivant l'ordre défini précédemment afin de regrouper les relevés en "stations". N'ayant pu avoir accès à un programme de calcul permettant de projeter les relevés dans l'espace défini par la végétation, nous avons dû réaliser ce travail "à la main" à partir des 331 relevés. Nous avons obtenu finalement un tableau diagonalisé à partir duquel ont été isolés 14 groupes de relevés, ou stations, numérotées de I à XIV.

2.3. Critères de définition des stations

Les 14 stations sont individualisées à partir des groupes floristiques qu'elles possèdent ou ne possèdent pas (voir le tableau diagonalisé en annexe 15).

. La station I (26 relevés) est caractérisée par la présence du groupe 1. Elle possède aussi les groupes 2 et 3.

- . La station II (63 relevés) se différencie de la I par la perte du groupe 1.
- . La station III (15 relevés) s'individualise par la présence des groupes 4, 5 et 6. On note simultanément la disparition du groupe 2 et l'affaiblissement du groupe 3, réduit seulement au chêne vert et à la garance.
- . La station IV (7 relevés) possède les groupes 2, 3 et 6 et le groupe 10 commence à apparaître.
- . La station V (8 relevés) possède un nombre important de groupes (du 2 au 11) ; aucun n'est complet cependant.
- . La station VI (22 relevés) est caractérisée par le groupe 7.
- . La station VII (15 relevés) possède le groupe 6.
- . La station VIII (45 relevés) est caractérisée par l'apparition du groupe 9.
- . La station IX (15 relevés) possède les groupes 6, 9, 10.
- . La station X (40 relevés) s'isole de la précédente par la disparition du groupe 9.
- . La station XI (25 relevés) possède les groupes 10 et 11, le groupe 6 a disparu.
- . La station XII (8 relevés) perd le groupe 10 pour ne conserver que les groupes 8 et 11b.
- . La station XIII (18 relevés) possède les groupes 10 et 11a en plus de la précédente.
- . La station XIV (24 relevés) se distingue de la XIII par la faiblesse du groupe 11a.

REMARQUE : A l'intérieur des stations à fort effectif de nombreuses nuances peuvent être mises en évidence.

Exemple : la station II : en jouant sur la densité de présence des groupes 3 et 6 on peut créer 3 sous-stations (groupe 3 réduit et groupe 6 absent, groupe 3 bien étoffé et absence du groupe 6, groupe 3 bien fourni et présence du groupe 6). Un travail du même type peut être réalisé dans les stations VIII, X...

Il n'a pas été mené à bien faute de temps.

2.4. Mise en relation avec les facteurs écologiques

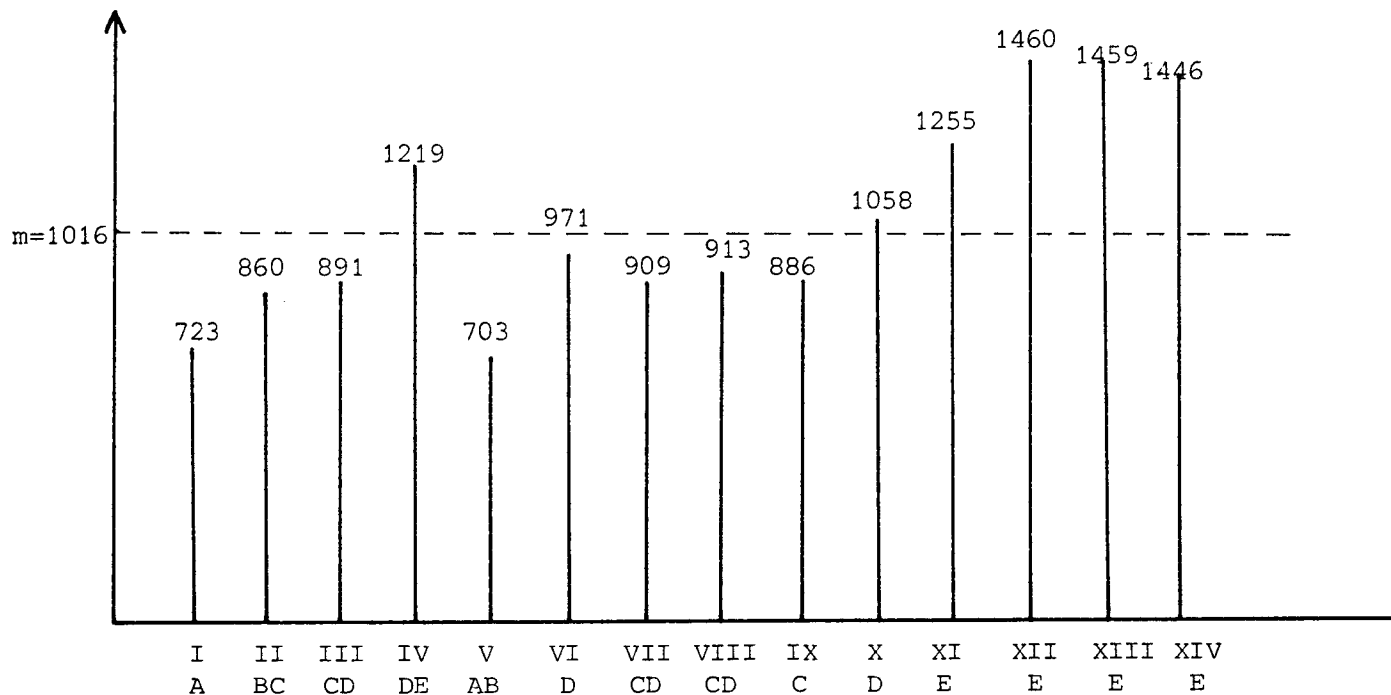
Afin de savoir si les stations définies représentent bien des réalités écologiques, nous les avons mises en rapport avec les principaux facteurs du milieu :

- Une analyse de variance a été faite pour comparer les moyennes prises par les variables continues sur chaque station.
- Les variables discrètes ont été étudiées à l'aide du test du Chi2 pour comparer leur répartition à l'intérieur des stations. Tous les facteurs testés (sauf l'affleurement de la roche-mère et l'exposition du versant) se sont révélés significatifs au seuil de 10^{-5} .

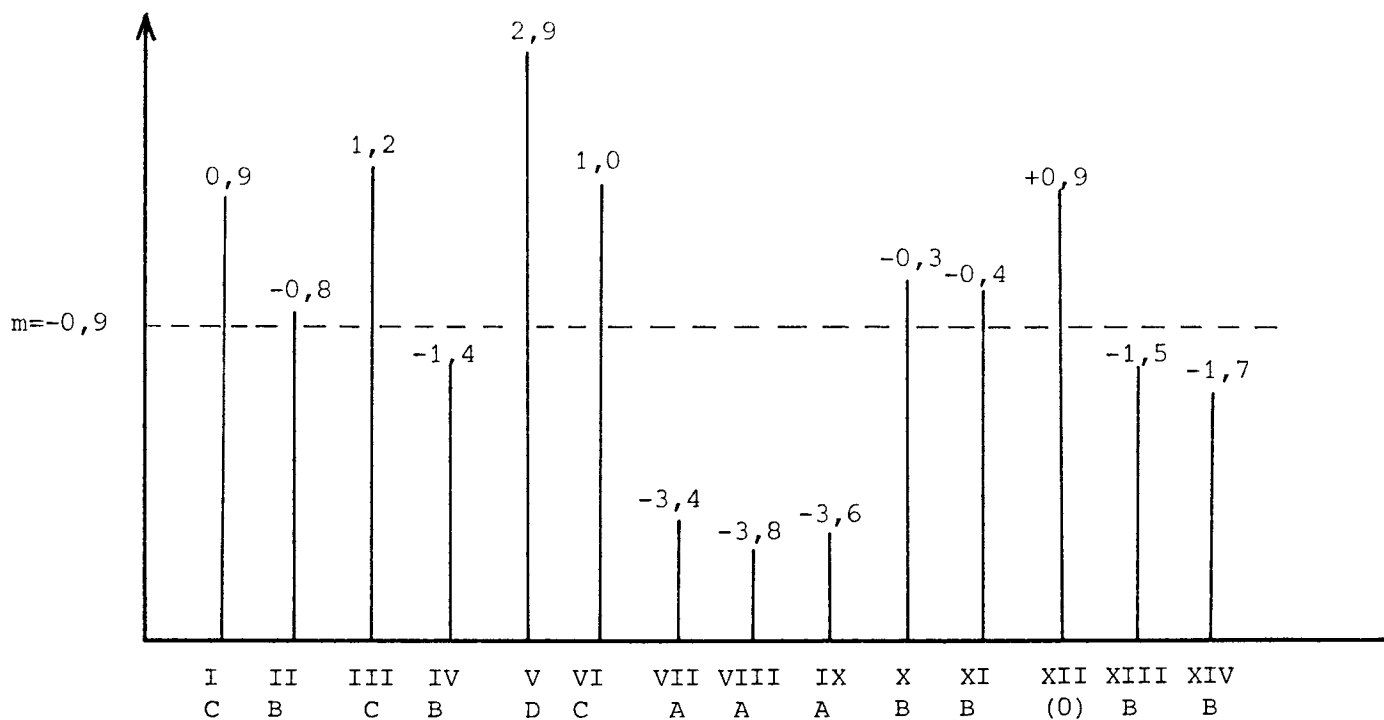
2.4.1. Facteurs climatiques

Ils permettent de discriminer le mieux les stations entre elles.

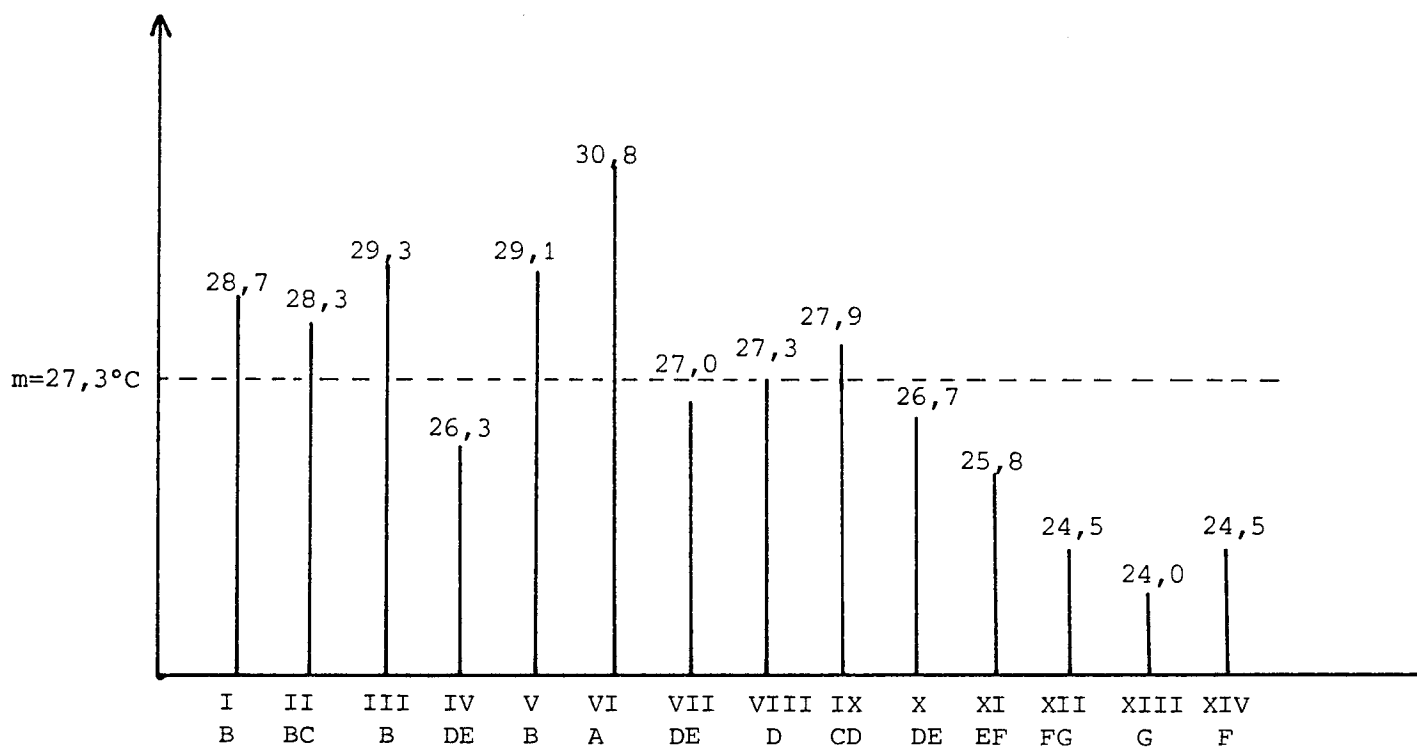
. Pluviosité annuelle en mm



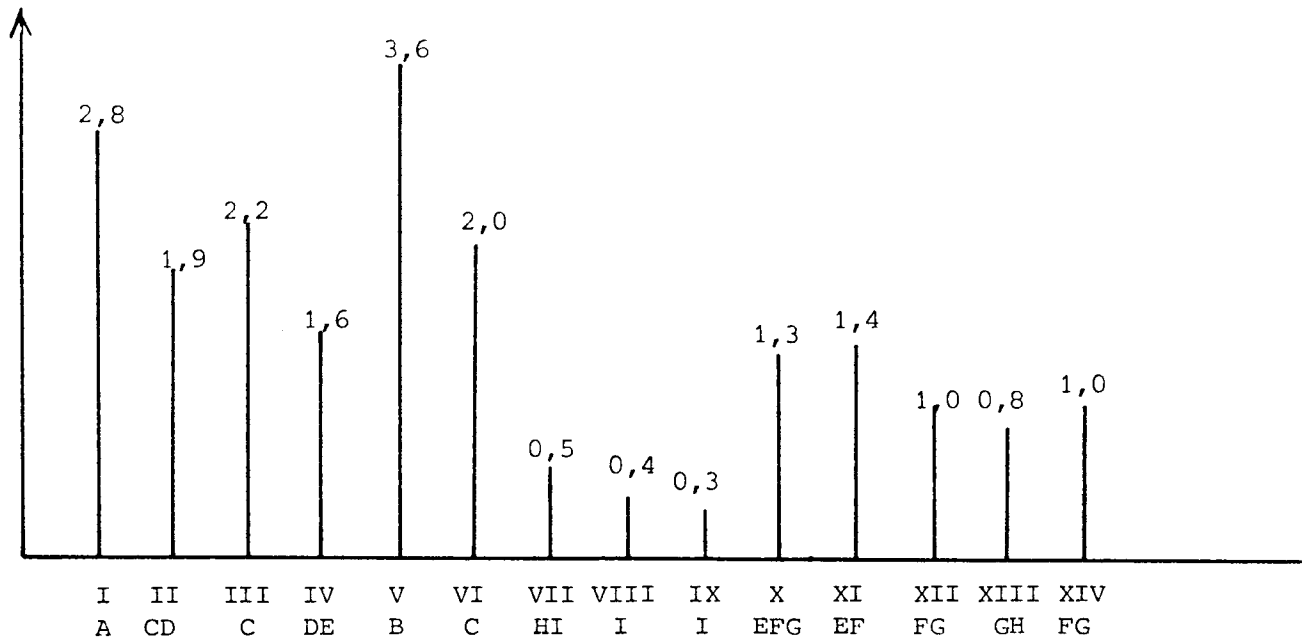
. Température moyenne des minima du mois le plus froid (°C)



