



MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

ÉCOLE NATIONALE
DES INGÉNIEURS DES TRAVAUX
DES EAUX ET FORÊTS

THEME GENERAL : Dendrologie - Autécologie - Forêt Méditerranéenne

ÉCOLOGIE ET CROISSANCE DU PIN DE SALZMANN EN FRANCE

MEMOIRE DE 3^{ème} ANNEE PRESENTE PAR

Catherine TANGHE

REALISE AU

CEMAGREF, Groupement d'Aix-en-Provence
Division Forêt Méditerranéenne
Le Tholonet, B.P. 31, 13612 AIX-EN-PROVENCE Cedex 1
Tél. : 42.66.93.10, Télécopie :42.66.88.65



CEMAGREF

AOÛT 1991

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

ECOLE NATIONALE
DES INGENIEURS DES TRAVAUX
DES EAUX ET FORETS

THEME GENERAL : Dendrologie - Autécologie - Forêt Méditerranéenne

**ECOLOGIE ET CROISSANCE
DU PIN DE SALZMANN
EN FRANCE**

MEMOIRE DE 3^{ème} ANNEE PRESENTE PAR

Catherine TANGHE

Jury présidé par :

M. QUEZEL

Jury composé de :

M. BENOIT de COIGNAC
M. COUHERT
M. GRANDJEAN
Mme BOISSEAU

REALISE AU

CEMAGREF, Groupement d'Aix-en-Provence
Division Forêt Méditerranéenne
Le Tholonet, B.P. 31, 13612 AIX-EN-PROVENCE Cedex 1
Tél. : 42.66.93.10, Télécopie :42.66.88.65

AOUT **1991**

AVANT PROPOS

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

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

Les observations de terrain ont été effectuées par :
Y. BERNIER, F. BINGELLI, L. GARDES, B. LEVOYER, D. NOUALS,
R. OSTERMEYER, C. RIPERT dans une première phase.
C. TANGHE et D. BEZON dans une deuxième phase.

La direction scientifique a été assurée par B. BOISSEAU.

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

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toute l'équipe de la division Forêt Méditerranéenne avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler, et plus particulièrement à Mme BOISSEAU, et MM. NOUALS et RIPERT, dont j'ai apprécié les conseils et la disponibilité.

A TOUS MERCI !

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1

I - PRESENTATION DE L'ESSENCE ETUDIEE

2

A. L'ESPECE COLLECTIVE PINUS NIGRA ARNOLD

2

1/ Caractères généraux

2

2/ Aire naturelle

2

3/ Classification

2

a) Sous-espèce clusiana

4

b) Sous-espèce laricio

4

c) Sous-espèce nigricans

4

d) Sous-espèce pallasiana

4

4/ Autres classifications

4

B. LA SOUS-ESPECE CLUSIANA CLEMENTE

4

1/ Morphologie - étude comparative

5

2/ Physiologie

7

a) Biologie florale

7

b) Germination

8

c) Enracinement

8

3/ Qualité du bois

8

4/ Pathologie

8

C. LE PIN DE SALZMANN EN FRANCE CONTINENTALE

11

1/ Aire naturelle

11

2/ Conditions écologiques des populations naturelles

11

a) Climat

11

b) Conditions lithologiques et édaphiques

13

c) Végétation

13

3/ Essais d'introduction

14

II - ACQUISITION DE DONNEES	17
A. METHODE	17
B. RELEVES AUTECOLOGIQUES	17
<u>1/ Observations notées sur le terrain</u>	18
<u>2/ Renseignements pris au bureau</u>	18
<u>3/ Localisation des peuplements mesurés</u>	18
<u>4/ Critique du protocole expérimental</u>	20
C. ANALYSES DE TIGES	20
III - MODELISATION DE LA CROISSANCE	21
<u>1/ Correction des données</u>	21
<u>2/ Modélisation et résultats</u>	21
IV - ANALYSE DES DONNEES	23
A. PRELIMINAIRE	23
<u>1/ Fiabilité de l'indice de fertilité</u>	23
<u>2/ Homogénéité des stations vis à vis de l'indice de fertilité</u>	23
<u>3/ Caractère équienné des peuplements mesurés</u>	25
<u>4/ Caractéristiques des données retenues</u>	25
B. ANALYSE DES DONNEES	28
<u>1/ Analyse de la flore</u>	28
a) <u>Par rapport au milieu</u>	28
- sur le fichier total	28
- sur des sous-fichiers	29
* Roche calcaire et dolomie	29
* Roche acide	36
- Groupes floristiques et fertilité du Pin de Salzmänn	42
* Analyse sur des sous-fichiers séparés	42
* Analyse sur le fichier total	43
b) <u>Par rapport à la fertilité du Pin de Salzmänn</u>	43
- AFC	43
- Information mutuelle	44

<u>2/ Analyse des facteurs écologiques</u>	47
a) <u>Facteurs envisagés isolément</u>	47
- Facteurs climatiques	47
- Facteurs régionaux	50
- Facteurs stationnels	51
- Facteurs lithologiques	52
- Facteurs édaphiques	54
- Facteurs humains	56
- Facteurs liés au peuplement	57
b) <u>Facteurs envisagés par couples</u>	60
c) <u>Facteurs envisagés simultanément</u>	61
- Par rapport au milieu	61
- Par rapport à la fertilité	62
. 1ère analyse sur variables globales	62
. 2ème analyse sur variables mixtes	70

V - VERS UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DES POTENTIALITES DU PIN DE SALZMANN	72
---	----

<u>1/ Essai de clé dichotomique</u>	72
<u>2/ Utilisation de la CAH de l'analyse des facteurs écologiques par rapport à la fertilité</u>	72
<u>3/ Utilisation des tableaux regroupant les cas écologiques</u>	73

CONCLUSION	84
-------------------	----

INTRODUCTION

Le Pin de Salzmann est une essence méditerranéenne qui a longtemps été ignorée, sans doute à cause de ses faibles performances dans son aire naturelle, qui de plus couvre moins de 2000 ha en France. Redécouverte depuis peu, cette essence a semblé intéressante pour le reboiseur. Il convenait donc de mieux connaître ses potentialités.

C'est dans ce but que nous avons entrepris cette étude qui, à partir des peuplements naturels ou artificiels, a tenté de caractériser la croissance et l'écologie de ce Pin dans la région méditerranéenne française.

Dans une première partie sont rassemblés des renseignements généraux ainsi que la place de cette essence dans la classification.

En second lieu, nous avons exposé la méthode utilisée et les campagnes de mesures entreprises.

Après une phase de modélisation de croissance, nous avons successivement analysé la répartition des espèces accompagnatrices, puis l'importance des variables écologiques vis à vis du milieu et de la croissance.

En dernier lieu, nous proposons une succession de "cas écologiques" pour lesquels la croissance est relativement bien connue.

I - PRESENTATION DE L'ESSENCE ETUDIEE

HISTORIQUE

Vers 1810, M. Salzmänn, botaniste allemand résidant à Montpellier, remarqua que le massif de St Guilhem-le-Désert était constitué d'une espèce de Pin non répertoriée. Il lui donna le nom de *Pinus monspelliensis*.

En 1851 un français, M. Dunal, publia une description détaillée de cette espèce, qu'il nomma *Pinus Salzmanni* en mémoire de celui qui l'avait remarquée pour la première fois.

Depuis, le Pin de Salzmänn a été rattaché à l'espèce collective circumméditerranéenne *Pinus nigra* Arnold (1875).

A. L'ESPECE COLLECTIVE PINUS NIGRA ARNOLD (1785)

On retiendra ici la classification du Yougoslave Fukarek (1958) qui tient essentiellement compte des aires de répartition.

1/ Caractères généraux (d'après Debazac)

Les essences regroupées sous cette espèce ont pour caractères communs :

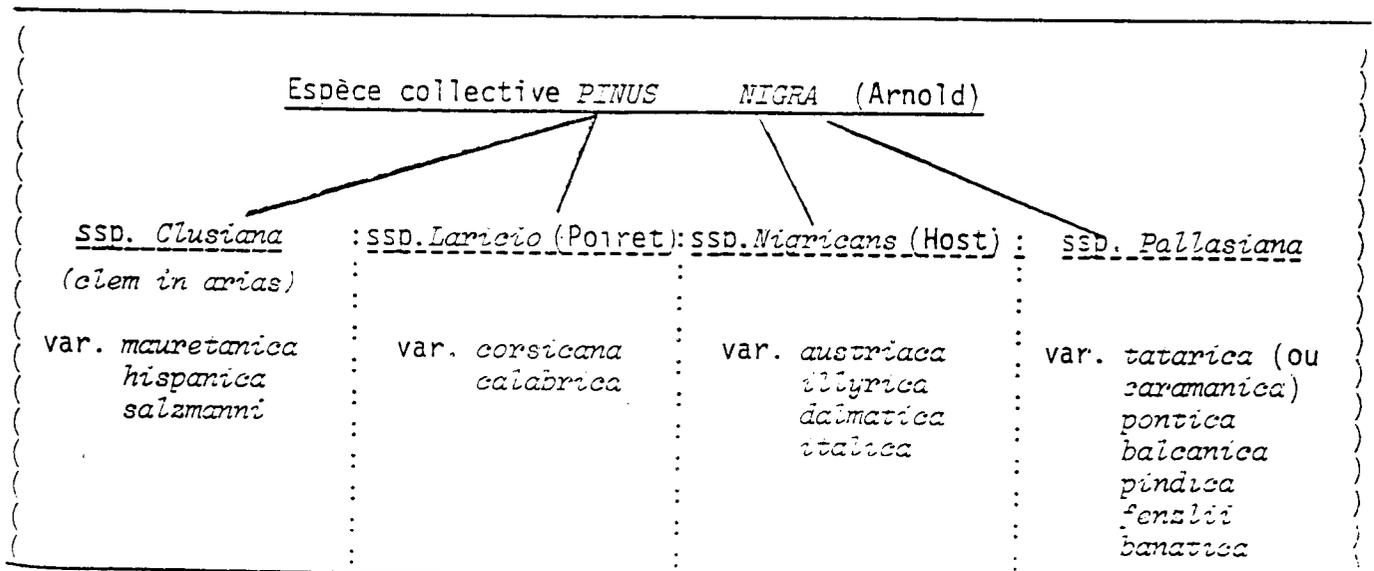
- tige droite, à rhytidome d'abord écaillé, brun grisâtre, puis crevassé, enfin divisé en grandes plaques grisâtres sur les sujets âgés;
- aiguilles fasciculées par 2, de 8 à 18 cm de longueur;
- bourgeon ovoïde pointu, à écailles plus ou moins apprimées, un peu résineux;
- cônelet ovoïde, dressé sur un pédoncule au plus aussi long que lui ;
cône ovoïde conique, de 4 à 8 cm de long à écusson d'un brun clair luisant,
- plantule de 6 à 10 cotylédons.

2/ Aire naturelle (voir carte n° 1, page suivante)

L'aire naturelle des Pins noirs se répartit d'une façon discontinue dans toute la partie nord du pourtour méditerranéen, ainsi qu'en quelques stations d'Afrique du Nord. Il s'agirait d'un faciès de régression d'une aire autrefois plus vaste.

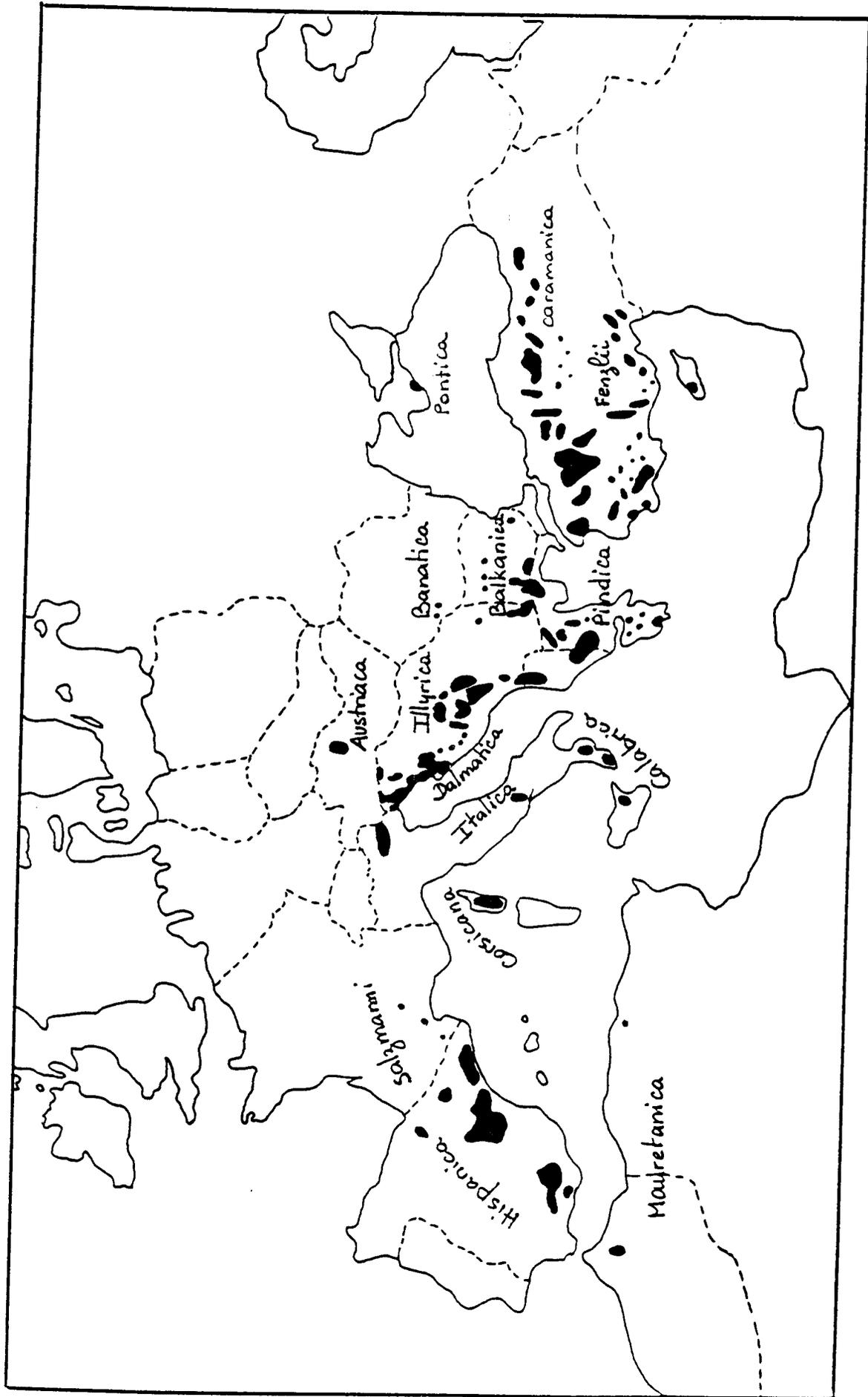
3/ Classification de Fukarek

Fukarek a distingué 4 sous-espèces à partir des différentes formes géographiques.