. Température moyenne des maxima du mois le plus chaud (°C)

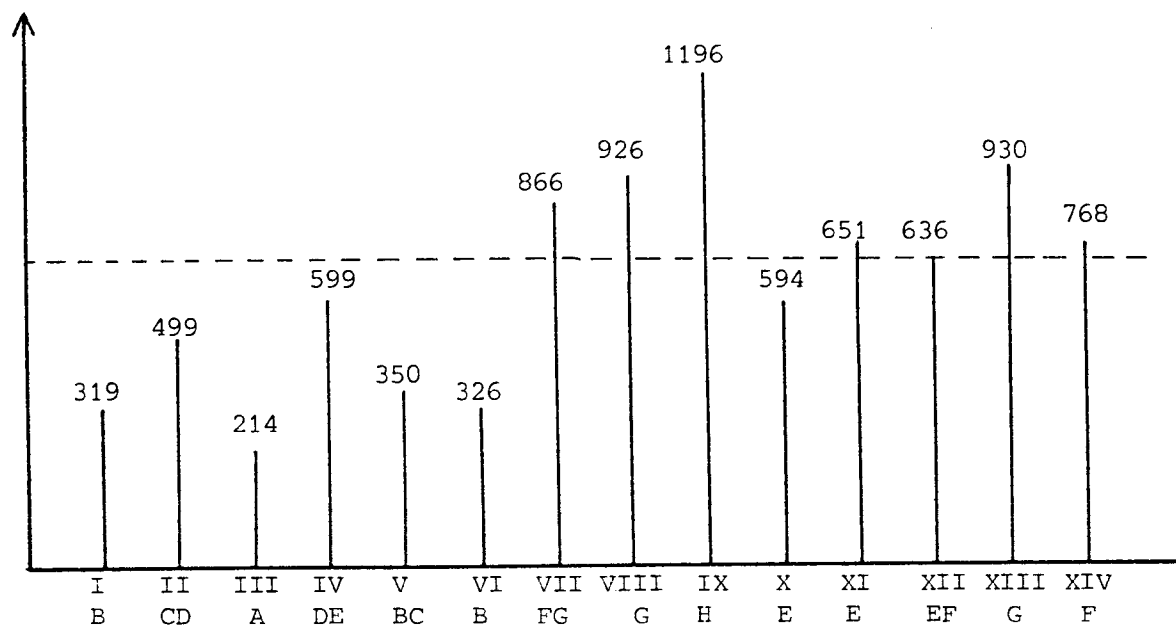


. Nombre de mois biologiquement secs selon Gaussen : Cette variable a été considérée comme continue. On peut, de ce fait, calculer des moyennes et réaliser des tests de variance. Ce facteur permet de bien discriminer les stations entre elles ; la seule justification à cette approximation est qu'une répartition par classes aurait été moins "parlante" visuellement qu'un ensemble de moyennes.



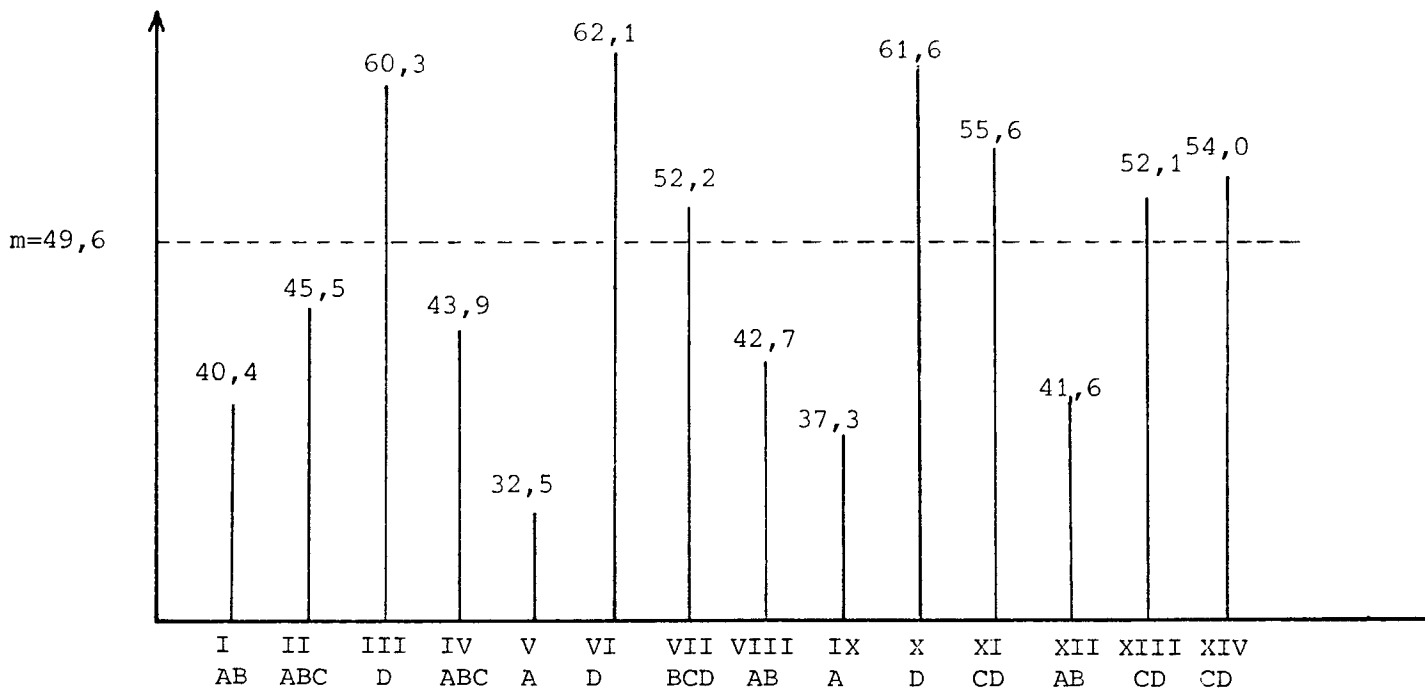
2.4.2. Facteurs géographiques

. Altitude en m : Elle discrimine bien les stations entre elles puisque les moyennes varient de 214 m à 1196 m.



2.4.3. Facteurs géologiques et édaphiques

Roche-mère, texture, réaction HCl et profondeur moyenne du sol permettent de bien différencier les stations. Seul le graphe concernant la profondeur moyenne est donné ici, étant la seule variable continue. Les autres variables, toutes aussi explicatives ont leur répartition en fonction des stations présentée en annexe sous forme de tableaux.



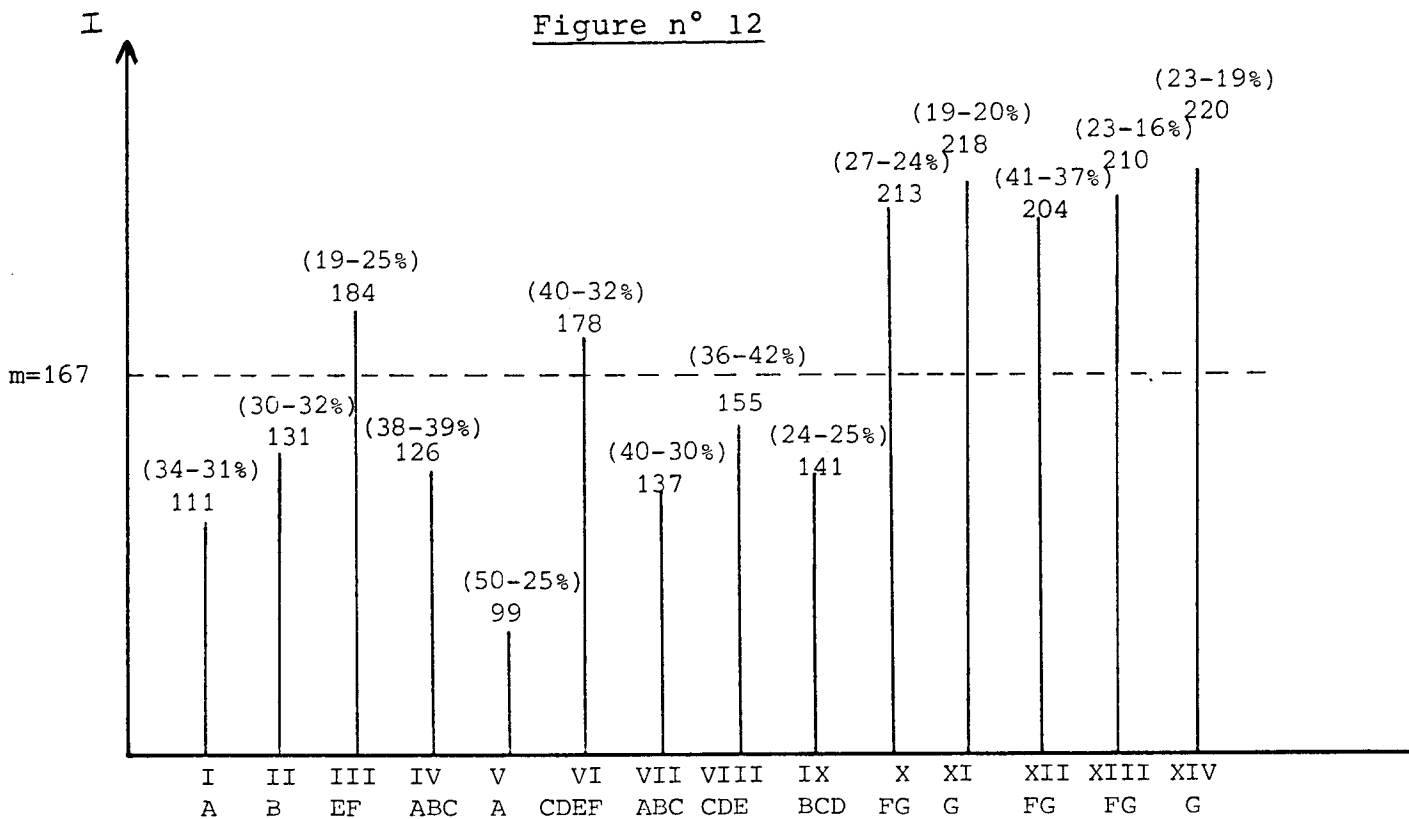
2.5. Explicitation des stations. Relation avec la fertilité

Connaissant, pour chaque station :

- les groupes floristiques à écologie plus ou moins apparente qui lui sont propres ;
- les relevés qui la composent ;
- les moyennes des principaux facteurs écologiques et de la fertilité ;

il est à présent possible de les caractériser plus précisé-

ment, en relation avec leurs potentialités. La figure n° 13 contient les moyennes d'indice de fertilité en fonction des stations pour chaque espèce de sapin prise séparément. Le graphique suivant donne la moyenne des indices pour chaque station toutes espèces confondues. Il est certain que les espèces poussent différemment sur la même station, mais ce schéma donne quand même une bonne idée de la fertilité globale de chaque station. Le premier chiffre entre parenthèses indique le coefficient de variation de l'indice dans la station, toutes espèces confondues ; le second est celui de l'espèce la plus représentée dans la station).



. Les stations I et V sont localisées dans les climats les plus secs (environ 3 mois secs, pluviosité annuelle de 700 mm) et à basse altitude (320 m en moyenne).

La station I comprend les placettes situées sur la bande littorale allant des Pyrénées orientales jusqu'au Var. Cette station est fortement inféodée aux substrats calcaires (d'où présence de réaction HCl et texture argileuse ou équilibrée).

La station V, peut-être plus xérique, se présente comme une variante géologique de la station I : elle se situe sur roche-mère acide. La plupart des relevés proviennent du Minervois. Dans les 2 cas, les sols sont caillouteux et peu profonds. Les moyennes d'indice sont les plus mauvaises, respectivement 111 et 99. La roche-mère acide ne montre aucune supériorité sur son homologue calcaire.

. La station II : elle peut être définie comme le prolongement des stations précédentes en s'éloignant de la mer (distance moyenne à la mer = 62 km contre 49). Corrélativement elle est un peu moins sèche (environ 2 mois secs) les précipitations augmentent (860 mm) tout comme l'altitude (500 m). Le substrat reste typiquement calcaire, le sol très caillouteux. L'indice augmente : 131 en moyenne.

. La station III : climatiquement, elle se rapproche de la précédente. Elle s'en individualise sur le plan édaphique par un sol significativement plus profond et peu caillouteux. La présence des groupes floristiques 4, 5, 6 traduit une bonne alimentation en eau tout en restant en climat typiquement méditerranéen. Il n'est pas étonnant de trouver une bonne moyenne d'indice : 184.

. La station IV : le climat méditerranéen reste encore important, il est toutefois atténué par une influence montagnarde (apparition du groupe floristique 10, altitude moyenne de 600 m, pluviosité annuelle de 1200 mm). Le substrat est un calcaire dur ou dolomitique. La moyenne d'indice reste faible, nous l'attribuons en partie au sol très caillouteux.

. La station VI : La faible distance moyenne à la mer (16 km) et le substrat siliceux caractérisent les Maures. Les sols y sont profonds, peu caillouteux, la pluviosité correcte (970 mm), et corrélativement la moyenne d'indice se révèle tout-à-fait acceptable : 178.

. Stations VII, VIII, IX : elles apparaissent homogènes sur de nombreux points :

- éloignement de la mer (plus de 85 km),
- altitude importante (plus de 800 m),
- moyenne des minima du mois le plus froid très basses (-3,5°C) et moins d'un mois sec,
- substrats marnocalcaires.

Nous venons de mettre en évidence les Alpes.

La station VII comporte surtout des placettes des Alpes de Haute Provence, les plus sèches. La station VIII est une variante un peu plus fraîche de la précédente. La station IX est typiquement montagnarde (altitude moyenne 1200 m), et souvent sur dépôts glaciaires. Sur ces trois stations, la fertilité toutes espèces confondues est comparable.

. La station X se développe sur substrats variés. Elle regroupe des placettes en général bien arrosées (1060 mm en moyenne), en altitude moyenne (600 m), mais qui gardent encore quelque influence méditerranéenne (chêne vert et garrigue sont encore présents mais ont perdu leur cortège floristique). Propices à la fois sur le plan climatique et édaphique (sols profonds et peu caillouteux) leur moyenne d'indice de fertilité est donc très bonne (212).

. Les stations XI, XII, XIII, XIV se révèlent homogènes sur le plan climatique (très importante pluviosité, un mois sec environ) et géologique (roche-mère acide). Elles regroupent les placettes du Haut Languedoc : Corbières occidentales, Montagne Noire, Hautes Cévennes, Lozère granitique.

Plusieurs nuances ont été distinguées :

- la station XI avec une altitude moyenne de 650 m ;
- la station XII qui définit une petite région géographique : les monts au Sud Est de St Pons dans l'Hérault. Elle se différencie de la précédente par l'absence du groupe floristique

Figure :° 13

. Relation station-indice par espèce

Station \ Espèce	pectiné	Nord-mann	Cépha-lonie	Pinsap	Hybride Nord-mann x pectiné	Hybride indé-terminé	humide	con-color
I	-	107 (4)	93 (9)	127 (11)	-	120 (1)	-	108 (1)
II	-	128 (16)	139 (20)	126 (16)	155 (2)	179 (2)	110 (1)	107 (6)
III	-	174 (3)	208 (3)	166 (6)	179 (1)	216 (2)	-	-
IV	-	115 (4)	162 (2)	100 (1)	-	-	-	-
V	-	122 (2)	53 (3)	130 (3)	-	-	-	-
VI	-	152 (5)	182 (8)	188 (4)	-	288 (1)	166 (2)	164 (2)
VII	130 (2)	149 (4)	163 (4)	190 (2)	-	-	-	56 (3)
VIII	176 (8)	177 (12)	149 (8)	123 (10)	-	264 (1)	-	149 (5)
IX	186 (2)	136 (8)	-	109 (2)	-	153 (1)	121 (1)	-
X	199 (9)	230 (14)	186 (8)	178 (6)	252 (2)	346 (1)	-	157 (1)
XI	218 (4)	215 (10)	227 (2)	217 (2)	229 (6)	-	-	150 (1)
XII	-	218 (7)	114 (1)	-	-	-	-	-
XIII	196 (12)	229 (4)	-	-	174 (1)	350 (1)	-	-
XIV	242 (4)	222 (16)	122 (1)	149 (1)	244 (2)	-	-	-

(Entre parenthèses sont figurés les effectifs)

10 (montagnard humide). Elle est certainement un peu plus sèche, la localisation des stations météorologiques ne permet pas de saisir cette nuance.

. La station XIII plus haute (930 m) représente la Lozère granitique principalement.

. La station XIV peut se définir comme une variante plus altitudinale des stations XI et XII. Ces nuances ont peu d'incidence sur l'indice moyen qui reste très bon.

2.6. Croissance comparée des différentes espèces

Après avoir confondu les espèces pour pouvoir expliciter plus facilement les stations définies, nous avons comparé la croissance des différents sapins en fonction des stations, à partir de la figure 13.

Dans les stations les plus sèches (I, II, V), les 3 espèces ont des moyennes d'indice proches. Le Nordmann réalise des performances comparables au Céphalonie et au Pinsapo ; en effet, il a été introduit dans les milieux les plus favorables, ailleurs il n'aurait sans doute pas résisté.

Si l'on supprime cet artéfact, il apparaît alors que Pinsapo et Céphalonie ont des croissances similaires. Dans les stations VI et VII, encore sèches, leur suprématie se maintient. A partir de la station VIII, les positions s'inversent : Pectiné (qui apparaît) et Nordmann passent en tête. En station IX, très élevée (1200 m), Céphalonie et Pinsapo n'ont pas été introduits, ou très peu. Le Pinsapo présente des gélivures. Le Pectiné commence à trouver de bonnes conditions de croissance, le Nordmann nous a paru quelque peu gêné par l'altitude. Les stations X et XI, en situation climatique moyenne conviennent bien aux 4 espèces. Dans les stations XII, XIII, XIV, on note la suprématie du Nordmann et la bonne croissance du pectiné. Les 2 autres espèces sont peu introduites, le Pinsapo craint l'altitude et le froid (dégâts de cimes, gélivures), la croissance du Céphalonie, tout en restant inférieure aux stations précédentes, est certainement un peu meilleure que ne le montrent les chiffres.

2.7. Problème

Une grande différence de fertilité se dessine entre les stations et permet ainsi une bonne discrimination. Seulement cette fertilité varie encore beaucoup à l'intérieur de chaque station. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder les coefficients de variation ou les histogrammes de répartition de l'indice de fertilité à l'intérieur de chaque station, en annexe.

Nous l'expliquons de la façon suivante : nous avons défini principalement des groupes climatiques ou régionaux entraînant des effets sur la géologie et l'édaphisme. Néanmoins l'hétérogénéité des facteurs édaphiques, topographiques, voir climatiques est encore très importante à l'intérieur de chaque station, ce qui entraîne une forte dispersion de la fertilité.

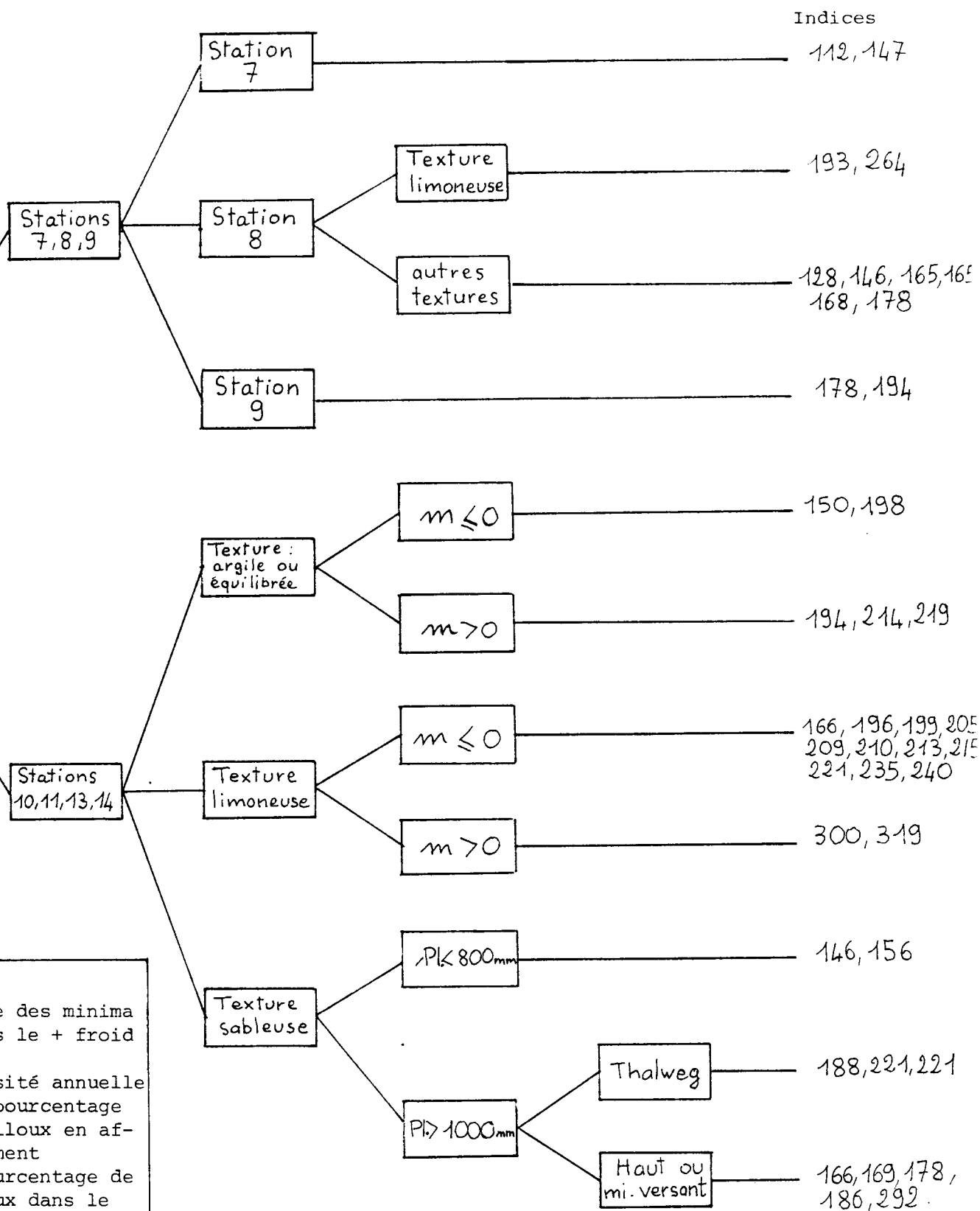
Pour avoir une approche plus précise de la fertilité, nous avons repris chaque groupe de relevés et pour chaque espèce, nous avons cherché à sélectionner les facteurs écologiques les plus influents. Plusieurs tentatives de segmentation ont été faites en y introduisant la variable "station". Mais devant les effectifs relativement faibles de chaque station, nous avons été conduit là aussi à travailler "à la main". Seuls ces derniers résultats sont présentés ici sous forme de graphiques (figures n° 14 à 17).

III. SYNTHÈSE

Dans le souci de mieux guider le reboiseur désirant introduire des sapins, une synthèse simplifiée a été réalisée. La figure n° 18 récapitule les principaux types de stations rencontrés et les recommandations qu'il est possible de formuler sur le choix des espèces.

Figure n° 14

Segmentation nectiné



LEGENDE

- m : moyenne des minima du mois le + froid en °C
- pl : pluviosité annuelle
- %C.affl. : pourcentage de cailloux en affleurement
- %C.sol : pourcentage de cailloux dans le sol
- T : température moyenne annuelle