AIRE NATURELLE DE L'ESPECE COLLECTIVE PINUS NIGRA ARN.

Localisation des variétés (d'après Critchfield et Little)



a) *Sous-espèce Clusiana Clemente ex Arias 1818*

Elle regroupe les formes de la partie occidentale et méridionale de l'aire (Afrique du Nord, Espagne et France du Sud).

- La forme d'Afrique du Nord (*Pinus mauretunica* Maire. et Peyer.) présente une aire réduite à quelques stations dans le Djurjura en Algérie (1450 à 1600 m d'altitude) et dans une partie du Rif occidental au Maroc (1400 à 1800 m d'altitude).
- En Espagne, l'aire, plus vaste, comprend une région dans le Centre Est et le Sud Est du pays (Cuenca Teruel, Nouvelle Castille, Province de JAEN), où les peuplements se situent à des altitudes variant de 1300 à 2000 m (forme décrite sous le nom de *Pinus hispanica* Cook, à intérêt forestier majeur) et une région dans le Nord du pays (Province d'Avila, Soria, Burgos) ainsi que dans les Pyrénées, dont les peuplements sont plus morcelés.
- En France, l'aire naturelle est réduite à des peuplements plus ou moins isolés dans le Conflent (Prades), les Cévennes (Col d'Uglas et Bessèges au nord du Gard) et dans l'Hérault (Carlencas et Levas, St Guilhem-le-désert).

b) *Sous-espèce laricio Poiret (1804)*

Elle est constituée de deux formes géographiques :

- le Pin laricio de Corse (var. *corsicana*),
- le Pin laricio de Calabre (var. *calabrica*).

c) *Sous-espèce nigra (Flora europaea)*

On rattache à cette sous-espèce les formes d'Autriche (var *austriaca*), de Yougoslavie (ssp. *illyrica* Vidakovic en Bosnie, ssp. *dalmatica* visiani, en Dalmatie) et d'Italie (ssp. *italica* Hochstaler, dans les Abruzzes).

d) *sous-espèce Pallasiana Lamb. (1824)*

Elle comprend les formes de la partie orientale de l'aire :

- . Crimée (var. *pontica* Koch - *taurica* Hort.),
- . Anatolie (var. *caramanica* Loud.),
- . Taurus (Fenzlii Ant. et Ky.),
- . Grèce (ssp. *pindica* Formanek).

4/ Autres classifications

Cf. Annexe n° 1.

B. LA SOUS-ESPECE CLUSIANA

On s'intéressera dans ce chapitre aux seules formes d'Espagne et de France, qu'on appellera globalement Pin de Salzmann.

1/Morphologie

- RHYTIDOME** Epais et profondément gerçuré, tel celui des laricios, il est d'un gris brunâtre en surface, d'un brun rougeâtre dans les fentes. Les écailles auraient tendance à s'éclaircir dans la vieillesse, pour prendre une couleur blanchâtre (Dunal 1851, Calas 1899).
- INSERTION DES BRANCHES** D'après Romant-Amat (1984), l'angle d'insertion de la plus longue branche est particulièrement faible chez ce Pin, ce qui constituerait un critère de distinction par rapport aux autres sous-espèces de l'espèce *Pinus nigra* Arnold.
Cela expliquerait le port "en boule" de l'arbre.
- RAMEAUX** Ils présentent à leur base une partie dépourvue d'aiguilles pouvant couvrir le tiers de leur longueur. Cette caractéristique serait due à la chute rapide des aiguilles adultes, ajoutée à l'avortement de plusieurs aiguilles (Nègre, 1921). Leur couleur va du brun orangé au jaune vernissé brillant.
Ces caractères sont d'autant plus faciles à observer que la longueur du rameau est importante.
- AIGUILLES** Fasciculées par deux, longues de 10 à 20 cm, larges d'1,5 mm. Leur longueur semble en rapport avec la vitalité des arbres (Calas 1899, Nègre 1921).
Elles sont droites, fines et souples, peu piquantes ; leur couleur varie du vert clair au vert franc. Elles tombent dès la 3^e ou la 4^e année.
Leurs dispositions sur le rameau rappelle fréquemment la forme d'un pinceau.
- CONES** Longs de 5 à 8 cm, courtement pédonculés, ils présentent chacun 100 à 110 écailles dont les écussons sont peu renflés et divisés par une carène transversale nette ; l'ombilic central est parfois mucroné (Nègre, 1921).
Ils sont rouges la 1^e année, verts clairs tâchés de roux sur chaque écaille la 2^e année, roux fauve clair luisant la 3^e année, à maturité (la maturation dure 20 mois). Ils prennent parfois une forme en "corne de boeuf" (cette déformation est due à l'attaque d'un microlépidoptère).

En France, le Pin de Salzmann peut être confondu avec 2 autres sous-espèces de Pin noir : le Pin laricio de Corse et le Pin noir d'Autriche. La distinction "sur le terrain" peut se faire grâce aux caractéristiques rassemblées dans le tableau n° 1 :

Pratiquement, il est très difficile de se prononcer avec certitude dès que les arbres dépassent une certaine hauteur, rendant l'observation des rameaux peu précise. De plus, dans les zones où deux sous-espèces sont présentes, l'apparition d'hybrides rend la détermination encore plus risquée.

On possède néanmoins quelques moyens de décision fiables, nécessitant une étude d'échantillons en laboratoire :

Tableau n° 1

LES DISTINCTIONS PAR RAPPORT AUX DIFFERENTES SOUS-ESPECES

	Pin noir d'Autriche	Pin laricio de Corse	Pin de Salzman
Rameaux	zone dénudée très réduite ou nulle Couleur orange clair	zone dénudée peu importante couleur ocre	zone dénudée très nette couleur orange vif
Aiguilles	8 à 14 cm rigides droites piquantes vert sombre	12 à 15 cm souples droites ou souvent frisées non piquantes vert clair bleuté	10 à 18 cm souples droites peu piquantes vert clair
Rhytidome	écailleux grisâtre, puis profondément crevassé	écailleux gris brunâtre	écailleux grisâtre
Port	tronc très droit cime dense ramification latérale forte	tronc très droit ramifications latérales fines	tronc droit, ou peu sinueux à la base ramifications latérales fines insertion en biseau
Cônes	sessiles ombilic proéminent et mucroné	très courtement pédonculés ombilic déprimé sur les écailles de la base, fai- blement mucroné sur celle du sommet	courtement pédonculés ombilic arrondi, ceux du sommet mucronés
Bourgeon	ovoïde pointu	ovoïde brusquement rétréci en pointe aiguë peu résineux	ovoïde brusquement rétréci au sommet pointu, traces de résine

DIFFERENCES SUR AIGUILLES

* ARBEZ et MILLIER ont montré qu'il existe des différences mesurables entre les aiguilles des différentes sous-espèces de *Pinus nigra*

VARIABILITE MORPHOLOGIQUE DE «PINUS NIGRA» ARN.

Description récapitulative des sous-espèces (1)
Ann. Sci. Forestière 1971, 28 (1). 29.49

Groupe	Clusiana	Laricio		Nigricans	Pallasiana
		Corse	Calabre		
Caractère					
1- Longueur	+++++	+++	+++	+	++
3- Largeur	+	+++++	+++	+++	+++++
5- Courbure (2)	+++	+++++	+++++	+	+++
7- Nombre des courbures	+++	+++++	+++	+	+
8- Nombre des torsions	+++	+++++	+++	+	+
9- Nombre des lignes de stomates	+	+++	+++	+++++	+++++
10- Densité des stomates sur une ligne	+++	+++++	+++++	+	++
12- Densité des denticulations	+	+++++	+++++	+	++

(1) Le nombre de signes + est proportionnel à la valeur du caractère.

(2) La courbure se définit comme l'inverse du rayon de courbure.

* SALVADOR (1931) affirmait que les aiguilles du Pin de Salzmann contenaient en moyenne plus de canaux résinifères que celles du Pin laricio de Corse (10 à 14 contre 7).

DIFFERENCE BIOCHIMIQUES

- Isozymes (Bonnet - Masimbert et Bikay-Bikay, cités par Sophie GERBER),

- Terpènes (Arbez et al. 1974, cités par Sophie GERBER).

Cf. annexe n° 2.

2/ Physiologie*a) biologie florale*

La floraison est tardive. Le pollen ne s'échappe qu'en juillet. Les chatons mâles, oblongs cylindriques, obtus, disposés en épis serrés, d'une couleur jaunâtre, sont dépassés par les feuilles. Les chatons femelles ont tout de suite la forme ovoïde ; ils sont rougeâtres et sans bractées saillantes. Une fois fécondés, ils donnent naissance à des cônes qui mettent 20 mois à mûrir complètement. Ils persistent un an après la chute des graines qui s'échappent donc dès le mois de mars de l'année n + 2. La fructification peut avoir lieu dès la 15^e année.

Les graines sont ovales, elliptiques, comprimées, de couleur brunâtre, longues de 6 à 8 mm, larges de 3 à 4 mm, elles sont munies d'une aile trois à quatre fois plus longue qu'elles.

On compte 60.000 à 80.000 graines fraîches dans un kilogramme et 30.000 à 40.000 dans un litre.

Traitement des graines : les cônes sont ouverts à 50°C. Les graines sont désaillées. Conservées à + 3°C, elles restent viables au moins 10 ans (Gegout et Mortier - 1990).

b) Germination

Le Pin de Salzman constitue un "matériel de choix en raison d'une part d'une faculté germinatrice élevée, d'autre part d'un pourcentage de germination très faible à l'obscurité, particulièrement lorsque les graines sont utilisées immédiatement après la récolte" (mémoire de Danielle PACE. Faculté de Nice).

Faculté germinatrice = 80-95 %

54.000 germes vivants / kg.

La plantule présente 6 à 7 cotylédons.

c) Enracinement

Selon Calas (1900), l'enracinement du Pin de Salzman devient presque immédiatement traçant. Il peut développer un système de racines latérales d'une puissance considérable.

Les forestiers espagnols ont constaté que les racines secondaires pouvaient considérablement se développer et former un réseau superficiel très fortement accroché aux rochers, s'ancrant dans les fissures.

3/ Qualité du bois (Calas 1900)

"Le bois du Pin laricio de Salzman se rapproche beaucoup de celui du Pin laricio de Corse. Il a un aubier un peu coloré et très abondant. Le bois parfait, rougeâtre, très chargé en résine, n'apparaît que très tard ; et plus l'arbre vieillit plus la proportion d'aubier augmente."

Le bois parfait est d'une grande densité, mais la densité réelle est plus faible, puisqu'elle tient compte presque exclusivement de celle de l'aubier.

Les canaux résinifères sont nombreux.

En Espagne, la qualité du bois serait variable selon les régions. Les pins de Cuenca, Cazorla, Segura et Huescar sont de très bonne qualité même s'ils peuvent présenter le défaut d'avoir des fibres "entrecroisées". Ce pin est employé dans la construction depuis fort longtemps (constructions navales).

Sa résine contient une proportion de pinène comparable au Pin d'Alep donc inférieure au Pin maritime. Elle peut néanmoins être utilisée dans la fabrication de l'essence de Térébenthine.

4/ Pathologie

Les spécialistes pensent que le Pin de Salzman est sensible à plusieurs ravageurs et agents pathogènes présents sur de nombreux Pins. Citons notamment :

LEPIDOPTERES

- ◆ La chenille processionnaire du Pin (*Thaumetopoea pityocampa*)

Elle est responsable de défoliations hivernales et surtout printannières qui entraînent des mortalités dans les jeunes peuplements.

Dans l'ordre de ses préférences, cette chenille défoliatrice attaque :

- * le Pin noir d'Autriche,
- * le Pin laricio de Corse,
- * le Pin de Salzmann.

En 1890, M. Calas inspecteur-adjoint des Eaux et des forêts notait :

"Ce n'est que par suite d'absence de nourriture, lors des grandes invasions qu'elle dévore les aiguilles de Pin d'Alep et de Pin laricio de Salzmann."

◆ La tordeuse de pousses du Pin (*Rhyacionia Buoliana*)

La larve de ce lépidoptère détruit en général le bourgeon terminal dès l'automne et provoque des courbures caractéristiques sur les pousses terminales.

◆ Pyrale du tronc (*Dioryctria sylvestrella*)

Les chenilles vivent principalement dans les plaies résineuses dues à des attaques de champignon, de dégâts de gibier ou de blessures mécaniques. Elles perturbent le processus de cicatrisation.

Sur des jeunes sujets, une annélation sous corticale partielle peut entraîner la rupture des tiges dans les zones ventées.

COLEOPTERES

◆ Sténographe (*Ips sexdentatus*)

Il s'agit d'un ravageur secondaire. Il attaque des sujets affaiblis ou dépérissants et cause leur mort rapide par ceinturage des tissus conducteurs de sève. En cas de pullulation, il peut se porter sur des arbres vigoureux et se comporter en ravageur primaire.

◆ Hylésine du Pin (*Tomicus piniperda*)

L'insecte provoque le dessèchement des bourgeons et la chute des pousses terminales minées. Il perturbe la circulation de la sève par le creusement de galeries maternelles et larvaires sous corticales provoquant la mort des arbres attaqués.

L'attaque s'accompagne souvent d'un bleuissement du bois par des champignons (*Ceratocystis* sp.).

◆ Acuminé (*Ips acuminatus*)

Le développement larvaire sous-cortical de l'insecte entraîne la destruction des tissus conducteurs de sève. Les cimes et les branches meurent ainsi par ceinturage. La mort de l'arbre peut intervenir lorsque l'Acuminé est en association avec d'autres scolytes (hylésine, sténographe).

◆ Pissode du Pin (*Pissodes notatus*)

L'insecte effectue des morsures de maturation qui dessèchent les pousses et provoquent des écoulements de résine (dégât primaire).

Ravageur secondaire, le pissode attaque les arbres affaiblis ou dépérissant. Ses galeries larvaires bloquent la circulation de la sève. La mort de l'arbre survient lorsque les larves confectionnent leur logette nymphale.