Figure n° 15

Segmentation Nordmann

Indices

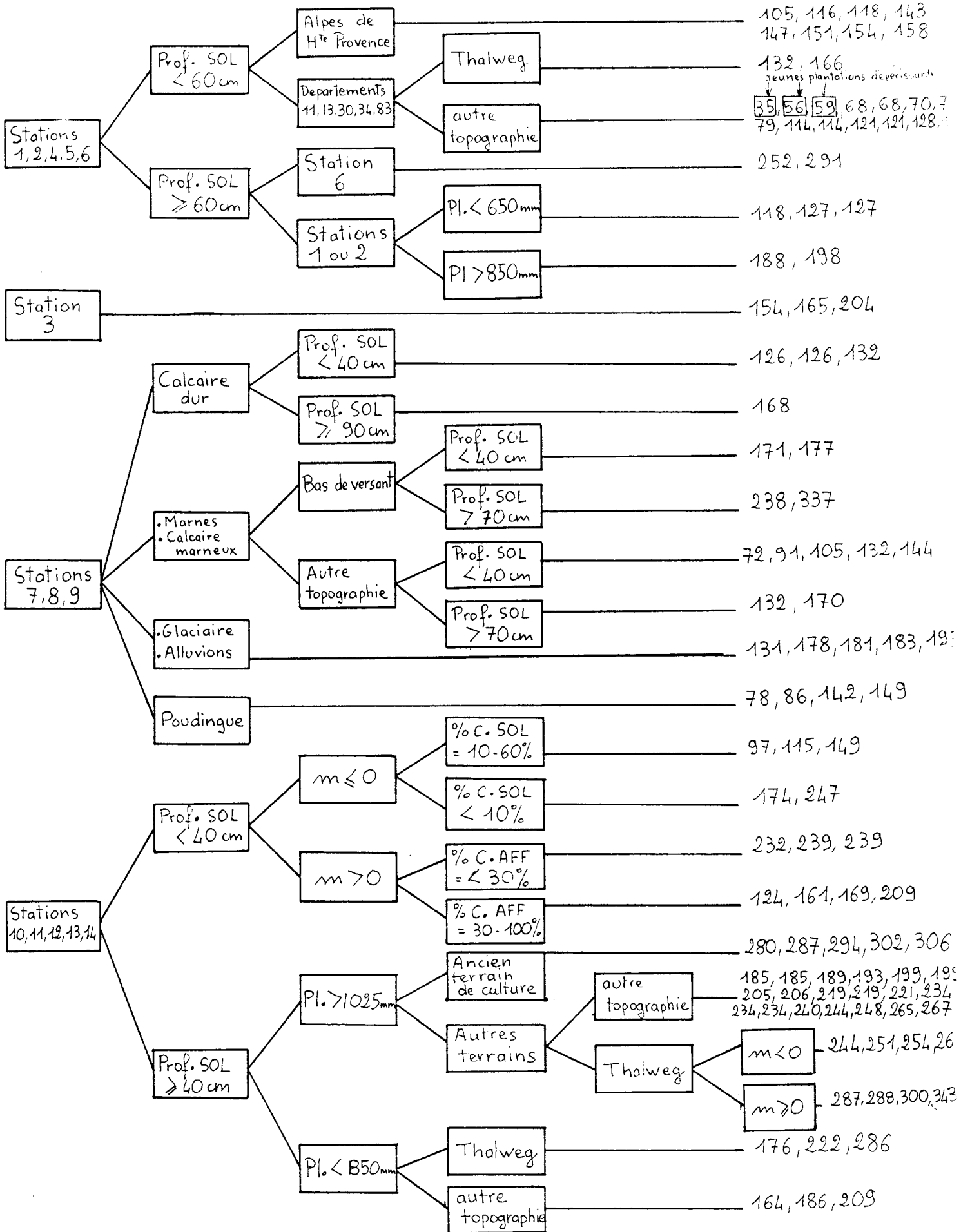


Figure n° 16

Segmentation Céphalonie

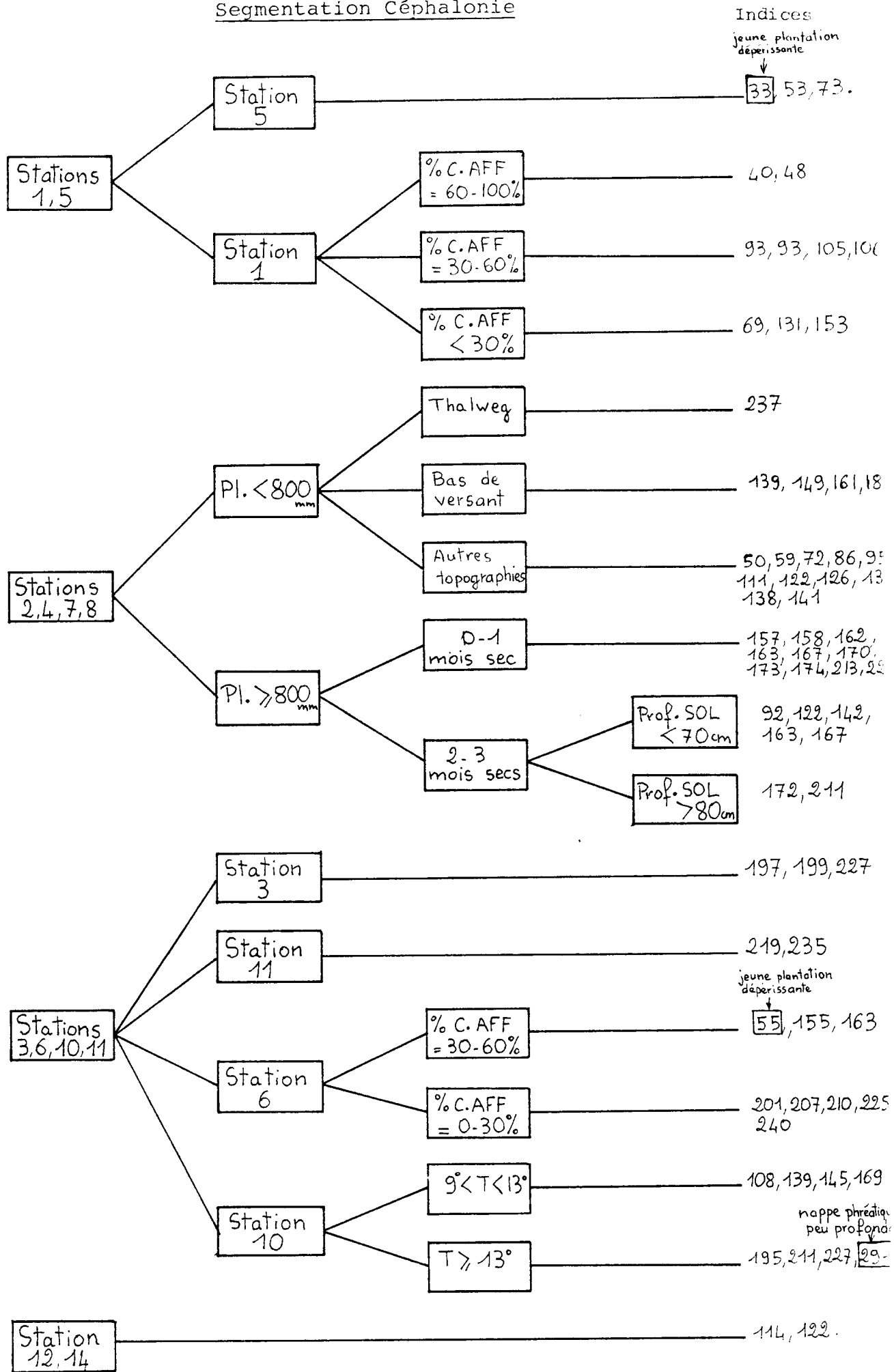


Figure n° 17

Segmentation pinsapo

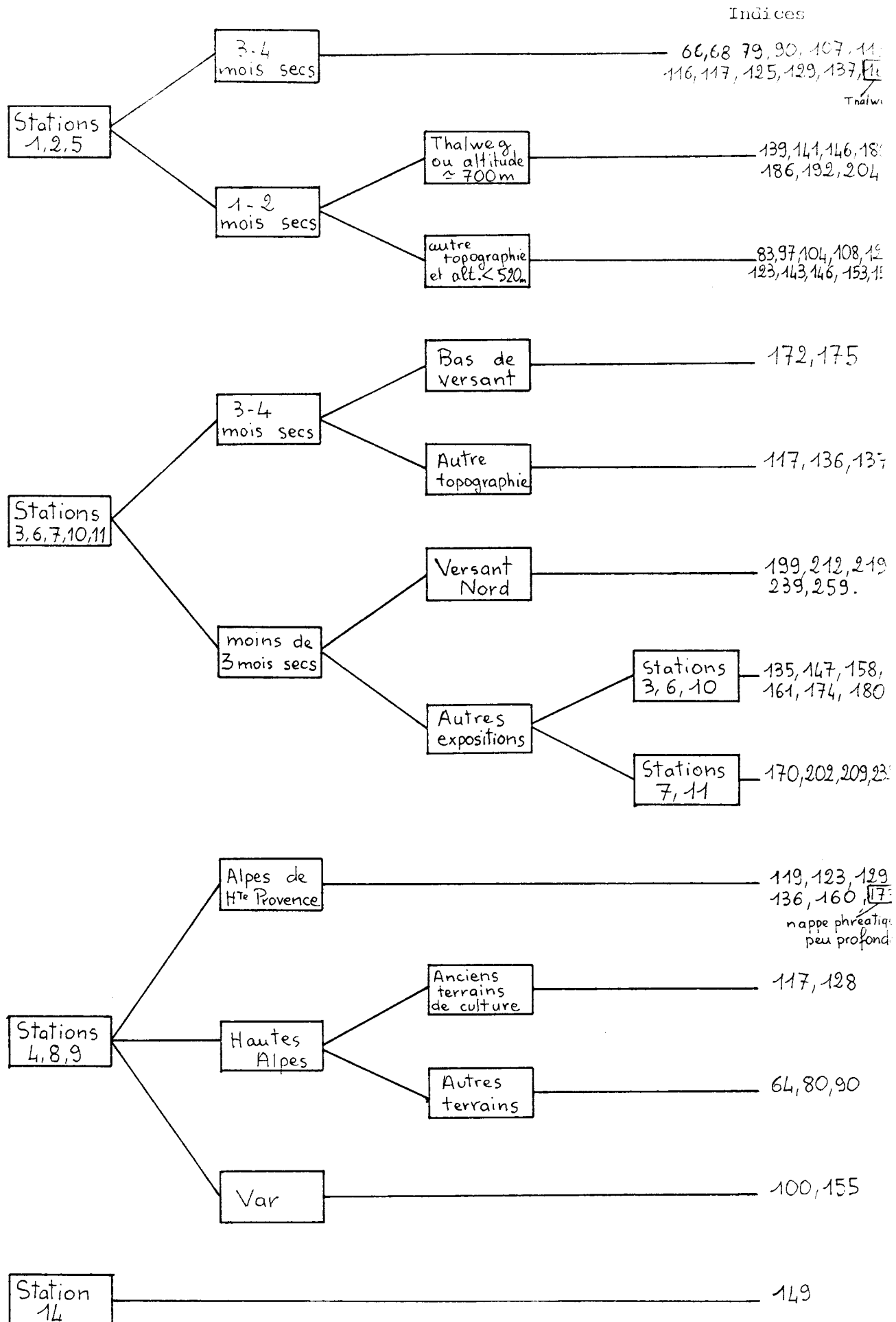


FIGURE N° 18

Groupes floristiques	Altitude (m)	Pluie moy. (mm)		Temp. moy. (°C)		nombre de mois secs	Substrat	Hauteur dominante des Sapins à 50 ans (en m)				Cas particuliers
		ann.	été	ann.	min mois le + froid			20 cm	40 cm	60 cm	Test tarière	
10 (7, 8, 11, 12)	400 1150	1000 2000			-3,5 +1	0	granite grès schiste gneiss			P : 17-24 m N : 19-26 m (1)	(1) Ancien terrain de culture P, N : 29-33 m	
7,9 (3, 8, 10, 12)	1000 1500 600 1000	750	160 240	7,5 12,5	-6 -0,5		calcaire dur marne conglom		P : 12-19 m (2)		(2) Dépôt glaciaire ou bas de versant N : 13-19 m	
7 (5, 8, 10)	500 1000		1050								C : 14-22 m (3)(4)	(3) Exposition autre que nord C : 6-12 m (4) Plus de 60 cm N : 16-18 m
6 (8)	50 600		80 100	13 14	+1	2	granite grès schiste gneiss		N : 15-18 m C : 11-17 m	N : 24 m C : 17-21 m		
4, 5, 7 (8)	100 350	600 900	100 130	11 14	0 +2				C : 14-21 m	N : 25-29 m C : 20-24 m		
2 (3, 5, 7, 8)	400 1000 150 600	800 1450	120 160	9,5 13	-3 +1	1 2	calcaire dur dolomie marne calcaires divers			C : 16-21 m N : 18-20 m		
12 (3, 7)	50 450	750	90 140	11 14	-2,5 +3	2 3			C : 9-16 m	C : 5-11 m	C : 12-14 m (6)	C : 14-18 m (6) Alluvions N : 12-15 m
									C : 4-10 m	C : 9-15 m		

P = Pectine
 N = Nordman
 C = Cephalonie

CHAPITRE V
AUTRES RESULTATS

Dans le présent chapitre, plus qualitatif, nous nous proposons d'examiner les comportements respectifs des différentes espèces lorsqu'elles se présentaient en mélange sur le terrain. Pour cela, nous allons nous intéresser à la hauteur, mais également à l'état sanitaire des arbres ainsi qu'à la régénération lorsqu'elle existait.

1. ETUDE DES PEUPLEMENTS MELANGES

. 1er cas : Forêt domaniale de Notre-Dame de Parlatges (34). Le boisement appartient à la station II définie précédemment, où le climat présente une sécheresse estivale encore importante, toutefois atténuée ici par des précipitations relativement importantes (plus de 1000 mm/an).

Il se situe à 450 m d'altitude, sur un replat en mi-versant à exposition Nord, le substrat est un calcaire marneux dur.

La plantation a été réalisée après sous-solage, quelques chênes pubescents clairsemés ont été conservés et constituent un abri lâche.

On trouve trois types de sapins en mélange :

- Nordmann,
- Céphalonie,
- hybride présentant des caractères fixes communs aux deux espèces précédentes.

Ces trois types sont très faciles à distinguer car il n'existe aucune forme intermédiaire.

Les arbres ont 17 ans, voici leur comportement respectif :

- Nordmann : 90 cm de hauteur moyenne. Le plus haut mesure 1,40 m. Il présente des signes de chlorose et a énormément de difficultés à croître.

- Céphalonie : 1,30 m de hauteur moyenne, 1,80 m pour le plus grand. Son état sanitaire est excellent, quoique sa croissance ne soit guère meilleure.

- hybride : son état sanitaire est très bon et sa croissance nettement meilleure que celle des précédents (2,10 m de hauteur moyenne, 3,20 m pour les plus grands).

Le même boisement se prolonge dans un vallon où l'alimentation en eau est meilleure. Le sapin de Céphalonie atteint 2,10 m de hauteur moyenne, l'hybride 2,70 m.

Ces résultats montrent la faiblesse du Nordmann en climat sec par rapport au Céphalonie.

L'hybride présente un comportement bien supérieur. Est-ce un effet de vigueur hybride ou bien allie-t-il à la fois la résistance à la sécheresse du Céphalonie et la vigueur du Nordmann ?

. 2ème cas : Forêt domaniale de Cadarache (13). Elle entre aussi dans la station II, mais dans un type de climat peut-être plus sec (pluviosité annuelle 650 mm/an), se situe à 300 m d'altitude sur alluvions et conglomérat calcaire.

De nombreuses espèces de sapins (dont le Concolor) sont introduites en mélange dans toute la forêt.

. 1er peuplement (56 ans) : Il est installé sur terrain plat à sol profond (80 cm) :

- Céphalonie : 13,70 m de hauteur dominante. L'état sanitaire est très bon.

- Nordmann : 13 m de hauteur dominante. Son état sanitaire, souvent moins bon(quoique correct dans l'ensemble), traduit quelques difficultés. Signalons la présence de régénération (moins de 1 m de hauteur) possédant les caractères du Céphalonie et non ceux du Nordmann.
- Concolor : 11 m. Il se montre inférieur aux sapins méditerranéens aussi bien pour la hauteur que pour le diamètre. L'état sanitaire est moyen à médiocre, par contre, les arbres sont moins branchus. La régénération est inexistante.

. 2ème peuplement : Mélange pied à pied de pinsapo et de Céphalonie. Il se situe en conditions plus fraîches que le précédent (vallon à proximité).

- Céphalonie : 14,20 m à 50 ans. La croissance en hauteur est excellente, l'état sanitaire aussi, mis à part quelques traces de gélivures.
- Pinsapo : 54 ans, 11,10 m. De nombreux arbres ne mesurent que 7-8 m. Leur état sanitaire est bon, ils paraissent simplement moins vigoureux. Ils sont plus branchus, en rapport avec une croissance moins rapide. Une régénération aux caractères hybrides se développe dans le vallon.

. 3ème peuplement : mélange pied à pied de Pinsapo et Concolor de 49 ans. Le pinsapo atteint 11 m de hauteur dominante et semble tout à fait bien. Sa régénération semble hybridée (avec du Céphalonie ?). Le Concolor mesure 9 m pour le même âge, son état sanitaire est moyen. Il ne se régénère pas. On note aussi la présence d'hybrides, difficilement identifiables, qui atteignent 15 m de hauteur dominante. Malgré une vigueur étonnante, leur état sanitaire est mauvais (houppier clair, branches mortes).

. 4ème peuplement (50 ans) : Il se situe lui aussi dans un vallon ; le sol est profond et frais. Le pinsapo atteint 12 m, le Nordmann 13 m, le Concolor 12 m. Tous poussent bien. Le Concolor est moins branchu et possède une meilleure forme que les sapins méditerranéens. La régénération est très rare.

Synthèse : Ces résultats traduisent la faiblesse du concolor par rapport aux autres sapins dès que les conditions deviennent difficiles (sécheresse). Sa vigueur certainement supérieure ainsi que sa meilleure forme ne peuvent s'exprimer que lorsque le contexte est favorable (vallon...) ; d'autre part, il ne se régénère pas.

En ce qui concerne les sapins méditerranéens, le Céphalonie se détache : c'est lui qui combine à la fois les plus grandes hauteurs, un bon état sanitaire et se régénère.

Le Pinsapo quant à lui a toujours montré un excellent état sanitaire, mais il semble pousser moins vite. Il se régénère assez bien dans l'ensemble.

Le Nordmann atteint ici des hauteurs comparables aux autres sapins méditerranéens.

Tous les peuplements de Cadarache se situent en conditions trop favorables pour pouvoir bien discriminer les espèces, en particulier, il serait intéressant de connaître les performances du Nordmann en conditions plus difficiles.

. 3ème cas : Régénération naturelle de Puech vert près de Nîmes. Ce peuplement, à 140 m d'altitude, est situé en station I. Il provient de la régénération de 3 semenciers difficilement identifiables, ayant colonisé le versant.

Le substrat est un calcaire dur, affleurant par endroits, il donne un sol superficiel et caillouteux (20 cm en profondeur).

La régénération se compose essentiellement d'hybrides. Nous avons distingué deux types de sapins :

- des "pinsapo"
- des hybrides non identifiés.

Ils ont été distingués d'après leurs caractères morphologiques très distincts, mais on ne sait pas si les "Pinsapo" ne sont pas hybridés aussi. On trouve tous les intermédiaires entre les deux types.

Le Pinsapo, à forme plutôt buissonnante, mesure 2 m de hauteur moyenne à 25 ans. Il montre quelques difficultés à pousser ; là où le sol est très superficiel, il a même tendance à dépérir.

Au même âge, les hybrides atteignent 4,30 m de hauteur moyenne. Leur état sanitaire est très moyen (signes de chlorose), mais ils font preuve d'une belle vigueur et donc possèdent une forme plus élancée. Certains fructifient déjà.

. 4ème cas : Il s'agit d'un boisement privé près des Verreries de Moussans (34). Il appartient à la station XI. Il est situé en bas de versant à 450 m d'altitude, sur schistes. Le climat est méditerranéo-atlantique, les précipitations sont importantes (1460 mm/an). La plantation a eu lieu sous un abri de châtaigniers, actuellement enlevé. On trouve mélangé pied à pied du Nordmann (60 %), du Céphalonie (30 %), du pinsapo (10 %).

Les arbres ont 26 ans. Le Nordmann atteint 10,90 m de hauteur dominante, le Céphalonie 9,60 m. Tous deux poussent très bien, mais le Céphalonie se montre tout de même inférieur au Nordmann en ce qui concerne la hauteur dominante. Signalons aussi que de nombreux sapins de Céphalonie ne mesurent que 2-3 m, ils sont actuellement complètement dominés par le Nordmann.

Le Pinsapo atteint 8,30 m seulement. Peu de plants arrivent à dominer, ils présentent un houppier très clair.

. Conclusion des 4 cas : Une partie des résultats précédents repose sur des observations visuelles ; les conclusions sont donc à manier avec prudence. D'autre part, la notion de provenance n'apparaît nulle part, ce qui constitue un biais important, notamment pour le Concolor, espèce à large répartition et qui possède peut-être des provenances beaucoup plus résistantes à la sécheresse que celles que nous avons mesurées.

Néanmoins, les résultats précédents se trouvent confirmés dans leur ensemble.

11. ETUDE SOMMAIRE DE LA REGENERATION

Le sapin pectiné a été exclu de ce paragraphe. En effet, nous avons surtout mesuré des peuplements naturels, donc déjà issus de régénération naturelle.

En ce qui concerne les autres sapins méditerranéens, ont été pris en compte seulement les peuplements âgés de plus de 40 ans. Tous les boisements portaient des cônes, sauf deux trop âgés (mais la présence de régénération témoignait qu'ils avaient fructifié).

La présence ou non de régénération est résumée dans les tableaux (page suivante). Ces tableaux font ressortir la faible capacité de régénération du Concolor alors que les sapins méditerranéens se régénèrent bien.

Notons que les 4 placettes où le Pinsapo ne se régénère pas sont situées en conditions très particulières : thalwegs très encaissés au bord de ruisseaux. Il doit s'agir de "trous à gelée", les arbres étant gélivés à chaque fois. D'autre part, dans trois cas sur quatre, la régénération, inexistante dans le thalweg, s'étendait par contre sur les versants, plus ensoleillés, et la quatrième fois, il se développait une régénération de sapin Pectiné (peut-être hybride) sous les Pinsapo.

Cela confirme le tempérament méditerranéen du Pinsapo qui exige une certaine chaleur pour bien se régénérer. Mis

à part ces 4 cas particuliers, le pinsapo s'est régénéré dans toutes les conditions, même les plus sèches. La régénération montre parfois des difficultés à s'installer mais est toujours présente.

Le sapin de Céphalonie montre à peu près le même tempérament. La seule placette sans régénération se situe près de Mende à 800 m d'altitude. Il est difficile de voir quelle espèce, du Céphalonie ou du Pinsap^o se régénère le mieux ; très souvent les deux espèces sont peu éloignées, donnant une régénération hybride.

Pour le Nordmann, le problème est tout à fait différent : il se régénère le mieux dans les zones les plus arrosées, voire les plus froides (versant Sud de l'Aigoual, région de Génolhac, Haut Languedoc).

En climat plus sec, les peuplements âgés et purs de Nordmann n'existent pas. Il est donc difficile de se faire une idée sur sa faculté de régénération en conditions plus sèches. Tout de même, lorsqu'il est en mélange avec d'autres sapins méditerranéens, les caractères "Nordmann" apparaissent très peu dans la régénération, hybride.

L'étude de la régénération n'a pas été menée plus loin, la méthode utilisée pour en rendre compte étant trop imprécise ; le problème de la position des semis vis à vis de la lumière n'est notamment pas du tout abordé ; en effet, les informations que nous possédons sont trop descriptives pour être réellement exploitables.

Une étude complète de la régénération des sapins méditerranéens se justifierait pleinement, la faculté de régénération étant l'un des critères les plus importants d'adaptation, surtout lorsqu'on connaît la difficulté à mettre en place un boisement en région méditerranéenne. Pour cela, il faudrait utiliser une méthode basée sur des critères plus objectifs (nombre de semis, hauteur et âge des semis, position par rapport à la lumière, aux semenciers...).

Espèce	Absence de régé- nération	Présence de régénération				
		Total	H ≤ 20 cm	20 cm < H ≤ 2 m	H > 2 m	
NORDMANN	2 (8 %)	22 (92 %)	absent	19 %	33 %	71 %
			rare	48 %	39 %	5 %
			fréquent	19 %	14 %	14 %
			abondant	24 %	14 %	10 %
CEPHALONIE	1 (5 %)	20 (95 %)	absent	0 %	21 %	42 %
			rare	63 %	16 %	16 %
			fréquent	11 %	21 %	26 %
			abondant	26 %	42 %	26 %
PINSAPO	4 (9 %)	41 (91 %)	absent	20 %	5 %	34 %
			rare	46 %	22 %	17 %
			fréquent	22 %	44 %	29 %
			abondant	12 %	29 %	20 %

Concolor (11 relevés)

Fructification		Régénération naturelle		
		H ≤ 20 cm	20 cm < H ≤ 2 m	H > 2 m
Absente	9 %	64 %	74 %	91 %
Rare	46 %	36 %	26 %	9 %
Fréquente	9 %	0 %	0 %	0 %
Abondante	36 %	0 %	0 %	0 %

CONCLUSION

Cette étude a permis de préciser les conditions de croissance des quatre espèces de sapins méditerranéens les plus courantes en région méditerranéenne française, à savoir :

- le sapin pectiné (races méridionales en particulier),
- le sapin de Nordmann,
- le sapin de Céphalonie,
- le sapin d'Espagne.

Elle a mis en évidence des exigences écologiques spécifiques avant tout d'ordre climatique, étant donnée l'extension de notre zone d'étude. Rappelons les principaux résultats.

Le sapin pectiné, un peu marginal dans ce travail a surtout été rencontré en peuplements naturels, il était donc toujours en accord avec les conditions climatiques. Il demande néanmoins une certaine fraîcheur qui ne peut lui être fournie que par l'altitude ou l'exposition (à moyenne altitude, il se limite exclusivement aux versants Nord). Il peut cependant descendre relativement bas en altitude, jusqu'à entrer en contact épisodiquement avec le chêne vert (exemple : près d'Axat dans l'Aude) ; il pousse alors difficilement, mais a le mérite d'exister. Sa présence dans notre zone

d'étude prouve qu'il a un rôle à jouer en région méditerranéenne, même s'il doit se limiter aux étages montagnards.

Le sapin de Nordmann exige pour atteindre son optimum de croissance une très forte pluviosité et une certaine fraîcheur. Ce fort besoin en eau explique en grande partie ses meilleures performances en Languedoc qu'en Provence. La différence de substrat explique peut-être le reste. Il représente certainement une essence d'avenir pour le Haut-Languedoc et les Cévennes, au même titre que le douglas ; son handicap par rapport à ce dernier réside dans sa croissance initiale lente. Il semble qu'il faille le limiter aux étages montagnards et subméditerranéens ; le faciès à châtaignier lui convient parfaitement.

En conditions plus sèches, où il a paru peiner, il est difficile de tirer des conclusions, ce pour deux raisons :

- il aurait été nécessaire de distinguer *Abies nordmanniana* d'*Abies bornmulleriana*, ce dernier résistant beaucoup mieux à la sécheresse (Descroix, 1981) ;
- la plupart des introductions sont encore trop jeunes (moins de 25 ans) pour se forger une opinion précise sur l'intérêt propre du sapin de Nordmann, ou s'il vaut mieux que le sapin de Céphalonie assure le relais.

En effet, le sapin de Grèce a montré un tempérament tout autre, avec des affinités méditerranéennes incontestables ; sa faculté à se régénérer le témoigne. D'autre part, il obtient ses meilleures croissances en climat comportant un ou deux mois biologiquement secs, qui combine à la fois son besoin en chaleur (il craint le froid, notamment les gelées tardives) et une sécheresse estivale encore modérée.

Quant à *Abies pinsapo*, il a montré d'étonnantes analogies avec le sapin de Grèce, notamment dans ses capacités à résister à la sécheresse et à se régénérer et sa sensibilité au froid. Le résultat peut paraître étonnant quand on sait que l'INRA lui a trouvé une résistance à la sécheresse tout à fait limitée. Si ses exigences écologiques se rapprochent de celles du sapin de Céphalonie, il fait preuve d'une vigueur inférieure (Descroix, 1981), d'une forme fo-

restière souvent défectueuse, et d'un mauvais élagage. Il faudra certainement le limiter à un rôle de protection, sa faculté à se régénérer abondamment le rendant très précieux dans ce cas. En ce qui concerne les facteurs édaphiques, les sapins se comportent bien sur tous les types de roche-mère, montrant peut-être une préférence pour les roches acides.

D'autre part, les sapins méditerranéens, quels qu'ils soient demandent une certaine pluviosité (au moins 800 mm par an) et un maximum de 2 mois secs pour croître convenablement. Passé ce cap, leur croissance, baisse rapidement. Les sapins méditerranéens paraissent donc incapables d'assurer à eux seuls la reconstitution d'une forêt stable et résistante à l'incendie dans la série du Pin d'Alep ; ils peuvent tout au plus, par leur présence sporadique, apporter un peu de variété au paysage.

Il existe néanmoins des chances d'améliorer leurs performances (celles du sapin de Céphalonie en particulier) grâce à la sélection des provenances les mieux adaptées à la sécheresse, l'INRA en a déjà isolé quelques-unes. Le comportement des hybrides mériterait aussi une étude approfondie, si l'on considère la variabilité génétique qu'ils présentent et les effets d'hétérosis toujours possibles.

Cette étude peut s'interpréter comme un premier bilan des introductions de sapins méditerranéens en France, encore peu nombreuses ou très jeunes. Elle n'a pas du tout abordé le problème de l'abri, pourtant fondamental en région méditerranéenne (nos relevés étaient trop peu détaillés pour pouvoir tirer des conclusions précises à ce sujet). Une étude sur le rôle de l'abri chez les jeunes sapins se justifierait entièrement.

Il reste aussi à étudier précisément la régénération naturelle, critère fondamental en région méditerranéenne lorsqu'on connaît la difficulté à implanter un boisement. Tout cela devrait apporter une meilleure connaissance sur les sapins méditerranéens, encore marginaux à l'heure actuelle par rapport au cèdre ou aux pins noirs. Ils ont pourtant un créneau à conquérir dans les basses montagnes du Sud de la France.

PRINCIPAUX OUVRAGES CONSULTÉS

- AKMAN, Y., BARBERO, M., QUEZEL, P., 1979, Contribution à l'étude de la végétation forestière d'Anatolie Méditerranéenne, Phytocoenologia, 5(2), pp. 189-276.
- ARBEZ, M., Etude des provenances de sapins de Nordmann, Annales des Sciences forestières, 1967, 16 (2), pp. 121-139.
- ARBEZ, M., Répartition, écologie et variabilité des sapins de Turquie du Nord, Annales des sciences forestières, 1969, 24(2), pp. 257-284.
- ARBEZ, M., Variabilité intraspécifique du sapin Pectiné, Annales des sciences forestières, 1969, 26 (4), pp. 475-509.
- BARBERO, M., QUEZEL, P., Les forêts de sapins sur le pourtour méditerranéen, 1975, Inst. Bot. Antonio José Cavanilles, XXXII, II, pp. 1245-1269.
- BARTET, J.-H., BOLLIET, R., Méthode utilisée pour la construction des tables de production à sylviculture variable, Section Technique de l'ONF, Document, n° 76-9.
- BAUMER, M., Le sapin du Maroc, Revue forestière française, 1977, pp. 343-354.
- BOUVET, J.-Y., Le cyprès vert en zone méditerranéenne française. Etude écologique et perspectives d'utilisation, CEMAGREF PFCI, Mémoire ENITEF, 1982.
- CEMAGREF-Grenoble, Information technique pour la surveillance et la protection phytosanitaire de la forêt, tomes I et II (1973 et 1975).

- DEBAZAC, E.-F., Manuel des conifères, 1964, pp. 19-49.
- DEBAZAC, E.-F., Nouvelles observations sur le débourrement et la croissance en longueur de quelques sapins, Revue forestière française, 1967, pp. 183-190.
- DEBLAIZE, M., Etudes préliminaires à l'aménagement de la forêt domaniale de Valbonne (Gard), Mémoire ENITEF, 1979.
- DESCROIX, L., Variabilité génétique du sapin de Grèce et du sapin de Nordmann, Etude comparée de leur comportement hydrique avec le cèdre de l'Atlas, Mémoire ENITEF, 1981.
- FONTNOIRE, J., Le sapin pectiné, Forêt privée, 1974, 98.
- I.D.F., Sapin de Nordmann, Bulletin de vulgarisation forestière, n° 66/10, décembre 1966.
- MAKRIS, C., Les types de forêts d'Abies Cephalonica et leur production, Thèse Faculté de Sciences, Nancy, 1960.
- OTTORINI, J.-M., NYS, C., Application des données de l'inventaire forestier national à l'étude de la production du pin sylvestre en Margeride, Etude de la croissance en hauteur, Annales des sciences forestières, 1981, 38 (2), pp. 223-236.
- PAULY, D., Aperçu sur l'écologie du sapin de Céphalonie et de ses hybrides, Revue forestière française, 1962, pp. 755-769.
- PRIOTON, J., Plaidoyer pour le sapin d'Espagne, Revue forestière française, 1964, pp. 99-114.
- QUEZEL, P., 1974, Conifères du pourtour méditerranéen.
- REVOLLON, P., Les stations à peupliers sur plateaux dans l'Est du Bassin Parisien, Mémoire ENITEF, 1984.

ANNEXES

- ANNEXE 1 : Données climatiques sur les sapins de Turquie du Nord
- ANNEXE 2 : Données climatiques sur le sapin du Maroc
- ANNEXE 3 : Répartition d'Abies Cephalonica et Abies Borisii-regis en Grèce
- ANNEXE 4 : Fiche de relevés et manuel de codification
- ANNEXE 5 : Répartition de l'indice en fonction des espèces
- ANNEXE 6 : Répartition des textures et réaction HCl en fonction des roches-mères
- ANNEXE 7 : Tableau croisé stations-texture
- ANNEXE 8 : Tableau croisé stations-réaction HCl
- ANNEXE 9 : Répartition des pourcentages de cailloux dans le sol par station
- ANNEXE 10 : Répartition des roches-mères en fonction des stations
- ANNEXE 11 : Répartition de l'indice en fonction des stations
- ANNEXE 12 : Comparaison de l'hybride Nordmann Pectiné avec le Nordmann et le Pectiné
- ANNEXE 13 : Calculs de l'information mutuelle
- ANNEXE 14 : Méthode de segmentation
- ANNEXE 15 : Climagramme d'EMBERGER

Données climatiques sur la Turquie du Nord (extrait de Arbez, 1969)

En l'absence de données climatologiques proprement forestières, les renseignements aimablement communiqués par le Service de la Météorologie nationale à Ankara permettent seulement de mettre en évidence les différences climatiques importantes qui existent entre les grands secteurs de l'aire de répartition naturelle. Les valeurs des paramètres cités devraient être corrigées en fonction de l'altitude des forêts et de leur influence climatique propre (augmentation des précipitations et atténuation des écarts de température).

3.21. — *Température*

— Sur la côte, la température moyenne annuelle est voisine de 14 °C, elle augmente légèrement à l'extrême est (Hopa) comme à l'extrême ouest (Çanakkale) tandis que les minimums absolus diminuent assez régulièrement d'est en ouest. Le climat est plus doux et les écarts de température moins accentués dans la partie extrême orientale de la mer Noire (Hopa). Les dernières gelées surviennent généralement en avril (ou même mars).

— La continentalité se traduit par une diminution rapide de la température moyenne annuelle et des minimums absolus :

Kastamonu : alt. 800 m, t. moy. 9,8 °C, mini. absolu -27 °C.

Les dernières gelées surviennent en mai.

3.22. — *Précipitations*

— Dans la zone côtière, la pluviométrie moyenne annuelle diminue schématiquement d'est en ouest.