◆ Hylobe ou grand charançon du Pin (*Hylobius abietis*)

Les insectes adultes effectuent des morsures lors de leur repas de maturation sexuelle. Un plant peut être écorcé en quelques nuits en cas d'attaque importante et mourir.

L'attaque se localise sur les parties tendres et jeunes, c'est donc pendant les cinq premières années que les jeunes plants sont sensibles.

A St Guilhem-le-désert ont été observés (MIHOUBI Marie - 1989) :

Sur les branches :

- * un longicorne (*Monohamnus galloprovincialis*), qui creuse des galeries dans les grosses branches du Pin de Salzmann.

Sur les aiguilles :

- * *Cryptocephalus pini*.

Sur les cônes :

- * *Grapholitha* ou *Laspeyresia conicolona*. Cette chenille de microlépidoptère, très active, creuse ses galeries dans le cône où elle dévore l'intérieur des graines. Sa chrysalide, qui se forme soit à l'automne soit pendant l'hiver dans les écailles du cône, sort dès le mois d'avril par la tranche de l'écaille sur laquelle sa dépouille reste piquée après le départ du papillon. Les oeufs sont pondus à mi-hauteur du cône et la jeune chenille en pénétrant dans le cône provoque une déviation de son axe. Les dégâts peuvent être très importants.
- * La larve d'une cecidomye fait également d'importants dégâts au cône, qu'elle attaque peu après sa formation (en juin et juillet probablement). Sa piqûre produit une abondante exsudation de résine qui boursouffle et désarticule le cône en le rendant difforme. Le cône attaqué cesse de croître, il se dessèche à l'automne de sa première année ou au printemps suivant.

Au cours des années 1989 et 1990, aucun problème spécifique au Pin de Salzmann n'a été observé dans le Sud de la France (communication DSF Sud-Est).

En Espagne, le Pin de Salzmann serait attaqué par les champignons suivants :

Armillaria mellea
Cenangium ferruginosum
Fomes annosus
Fomes pini
Fomes pinicola

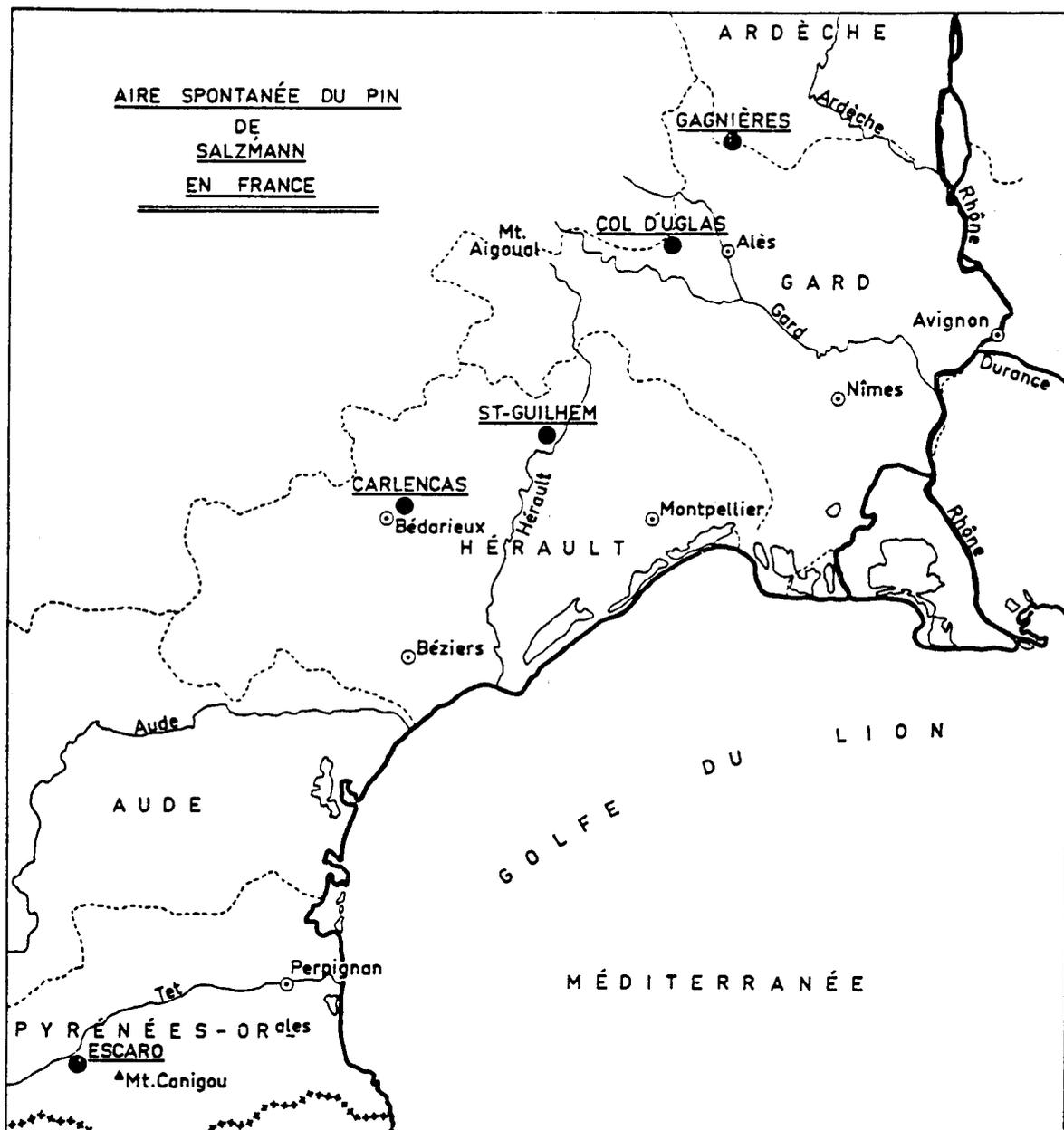
et par une rouille (*Lophodermium pinastri*).

La multiplicité de ses ennemis serait due à l'extension des vieux peuplements, très clairiérés, à sa présence dans des zones marginales par rapport à son aire naturelle et à son caractère d'espèce "antique et décadente" (communication espagnole).

C. LE PIN DE SALZMANN EN FRANCE

1/ Aire naturelle

- Carte DEBAZAC, 1963



2/ Conditions écologiques des populations naturelles (voir tableau n° 2)

a) Caractéristiques climatiques

Dans les zones où le Pin de Salzmann est spontané, les précipitations annuelles vont de 645 mm à 1.640 mm, ce qui montre une assez grande plasticité de l'essence vis à vis de l'approvisionnement en eau. Les températures moyennes annuelles s'échelonnent de 10,1 °C à 14 °C.

ÉCOLOGIE DES PEUPELEMENTS NATURELS

Peuplement	Secteur découpage écologique*	surface approximative minimale (ha)	substrat	Climat (indice CEMAGREF)*	Altitude (m)	Étage de végétation
St Guilhem (34)	Buège, Gorges Hérault	500	Dolomie	24	80 - 600	Mésoméditerranéen supérieur supraméditerranéen
Carlencas et Levas (34)	Fosse de Bédarieux	20	Dolomie Calcaires durs	75	300 - 400	Mésoméditerranéen
Bessèges - Gagnières (30)	Basses Cévennes métamorphiques Bassin Houiller	500	Micaschistes Schistes et grès Conglomérats	14 25	200 - 400	Mésoméditerranéen supérieur Supraméditerranéen
Col d'Uglas (30)	Basses Cévennes métamorphiques	20	Micaschistes grès - gneiss	14	300 - 550	Mésoméditerranéen supérieur
Prades (66)	Conflent	> 100	Schistes, gneiss	86 - 64 - 63	400 - 950	Supraméditerranéen

* voir annexe n° 5

Le calcul du quotient pluviothermique d'Emberger permet de situer les stations dans l'étage bioclimatique subhumide à humide tout en isolant certains peuplements dans l'étage perhumide (peuplement du col d'Uglas).

Le nombre de mois secs est généralement compris entre 1 et 3, ce qui placerait les stations dans une zone typiquement méditerranéenne parfois atténuée. En effet, le climat méditerranéen a été caractérisé par l'existence de 2 mois secs. Ceci est soutenu par la valeur de l'indice de xéricité de Gaussen qui, dans la plupart des cas, ne dépasse pas 6 et descend jusqu'à 3. Rappelons qu'une zone à climat méditerranéen a été délimitée en deçà de la ligne X (indice de xéricité) = 5.

b) Les conditions lithologiques et édaphiques

Dans les Cévennes, le Pin de Salzmann se développe sur des schistes, mica-schistes, ainsi que sur des grès et conglomérats siliceux.

A Saint Guilhem-le-désert et à Bédarieux dans l'Hérault, il semble inféodé aux terrains dolomitiques, même s'il pénètre localement sur les terrains calcaires voisins.

Dans les Pyrénées-Orientales, il croît sur des schistes et des moraines gneissiques.

Il s'agit donc principalement de substrats drainants, s'asséchant rapidement en été, à l'exclusion des schistes ou micaschistes dont l'humidité édaphique est toutefois limitée par des phénomènes de ruissellement (QUEZEL et BARBERO, 1988).

Parallèlement, le sol présente généralement une texture sablo-limoneuse ou limono-sableuse.

Quelques données espagnoles ont été portées dans l'annexe n° 3.

c) Végétation

En 1948, Gaussen a admis l'existence d'une série particulière à Pin de Salzmann, située tantôt dans l'étage méso-méditerranéen, tantôt dans l'étage supra-méditerranéen.

Pour Quézel et Barbero (1988), les peuplements de Pin de Salzmann ne peuvent être rassemblés en une seule série.

Selon eux, le Pin de Salzmann pénètre très localement dans l'étage méso-méditerranéen inférieur, dans la région de St Guilhem (Hérault) et de Bessèges (Nord du Gard).

D'une manière générale,

il est présent dans la partie supérieure de l'étage méso-méditerranéen, où il participe à la série du Chêne vert, qu'elle soit calcicole (St Guilhem-le-désert, altitude < 400 m) ou silicicole (Bessèges),

ou dans l'étage supra-méditerranéen, où il s'inscrit dans les séries calcicoles (St Guilhem - Altitude > 400 m) ou silicicoles (Prades - Pyrénées-Orientales) du Chêne pubescent.

Citons une série particulière, associant le Pin de Salzmann au Pin sylvestre, remarquée dans un peuplement relique des Gorges du Tarn, et situé dans l'étage montagnard méditerranéen.

En Espagne, les pinèdes de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* peuvent représenter un climax de végétation mais en général correspondent à des faciès de régression des différents types de forêts feuillues à base de *Quercus pubescens*, *Quercus faginea*, *Quercus ilex*, *Acer monspessulanum*, *Acer opalus*. Aux altitudes supérieures, on le rencontre avec le Pin sylvestre alors qu'aux altitudes les plus basses, on le rencontre avec le Pin maritime ou le Pin d'Alep (voir annexe 3 bis).

3/ Essais d'introduction : plantations comparatives de provenances de l'INRA

Depuis les années 1960, l'INRA a entrepris un programme de recherche centré sur l'étude de la variabilité géographique de l'espèce collective *Pinus nigra*. Différents dispositifs expérimentaux ont ainsi été mis en place sous forme de plantations comparatives de provenances, dispersées sur le territoire national.

En 1984, B. ROMANT-AMAT a effectué un premier bilan de ces essais, en s'intéressant plus particulièrement aux performances de la sous-espèce *Laricio Poiret*.

La sous-espèce *Clusiana* a été testée à travers 10 provenances différentes dont 3 françaises et 7 espagnoles.

Sur cette sous-espèce ROMANT-AMAT aboutit aux conclusions suivantes :

- Bien que les dix provenances qui la représentent soient géographiquement distantes les unes des autres, la sous-espèce *clusiana* apparaît à la fois comme homogène et distincte des autres populations de Pin noir.
- Quel que soit le milieu considéré, sa reprise après plantation, sa survie et sa croissance en hauteur sont inférieures à celles des autres Pins noirs.
- Elle se caractérise par un port de branches très fastigié.
- Aucune des provenances de cette sous-espèce, qu'elles soient françaises ou espagnoles, ne présentent d'intérêt dans les milieux étudiés.

L'intérêt de ce bilan est cependant limité par le choix d'implantation des essais. En effet, ceux-ci se trouvent, à une exception près, dans une zone où le climat est océanique, alors que l'aire de répartition de la sous-espèce *clusiana* est typiquement méditerranéenne (voir annexe n° 4).

Essayons néanmoins d'extraire quelques résultats intéressants.

♦ Croissance en hauteur

La provenance GAGNIERES (Gard) se comporte mieux que la provenance SAINT-GUILHEM (Hérault), et ceci d'une façon constante.

Il n'en reste pas moins que la meilleure hauteur de la sous-espèce *clusiana* dépasse rarement la valeur moyenne des hauteurs de toutes les sous-espèces.

Notons la bonne performance de la provenance OLETTE (Pyrénées Orientales) à Lamotte-Beuvron (Loir et Cher).

Les provenances espagnoles se placent en majorité dans le bas du classement.

Les données sur la circonférence sont insuffisantes pour qu'on puisse en tirer des conclusions.

♦ Deux essais sous climat méditerranéen

* Essai de Levens (Alpes de Haute-Provence)

Il se situe à 1200 m d'altitude, sous un climat méditerranéen à tendance montagnarde. La roche mère est calcaire et le sol très superficiel.

4 provenances de la sous-espèce clusiana ont été testées :

GAGNIERES (France, Gard)
 SAINT-GUILHEM (France, Hérault)
 RIO MADERA (Espagne)
 CAZORLA (Espagne)

En 1977, les plants avaient 13 ans.

Hauteur totale 1977

Les quatre provenances précédemment citées se situent dans le bas du classement.

	Provenance	Moyenne (cm) Hauteur totale
Pour information	Gagnières	250,6
	Rio Madera	236,7
	St Guilhem	236,3
	Cazorla	226,0
	Laricio Calabre Rockelan	314,0
	Nigricans bulgarie	311,4
	Pallasiana Les Barres	306,8

Accidents du bourgeon terminal

Les quatre provenances ont subi des accidents répétés sur leurs bourgeons terminaux, globalement plus que les provenances des autres sous-espèces. Il semble donc que le froid ait causé des dommages importants.

Pour conclure, cette station, même si elle se situe en climat méditerranéen, ne semble pas favorable au Pin de Salzmann.

* Essai de POMET (Hautes-Alpes)

Il se situe à 700 m d'altitude, sur un sol de type argilo-calcaire. Les précipitations annuelles atteignent 800 mm.