Très forte dans la zone extrême orientale, la pluviométrie diminue ensuite pour accuser un deuxième maximum moins important dans la zone centrale et fléchir nettement plus à l'ouest :

Hopa (2 077 mm), Cide (1 221 mm), Canakkale (627 mm).

Abies nordmanniana et *Abies bornmulleriana* ont trouvé leur optimum de végétation et leur extension maximum (nombre et étendue des peuplements) dans les deux secteurs les plus arrosés : les secteurs extrêmes oriental et central. La zone de séparation entre les deux espèces, large d'environ 300 km, correspond précisément à l'abaissement de la chaîne côtière et à la diminution des précipitations annuelles.

Le régime des précipitations est caractérisé par un maximum de saison froide et un minimum de printemps (mai). Dans la zone extrême occidentale, le minimum est atteint en été. Sauf dans cette zone où la saison sèche est plus marquée, les précipitations du mois le plus sec sont toujours supérieures à 30 mm. Dans le secteur extrême oriental, la sécheresse estivale est biologiquement inexistante et les chutes de neige sont beaucoup plus abondantes (sans être cependant plus fréquentes).

Annexe n° 1 (suite)

— En l'absence de vallée importante favorisant la pénétration des influences maritimes*, l'action de la continentalité sur le climat des stations intérieures est accentuée par l'orientation et l'altitude des chaînes côtières. Elle se traduit par une diminution rapide des précipitations totales,

Giresun (alt. 33 m) côte de la mer Noire = 1 300 mm ;

Sebinkarahisar (alt. 1 300 m) 70 km au sud = 570 mm

et l'inversion de leur régime : maximum de printemps (mai) et minimum d'été très accusé (précipitations inférieures à 20 mm en août). Les peuplements de la zone occidentale ne subissent pratiquement pas l'influence de la continentalité (maximum de saison froide).

Altitude mise à part, le gradient de différenciation climatique qui se manifeste du nord au sud sous l'influence croissante de la continentalité semble prépondérant. Le gradient est d'autant plus rapide que la chaîne côtière est plus élevée et continue.

Comparée à l'étalement des aires de répartition d'est en ouest (1 400 km) les différences climatiques dans ce sens apparaissent relativement modestes : la mer Noire est un puissant facteur d'uniformisation. Seuls les secteurs extrême occidental (influences méditerranéennes) et extrême oriental sont franchement différenciés.

Le tableau I donne de plus amples détails sur la variabilité des conditions climatiques.

Il est plus difficile de préciser les conditions climatiques propres aux forêts des différentes régions. Partant des renseignements des stations météorologiques les plus proches et des lois de variation moyennes de la température et des précipitations avec l'altitude, on peut obtenir une *estimation* -approchée des conditions qui règnent en *limite inférieure de végétation* :

Température : 7,5 à 10,5 °C.

Précipitations : 600 à 1 500 mm.

Indice d'aridité** : 30 à 75.

Par comparaison, rappelons les conclusions de ROL concernant les limites de distribution naturelle du Sapin pectiné en France :

Température : 8 °C.

Précipitations : 800 mm.

Indice d'aridité : 45.

* Dans la région d'Artvin, les influences maritimes qui empruntent la vallée de la Çoruh atténuent la continentalité du climat.

** L'indice d'aridité, défini par de MARTONNE, correspond à l'expression $I = \frac{P}{T+10}$ (P = précipitations moyennes annuelles en mm, T = température moyenne annuelle en °C).

Annexe n° 1 (suite)

Stations	Altitude (m.)	Provenances concernées	Moyenne des températures max. du mois le + chaud	Moyenne des températures min. du mois le + froid	Température moyenne an- nuelle (°C)	Pluviométrie moyenne an- nuelle (mm)	Mois où les précipita- tions sont infér. à 30mm	Hygrométrie moyenne
ARTVIN	597	ARDA (1600m)	27,1	0,2	12,7	654	8	65
SEBINKARAHISAR	1300	KARA I (1800m) KARA II (2000m)	-	-	-	568	7-8-9	-
AYANCIK	10	CANG (1200m)	-	-	-	1020	8	-
ARAC	650	ARAC (1500m)	27	- 5	10	510	7-8-9-10	70
BOLU	742	SE-YA (1500m)	27,2	-4,6	10,2	530	7-8-9	74
BEYPAZARI	682	KOKE (1300m)	-	-	-	380	7-8-9-10-11	-
BURSA	100	ULUD (1600m)	30,9	1,8	14,4	710	6-7-8	69
YENICE	275	KAZ-D (1300m)	-	-	-	950	7-8	-
DIKILI	2	KAZ-D (1300m)	30,8	4,1	16,4	670	5-6-7-8-9	68

RELEVES CLIMATIQUES DE STATIONS DE L'AIRE DES SAPINS DE TURQUIE
(in Arbez, 1969)

ANNEXE N° 2

Données climatiques sur le sapin du Maroc (extrait de Baumer, 1977)

CLIMATOLOGIE

En ce qui concerne la forêt de Talassentane, quatre postes météorologiques permettent de préciser son climat :

- la station de Talembote à 10 km au nord — nord-est de la forêt de Talassentane, à 500 m d'altitude ;
- la station de Chaouen à 10 km à l'est, à 280 m d'altitude, séparée de la forêt par les hauteurs du Jebel Tissouka ;
- la station de Bab Taza à 10 km au sud-est à 880 m d'altitude ;
- la station de Bab Tariouant à 18 km au sud-ouest à 1 425 m d'altitude.

Malheureusement ces stations sont soit installées depuis peu, quelques années seulement, soit irrégulièrement relevées. Les moyennes calculées avec l'ensemble des données relevées sont résumées dans le tableau ci-après (hauteur d'eau en millimètres) :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Talembote	122	108	110	63	36	11	1	1	12	66	119	176	825
Chaouen	160	142	144	82	48	14	1	1	15	77	156	232	1 072
Bab Taza	205	182	184	105	61	18	1	1	20	98	213	298	1 366
Bab Tariouant	161	172	188	148	96	19	3	3	27	104	172	245	1 338

A partir de ces données on peut estimer à au moins 1 500 mm le total moyen de pluies sur la forêt. Cependant sa topographie étant variée et grande son étendue, on doit distinguer des zones plus sèches (toute la 2^e série et les parcelles 14 à 22 de la 1^{re} série relativement protégées des pluies atlantiques, les fonds de vallées) et des zones où le total annuel doit approcher 2 000 mm (sommets au sud et à l'ouest de la 1^{re} série au-dessus de 1 800 m d'altitude).

Le nombre moyen de jours de pluie est de 78 à Bab Taza. Il y est tombé 1 120 mm en 20 jours en décembre 1968, 741 mm en 15 jours en 1955. En hiver, les travaux forestiers peuvent donc être arrêtés pendant une relativement longue période par de fortes pluies.

Au point de vue répartition, l'été peut être sec de juin à octobre mais c'est généralement juillet et août qui manquent le plus d'eau. La sécheresse estivale de la forêt est cependant moindre que pour les stations météorologiques du fait de son altitude, de ses nombreux versants nord, de ses profondes vallées encaissées, et enfin de la présence adoucissante de brises méditerranéennes. De plus, en août, les orages sont assez fréquents.

L'hiver, les plus fortes pluies tombent en général en décembre et diminuent ensuite jusqu'en mai. En janvier 1972 il est tombé à Chaouen 505 mm soit la moitié du total annuel. Enfin il peut y avoir de très fortes précipitations en avril-mai (600 mm en 1971 à Bab Taza) dues à la concordance de pluies méditerranéennes et atlantiques.

L'irrégularité interannuelle, constante des climats méditerranéens, se retrouve ici.

La neige recouvre la forêt de décembre à mars en général et l'on note une moyenne de 5 jours de chute à Bab Taza (à 880 m). Cependant en ce domaine aussi la durée de la couverture et son épaisseur sont très variables : la neige peut tenir jusqu'en mai.

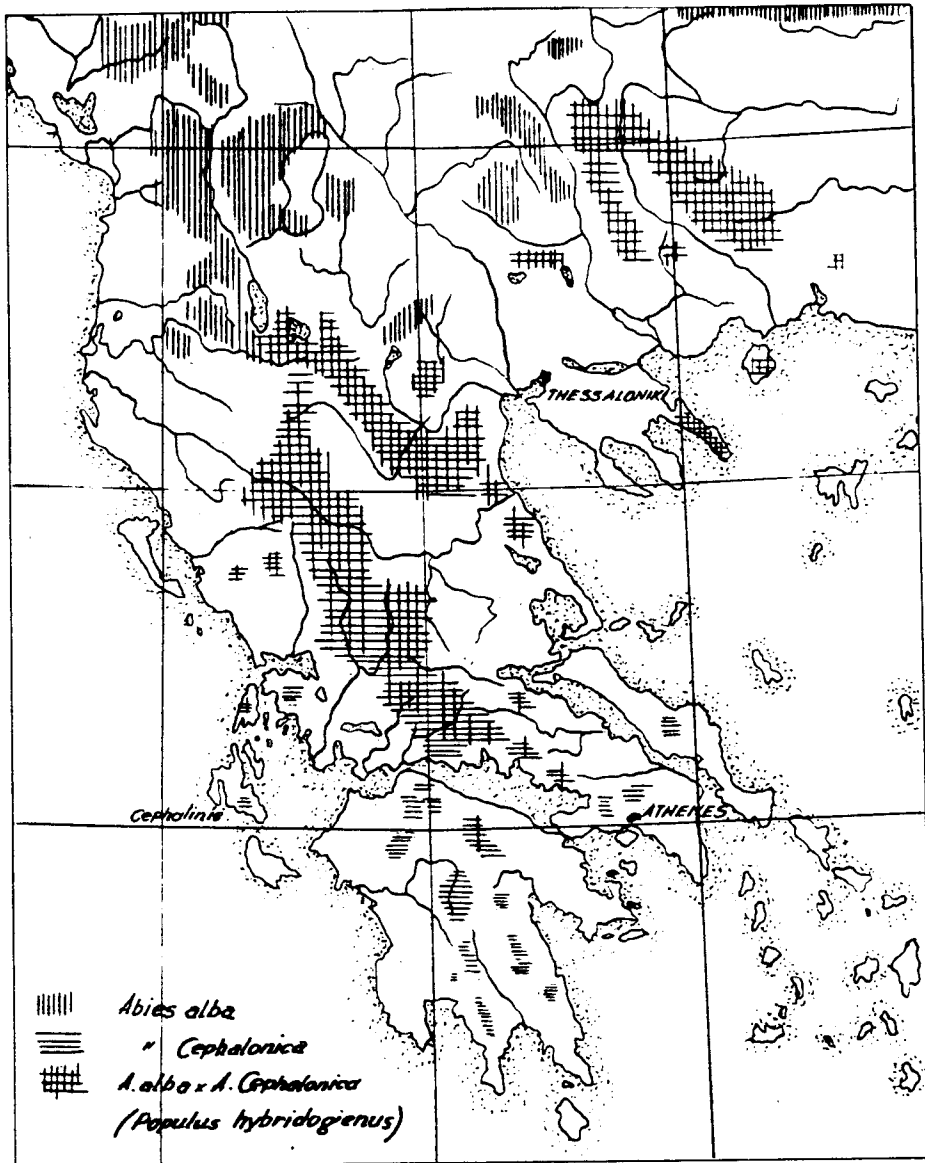
Les pistes sont donc impraticables durant environ quatre mois d'hiver. Elles doivent être dégagées tous les ans au mois de mars et d'éventuels orages en avril-mai peuvent à nouveau les bloquer. Les étés sont relativement frais mais souvent brumeux (ce qui n'est pas sans lien) et à Bab Taza même on note une moyenne annuelle de 17 jours de brouillard.

En ce qui concerne la température, la moyenne des minima de janvier est de 5,3 °C à Chaouen de 2,3 °C à Bab Taza. Cette moyenne y reste inférieure à 7 °C durant quatre mois. Cependant Emberger sur sa carte des moyennes des minima de janvier note une zone à moins de 0 °C sur la forêt de Talassentane. En fait, l'essentiel de la forêt peut être placé dans cette zone du fait de son altitude, mais certaines zones à exposition sud sont plus chaudes, toute la deuxième série en particulier. Les étés sont relativement peu chauds puisque l'on note une moyenne des maxima de juillet (mois le plus chaud) de 32,8 °C à Chaouen, 31,9 °C à Bab Taza ; le maximum extrême étant de 41 °C à Bab Taza.

Les indices pluviométriques d'Emberger sont de 127 pour Chaouen et 158 pour Bab Taza. On peut estimer pour la forêt de Talassentane des valeurs supérieures à 180. L'exposition et l'altitude jouent un rôle modificateur important.

Ainsi, la végétation de la forêt de Talassentane est arrêtée ou ralentie de décembre à mars, tandis que les travaux y sont quasiment impossibles du fait de la neige qui bloque les pistes. D'importants travaux d'entretien de l'infrastructure sont nécessaires tous les ans de mars à mai. L'été, le climat est frais et doux.

Répartition d'*Abies cephalonica* et *Abies Borisii-regis* en Grèce



(d'après Mattfeld et Bassiotis, in MAKRIS, 1960).

ANNEXE n° 4

Fiche de relevés et manuel de codification

LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA STATION

Le protocole d'étude est largement inspiré de celui de l'IFN et de celui de l'étude sur l'écologie du cyprès et du pin pignon.

1) Situation

Le numéro du département précède le numéro d'ordre de la placette.

. Le premier chiffre est

- 1 si la placette a été repérée à partir des données de l'IFN
- 2 si elle a été repérée autrement.

. Le lieu dit, la localisation et l'accès sont remplis de manière à ce que la placette puisse être retrouvée le plus facilement possible.

. Les régions IFN sont numérotées à l'intérieur de chaque département à l'aide du code IFN.

. La distance au littoral est mesurée sur la carte au 1/100 000 elle est exprimée en kilomètres.

. La latitude et la longitude sont également mesurées sur carte, et elles sont exprimées en grades.

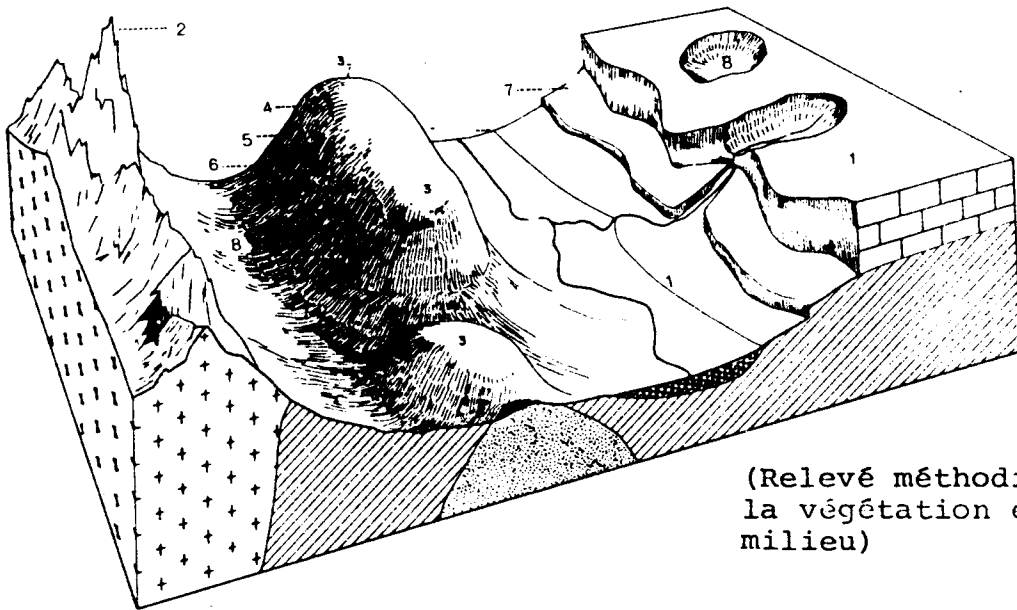
2) Station

. Altitude : elle est exprimée en m, et provient d'une extrapolation à partir des courbes de niveau de la carte IGN (1/100 000).

. Topographie : (voir également le schéma). On considère le relief moyen autour de la placette d'étude :

- (1) Plat : surface de pente inférieure à 3 % (plateau ou plaine)
- (4) (5) (6) Versant : surface de pente supérieure à 3 %. De haut en bas on distingue le haut de versant (4), la mi-versant (5), le bas de versant (6).
- (2) (3) Sommet (2) ou croupe (3) séparent 2 vallées ou thalwegs, ils diffèrent par leur forme plus ou moins aiguë
- (7) Replat : surface de pente faible séparant 2 versants à pente assez forte.

- (8) Dépression : Relief généralement concave, la dépression est souvent le fond d'un thalweg de dimension modeste.
- (9) Anciennes restanques.
Banquette artificielle située à flanc de versant, autrefois utilisée en agriculture.



(Relevé méthodique de la végétation et du milieu)

- . Exposition : Elle est notée à l'aide d'une boussole. Pour un terrain plat on code toutes expositions (9).
- . Pente : Elle est mesurée à l'aide d'un clisimètre sur une distance d'environ 50 m sur la ligne de plus grande pente traversant la placette d'étude.

3) Lithologie

- . Affleurement rocheux : C'est un affleurement de la roche-mère en place. Un pourcentage d'affleurement sur la placette est estimé à l'oeil.
- . Pendage des couches : Il est dit :
 - conforme s'il a le même sens que la pente du terrain,
 - inverse s'il a le sens contraire à celui de la pente du terrain,
 - parallèle s'il est intermédiaire.

Dans le cas d'un terrain plat, le pendage est conforme ou inverse suivant que les couches sont horizontales ou non.

- . Nature de la roche : Elle est relevée à partir des cartes géologiques au 1/50 000 ou 1/80 000 du BRGM et vérifiée sur le terrain.
- . Réaction de la roche-mère à l'acide chlorhydrique ; elle est effectuée à partir d'une solution décimormale.

4) Sol :

- . On appelle dépôt récent tout matériau transporté sur lequel on ne distingue pas de pédogénèse, ou sur lequel une partie de la pédogénèse est antérieure au transport.
 - . 5 sondages à la tarière à vis hélicoïdale de 3 cm de diamètre sont effectués au hasard sur la surface de la placette jusqu'à ne plus pouvoir s'enfoncer.
 - . On considèrera comme cailloux toutes les fractions minérales supérieures à 1 ou 2 cm.
- Les cailloux en affleurement désignent les cailloux en place et affleurants. L'estimation du pourcentage est faite à l'oeil sur toute la placette.
- Le pourcentage de cailloux dans le sol est apprécié dans un cube de 20 cm d'arête creusé à la pioche.
- Le pH et la texture sont pris sur le terrain, à 20 cm de profondeur.
- La réaction de la terre fine à HCl est faite également sur le terrain à l'aide d'une solution décimormale.

II. VEGETATION ENVIRONNANTE ET ACCOMPAGNATRICE

Le relevé des espèces est effectué à l'intérieur même du peuplement et ceci pour l'ensemble de la placette. On considère comme espèces dominantes les quelques espèces les plus abondantes sur la station.

Recouvrement :

- . La strate arborescente est constituée des végétaux ligneux de l'étage dominant.
 - . La strate arbustive est formée par les ligneux bas et les ligneux arborescents n'appartenant pas à l'étage dominant.
 - . La strate herbacée est constituée des végétaux non ligneux.
- Le recouvrement est estimé en 1/10.

Département : / N° d'ordre
Espèce ou hybride

1) OBSERVATIONS SUR LE PEUPELEMENT :

Surface d'extensior du boisement (en hectares et ares)
Recouvrement : strate arborescente/orbustive/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 (années)
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 NAT PELLE

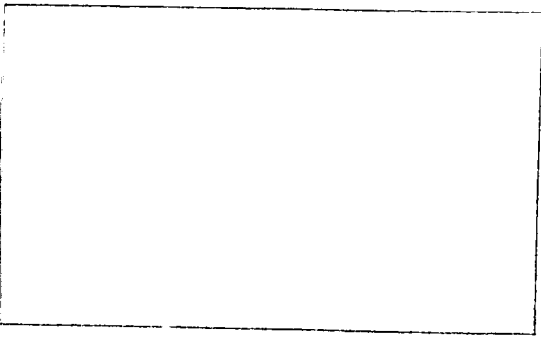
Semis : moins de 20 cm : absent (0) rare (1) fréquent (2) abondant (3)
de 20 à 200 cm : absent (0) rare (1) fréquent (2) abondant (3)
plus de 200 cm : absent (0) rare (1) fréquent (2) abondant (3)

3) PLANTATION RECENTE - TRAVAUX - MATERIEL VEGETAL

Antécédents culturels : terre de culture (1) lande (2) garrigue ou maquis (3) forêts (4) autres (5)
Mode plantation : en clair 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) petits piochés (2) labour en bande ou total (3) rotoage en ligne (4) rotoage défoncement total (5) banquettes sous-solées (6)
Mise en place : au coup de pioche (1) petit pioché (2) autres (3)
Matériel végétal : semis naturels (1) semis artificiels (2) plants RN 1 an (3) plants RN 2 ans et repiqués (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) / réclisisés pendant 1, 2, 3 ans et plus
Taux de reprise : (10) / Nombre de passages en rejaris :

OBSERVATIONS GENERALES (en clair)

État 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° 5

Nombre de placettes

10

5

15

10

5

15

10

5

15

10

5

15

10

5

15

10

5

Indice

50

70

90

110

130

150

170

190

210

230

250

270

290

310

330

350

Pectiné

Nordmann

Céphalonie

Pinsapo

Autres sapins
méditerranéens

Concolor

Répartition de l'indice en fonction des espèces

ANNEXE N° 6

Répartition des textures et réaction HCl en fonction des roches-mères

Roche-mère	Texture				Codes de réactions Hcl			
	Argile	Equi- librée	Limon	Sable	0	1	2	3
Granite		1	3	13	17			
Schistes	4	11	31	7	52			1
Micaschistes et gneiss	1	2	17	23	43			
Calcaire dur ou en plaquettes	37	32	13	7	11	24	15	39
Calcaire marneux marnes	32	10	5	3	12	2	10	16
Calcaire dolomitique	1	2	7		3	6	1	
Alluvions	7	7	4	1	3	1	1	14
Glaciaire	1	5	1		4		2	1
Conglomérat calcaire	1	5	4	7	4	1	1	11
Autres	8	1	5	12	15	2	2	6

Tableau croisé stations-texture

Texture Stations	Argile	Equilibrée	Limon	Sable
I	20 (111)	6 (112)	-	-
II	17 (132)	23 (130)	15 (145)	8 (103)
III	5 (199)	5 (162)	3 (191)	2 (188)
IV	2 (133)	1 (143)	4 (119)	-
V	1 (33)	4 (100)	3 (121)	-
VI	-	-	-	22
VII	4 (117)	8 (143)	2 (148)	1 (112)
VIII	26 (156)	8 (151)	6 (148)	5 (143)
IX	4 (110)	7 (155)	3 (154)	1 (132)
X	16 (189)	5 (212)	10 (249)	9 (203)
XI	-	7 (206)	11 (230)	7 (211)
XII	-	2 (237)	5 (208)	1 (124)
XIII	-	-	11 (223)	7 (202)
XIV	-	1 (247)	16 (241)	7 (168)

Dans chaque case figure en haut à gauche l'effectif et, entre parenthèses, la moyenne d'indices.

ANNEXE N° 8

Tableau croisé station-réaction HCl

Réaction HCl Station	Nulle	Légèrement audible	Audible peu visible	Forte
I	3 (90)	7 (123)	2 (135)	14 (107)
II	11 (157)	12 (116)	8 (138)	32 (126)
III	3 (205)	2 (168)	1 (167)	9 (179)
IV	-	5 (123)	1 (167)	1 (100)
V	7 (102)	-	-	1 (79)
VI	22	-	-	-
VII	3 (142)	3 (178)	1 (68)	8 (128)
VIII	5 (165)	4 (160)	10 (183)	26 (136)
IX	6 (168)	2 (129)	5 (119)	2 (124)
X	29 (216)	1 (346)	5 (200)	5 (162)
XI	25	-	-	-
XII	8	-	-	-
XIII	18	-	-	-
XIV	24	-	-	-

ANNEXE N° 9

Répartition des % de cailloux dans le sol par station

% cailloux Station	0-10 %	10-30 %	30-60 %	+ de 60 %
I	6 (121)	9 (127)	11 (93)	-
II	15 (140)	27 (134)	16 (114)	5 (139)
III	10 (182)	5 (187)	-	-
IV	1 (100)	2 (156)	4 (118)	-
V	-	5 (100)	3 (98)	-
VI	5 (193)	15 (191)	2 (46)	-
VII	4 (155)	6 (133)	5 (127)	-
VIII	7 (178)	19 (150)	15 (145)	4 (175)
IX	5 (157)	4 (125)	6 (137)	-
X	22 (211)	15 (220)	3 (162)	-
XI	10 (210)	13 (221)	2 (235)	
XII	1 (185)	5 (234)	2 (141)	-
XIII	12 (203)	6 (226)	-	-
XIV	10 (214)	14 (224)	-	-