4 provenances de la sous-espèce clusiana y ont été testées :

GAGNIERES (France - Gard)
 FRESNEDA (Espagne)
 AINSA (Espagne)
 PRIEGO (Espagne).

Hauteur totale 1988

Sur 4 provenances du Pin de Salzmann, deux se placent dans les 5 premières en ce qui concerne la hauteur. Il s'agit d'une provenance espagnole (AINSA) et d'une provenance française (GAGNIERES dans le Gard). La provenance espagnole AINSA se classe première.

Accroissement

Ils ont été mesurés pour les années 1982-1985 et 1988.

Pour les années 85 et 88, la provenance GAGNIERES se classe 1ère. La provenance AINSA, 2ème en 1982, se classe 8ème sur 30 en 1988.

D'une façon globale, les accroissements de ces deux provenances se maintiennent à un niveau élevé.

Cet essai met donc en lumière l'intérêt que peut présenter certaines provenances du Pin de Salzman dans des conditions de climat et de roche bien précises.

II - ACQUISITION DES DONNEES

A. METHODE

La problématique réelle est la suivante : établir une relation entre la production d'un peuplement et les différents paramètres du milieu considéré.

- La production, ou la productivité, sont le plus souvent des grandeurs extrêmement difficiles à mesurer dans l'absolu. C'est pourquoi on se contente souvent de classer les différents peuplements les uns par rapport aux autres.
- Pour établir ce classement, on peut mesurer différentes grandeurs qui évoluent toutes de façon monotone avec la production. Parmi ces grandeurs, on choisit habituellement la hauteur dominante, facile à appréhender.
- Cependant, pour pouvoir comparer différents peuplements, il est indispensable de s'assurer que ces peuplements sont effectivement comparables. D'après EICHHORN, "dans une région climatiquement homogène, pour une essence donnée et pour une large gamme de sylviculture (peuplements pleins), la production totale en volume d'un peuplement équienne monospécifique et génétiquement homogène ne dépend que de l'âge du peuplement, et de la station".

Ainsi, en ne considérant que les peuplements pleins équiennes et monospécifiques de Pin de Salzmann, la hauteur dominante ne dépendra que de l'âge du peuplement, de la station et du climat.

Choix de l'indice de fertilité

La hauteur dominante d'un peuplement caractérise la fertilité de la station sur laquelle il croît. Afin d'établir une comparaison entre peuplements de tous âges, on calcule la hauteur dominante à un âge donné, ce qui constitue un INDICE de fertilité.

Choix de l'âge de référence

Considérant l'âge des peuplements mesurés, nous devons éviter de choisir un âge trop avancé car cela aurait induit de fortes incertitudes sur la hauteur des arbres mesurés jeunes. D'un autre côté, l'indice de fertilité se devait de caractériser la production, non d'un peuplement juvénile, mais d'un peuplement relativement adulte.

Nous avons donc choisi pour indice de fertilité la hauteur dominante à 50 ans. Notons que ce choix nous permettra de comparer la croissance du Pin de Salzmann avec celle du Pin laricio (Etude de R. COMMERÇON, 1984).

B. RELEVES AUTECOLOGIQUES (voir protocole précis Annexe n° 5)

La fiche de relevé a été élaborée par le CEMAGREF.

Placette de mesure

Elle ne présente pas de surface, ni de forme précises. Il a été entendu qu'elle constituerait un ensemble homogène du point de vue stationnel. Sa surface sera donc limitée par la surface de la station, puis en second lieu par la densité du peuplement (on souhaite mesurer 6 arbres dominants). C'est pourquoi une bonne observation du milieu et de ses contraintes est nécessaire dès l'abord.

1/ Observations notées sur le terrain

Paramètres écologiques

STATION	On note l'altitude, la position topographique, l'exposition et la pente. La dernière phase de terrain a pris en compte la micro-topographie.
SOUS-SOL	On note la nature du substrat, son pendage s'il y a lieu, son affleurement et la formation superficielle observée.
SOL	On note 5 profondeurs d'enfoncement de la tarière hélicoïdale, le pourcentage de cailloux, la tendance texturale et la qualité de l'horizon de surface. La dernière phase de terrain a précisé la texture. On note également la réaction de la terre fine à l'acide chlorhydrique.
VEGETATION	On note les espèces reconnaissables en toutes saisons, présentes sur la station, en commençant par les espèces dominantes.
PEUPELEMENT	On note sa surface, le recouvrement de chaque strate et de l'essence étudiée dans chaque strate. La densité est évaluée.

Mesures dendrométriques

On mesure l'âge et la hauteur de 6 arbres dominants.

Autres observations de terrain

On caractérise l'abondance de la régénération naturelle. On note les antécédents cultureux de la station et, s'il y a lieu, les techniques et matériel de plantation.

2/ Renseignements pris au bureau

La station est localisée grâce aux coordonnées Lambert.

On la replace dans le zonage climato-lithologique du CEMAGREF (Ripert, Nouals, Franc - 1990). On s'assure de la nature du substrat, et de son pendage éventuel.

3/ Localisation des peuplements mesurés (voir carte n° 2)

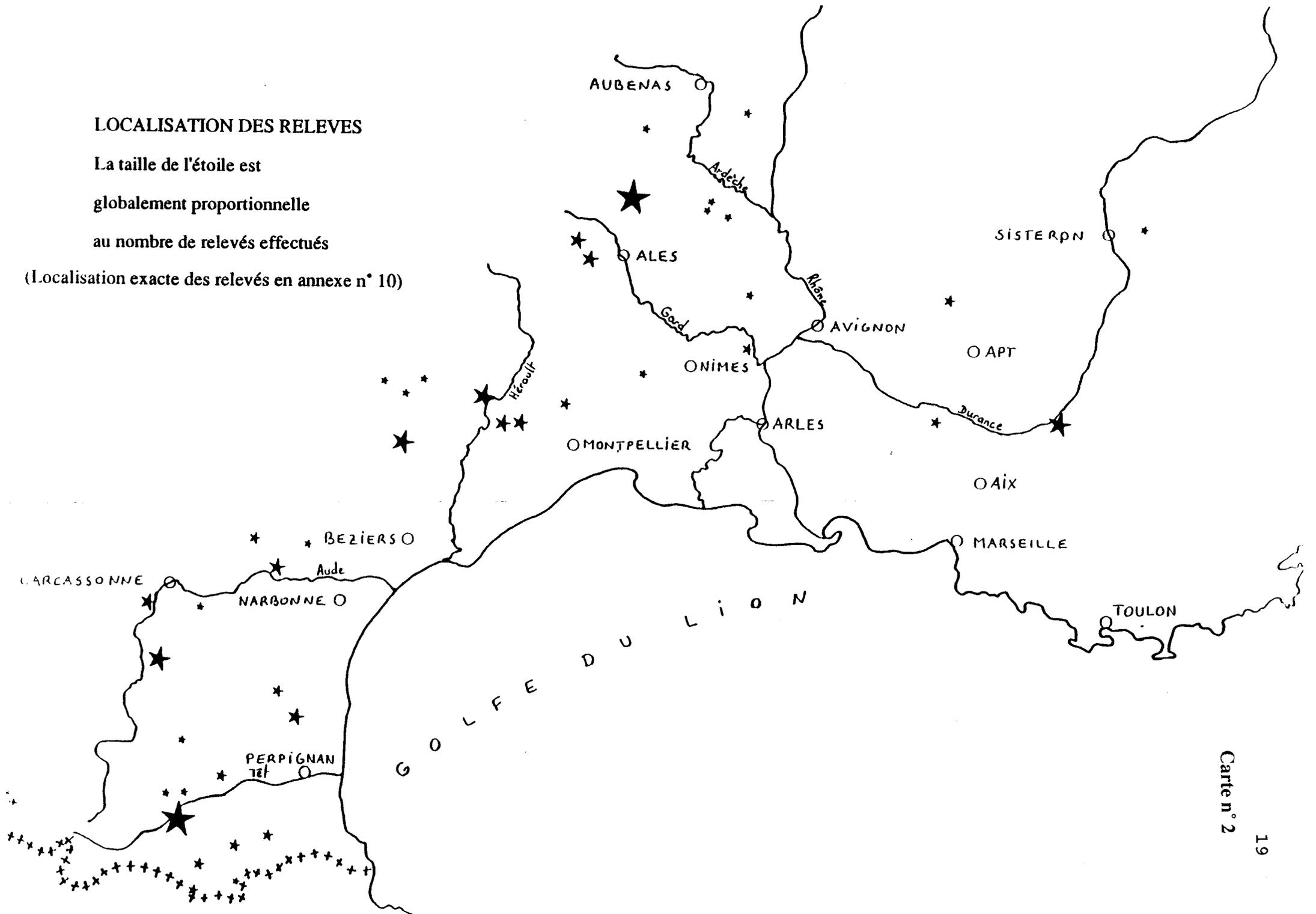
91 relevés avaient été réalisés en 1985-1986 à la suite d'une enquête auprès des différents organismes forestiers (ONF, DDAF, CRPF). A l'automne 1990, une enquête supplémentaire a été menée auprès de ces mêmes services, dans l'ensemble des deux régions PACA - Languedoc-Roussillon, ainsi que dans deux départements limitrophes appartenant à la région Rhône-Alpes, l'Ardèche et la Drôme, dont les parties méridionales constituent l'extrême nord de la zone méditerranéenne.