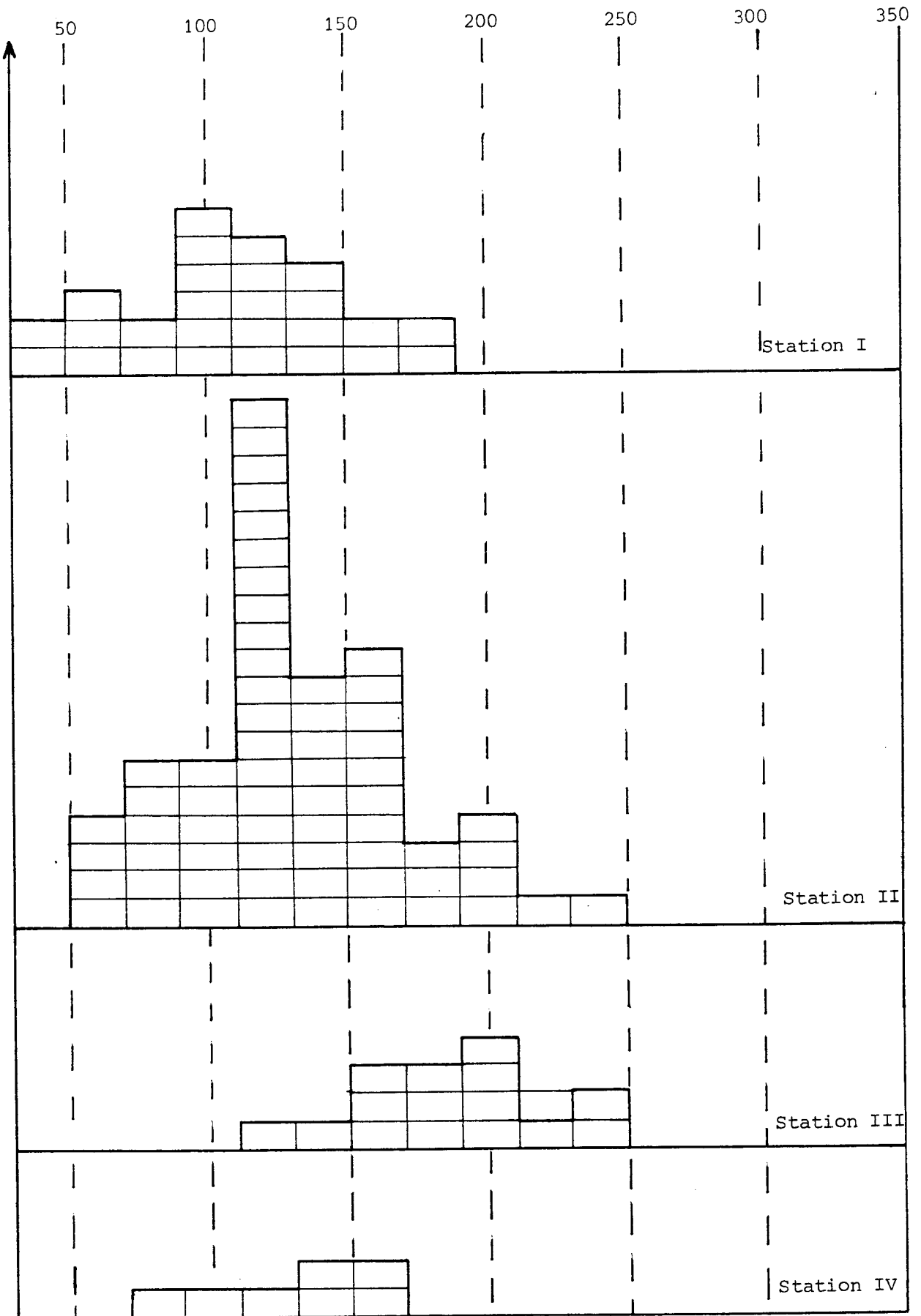
ANNEXE N° 10

Répartition des roches-mères en fonction des stations

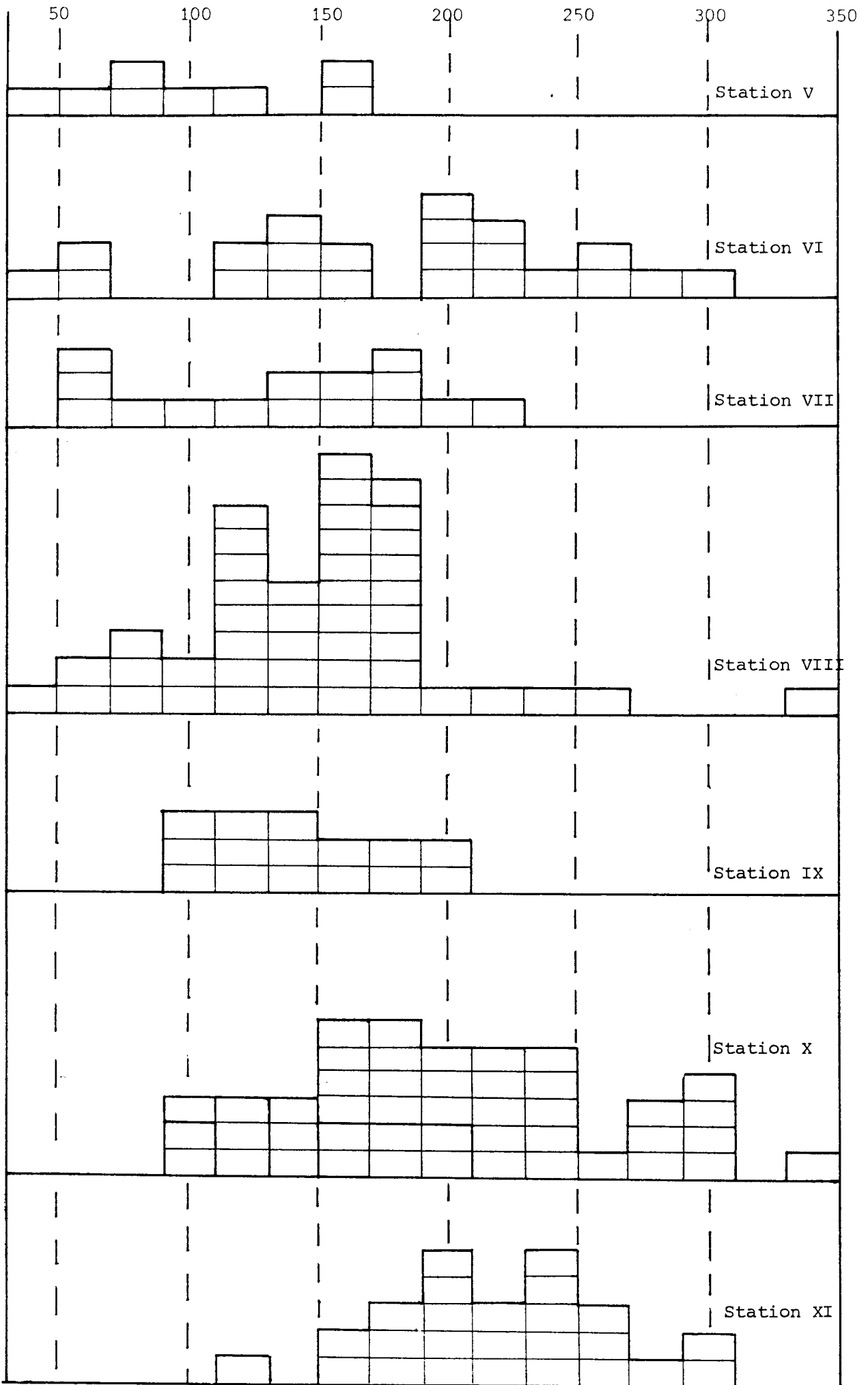
Roche mère Station	granite	calcaire dur ou en plaquettes	marno- calcaire	calcaire dolomi- tique	schistes	mica- schistes et gneiss	alluvions	glaciaire	conglo- méral calcaire
I		18	1		2		4		
II		36	5	3			6	1	10
III		8	1						
IV		2		5					
V		1	1		5				
VI	1					17			
VII		3	3	2			4		3
VIII		12	25				4	1	3
IX		4	6					5	
X	6	5	8		6	6	1		1
XI					13	8			
XII					8				
XIII	7				8	4			
XIV	3				10	8			

ANNEXE N° 11

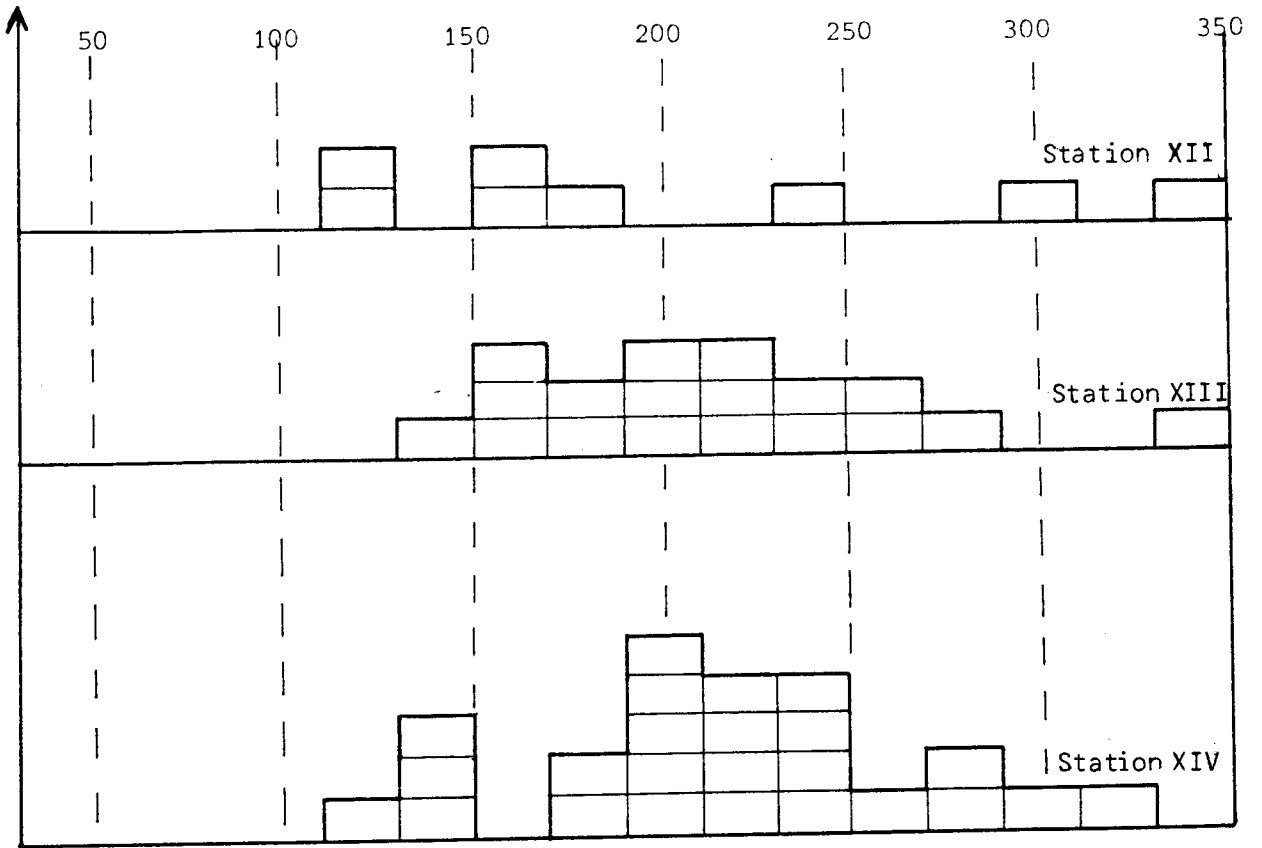
Répartition de l'indice en fonction des stations



Annexe n° 11 (suite)



ANNEXE n° 11 (suite)



Comparaison de l'hybride Nordmann x Pectiné avec le Nordmann et le Pectiné

Nous replaçons les 14 relevés d'hybrides dans les segmentations spécifiques du Pectiné et du Nordmann.

- Comparaison avec le Pectiné : (entre parenthèses sont notés les indices relatifs à l'hybride, et entre crochets les bornes de l'indice pour l'espèce considérée) :

. Stations 10, 11, 13, 14 :

- texture argileuse $m \leq 0$: (182, 254)/[150-198]
- texture limoneuse $m \leq 0$: (173, 233, 272)/[166-240]
- texture sableuse $Pl > 1000$: (189, 199, 201)/[165-186]

- Comparaison avec le Nordmann :

. Station 3 : (179)/(154-204)

. Stations 1, 2, 4, 5, 6 : P.sol < 40 cm (154, 156)/[68-143]

. Stations 10, 11, 12, 13, 14 :

- profondeur sol < 40 cm : $m \leq 0$. %C.Sol(10-60%) = (189,254)/[97-149]
- . %C.Sol(0-10%) = 182/[174-247]

- profondeur sol > 40 cm : $m < 0$. thalweg (254,272)/[222-267]

. non ancien terrain de culture
(174, 199,201,233)/[185-240]

$m > 0, Pl. > 1000$ mm

- thalweg : [272, 309)/[288-343]
- autres (199,201,269)/[185-287]

Conclusion : L'hybride semble en moyenne un peu meilleur que le Pectiné. Par contre, ses performances se rapprochent beaucoup de celles du Nordmann et ne montre pas de supériorité (sauf peut-être sur sols peu profonds).

LES PROFILS ECOLOGIQUES :

FREQUENCE CORRIGEE ET INFORMATION MUTUELLE

On considère les N placettes inventoriées se répartissant en

N_1 placettes de bonne croissance

N_2 placettes de croissance moyenne

N_3 placettes de mauvaise croissance

$$N_1 + N_2 + N_3 = N$$

L'espèce E est présente sur X placettes se répartissant en

X_1 placettes de bonne croissance

X_2 placettes de croissance moyenne

X_3 placettes de mauvaise croissance

$$X_1 + X_2 + X_3 = X$$

Fréquence corrigée :

On pourrait utiliser la fréquence relative d'apparition d'une espèce dans une classe (par exemple $\frac{X_1}{N_1}$). Mais cette méthode présente l'inconvénient de privilégier les espèces fortement représentées au détriment des espèces peu représentées même si elles sont absolument caractéristiques d'une classe de croissance. On pondère donc la fréquence relative ($\frac{X_1}{N_1}$) par l'inverse de la fréquence moyenne d'apparition de l'espèce sur l'ensemble des placettes ($\frac{N}{X}$).

La fréquence corrigée est donc définie par la formule $\frac{X_1}{N_1} \times \frac{N}{X}$.

Information mutuelle :

L'information mutuelle entre l'espèce et la croissance est définie par la formule

$$I M = \sum_1^3 \left[\frac{X_i}{N} \log_2 \left(\frac{X_i}{N_i} \times \frac{N}{X} \right) + \frac{N_i - X_i}{N} \log_2 \frac{N_i - X_i}{N_i} \times \frac{N}{N - X} \right]$$

La valeur de IM augmente lorsque la présence ou l'absence de E est corrélée aux classes de croissance.

Ainsi en utilisant la fréquence corrigée et l'information mutuelle on peut définir des espèces caractéristiques de la bonne ou la mauvaise croissance des sapins méditerranéens.

(Extrait de BOUVET J.Y. : Ecologie du cyprès vert en région méditerranéenne française. Publication CEMAGREF - 1983 - annexe 12).

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 $p_2=2$ %. On impose donc à la procédure B.S.S./T.S.S. > 2 %.

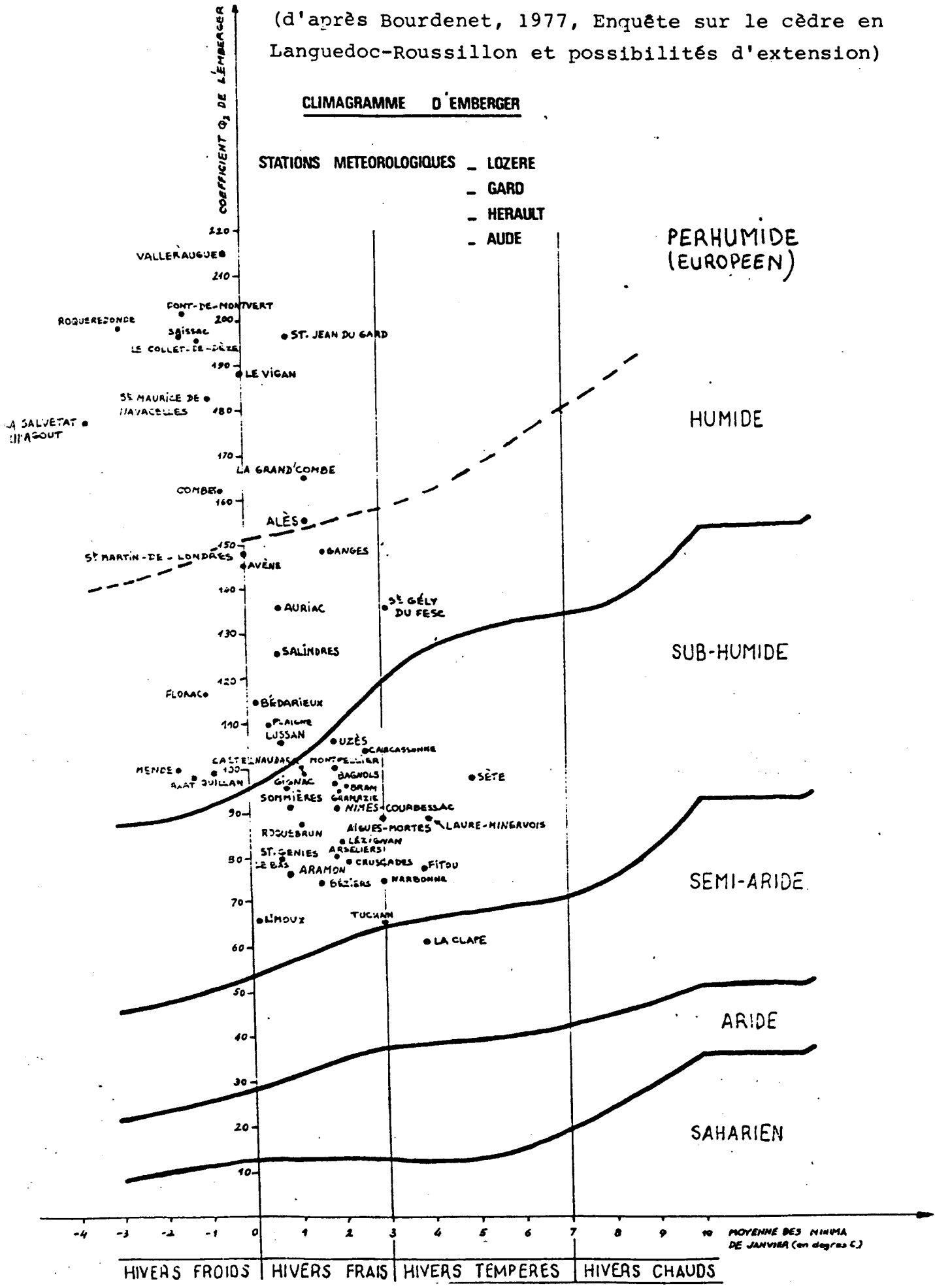
. Un groupe ne peut être créé que s'il renferme un nombre minimum de placettes (5 dans notre cas), et si la somme des H_i^2 de ce groupe est supérieure à un pourcentage p_1 de la somme de H_i^2 de la population de départ (nous avons choisi la valeur $p_1 = 1$ %).

(Extrait de DUCHE, Y., Etablissement de classes de croissance des peuplements de chêne pubescent en Provence, Publication CEMAGREF, 1983, annexe 12).

(d'après Bourdenet, 1977, Enquête sur le cèdre en Languedoc-Roussillon et possibilités d'extension)

CLIMAGRAMME D'EMBERGER

STATIONS METEOROLOGIQUES - LOZERE
 - GARD
 - HERAULT
 - AUDE



HIVERS FROIDS | HIVERS FRAIS | HIVERS TEMPÈRES | HIVERS CHAUDS