70 relevés ont été réalisés à partir de cette dernière enquête, ce qui porte le nombre total de relevés à 161.

LOCALISATION DES RELEVÉS

La taille de l'étoile est
globalement proportionnelle
au nombre de relevés effectués

(Localisation exacte des relevés en annexe n° 10)



4/ Critiques du protocole expérimental

- **Pourcentage de cailloux.** Il faudrait différencier 0 % des autres modalités.
- **La tendance texturale** a été évaluée "au toucher", et par plusieurs enquêteurs différents. Il est très possible que des différences d'appréciation aient existé entre ces enquêteurs. Cependant la tendance texturale, à la différence de la texture, est très peu soumise à d'éventuelles variations dans l'appréciation individuelle.
L'estimation de la texture a été réalisée par un seul couple de personnes, en utilisant au maximum les capacités d'analyse de sol en laboratoire.
- **L'analyse de l'horizon de surface** a été reprise telle qu'elle avait été faite dans les premières fiches Salzmänn. Il aurait évidemment été préférable de noter la nature de l'humus développé sur le sol considéré. Cela n'a pas été fait, par soucis d'homogénéité avec ce qui avait été réalisé précédemment.
- **Les mesures dendrométriques** ont été effectuées sur les 6 arbres les plus hauts de la station et non pas sur les arbres les plus gros. Or la hauteur dominante d'un peuplement est définie comme la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare (Duplat -1986). En pratique, il est préconisé de mesurer le 1^{er}, le 3^{ème} et le 5^{ème} des arbres classés dans l'ordre des diamètres décroissants. Les résultats obtenus par la 2^{ème} méthode sont, semble-t-il, très proches de ceux obtenus par la première.
- **Cailloux $\emptyset > 2$ cm.** Pas d'évaluation d'un pourcentage des différents diamètres sauf lorsqu'il s'agit d'un colluvium.

C. ANALYSES DE TIGES

L'analyse de tige a pour but de reconstituer la croissance en hauteur d'un arbre. Pratiquement, on sectionne l'arbre en différents billons d'égales longueurs, ce qui permet de compter les cernes à des niveaux équidistants sur toute la hauteur de l'arbre. Le protocole expérimental a été décrit dans l'annexe n° 6.

Nous possédions une grande quantité d'analyses de tiges réalisées sur des arbres sur pied. Ces analyses ne concernaient que des peuplements jeunes, elles ne pouvaient donc pas suffir.

Une campagne d'analyses de tiges sur arbres abattus a été menée dans différents massifs, afin de récolter des données sur la croissance d'arbres plus âgés. On a tenu compte des relevés déjà effectués pour couvrir une variation maximale du milieu et de la croissance du Pin de Salzmänn.

En pratique, les arbres abattus avaient de 40 à 170 ans.

Localisation des analyses sur arbres abattus

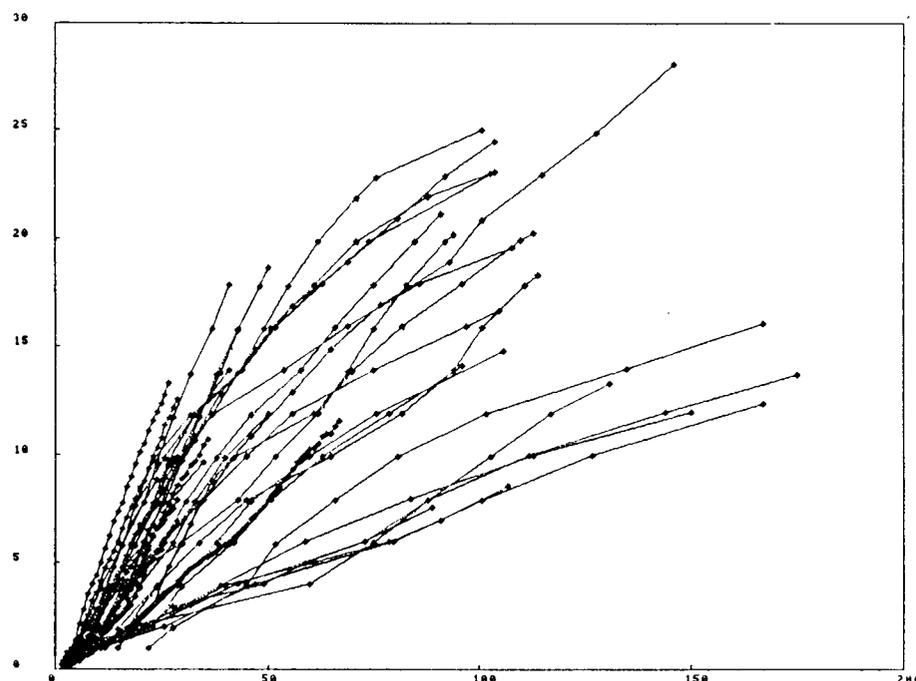
Pyrénées-Orientales	8 tiges	sur 4 stations
Hérault	8 tiges	sur 5 stations
Ardèche	6 tiges	sur 3 stations
Gard	4 tiges	sur 2 stations
Lozère	2 tiges	sur 1 station
<hr/>		
Total	28 tiges	sur 15 stations

Ces analyses ont été faites dans le soucis de couvrir la plus grande palette de croissance du Pin de Salzmänn.

III - MODELISATION DE LA CROISSANCE

Nous disposons de 37 analyses de tiges réparties comme suit :

28 analyses d'arbres abattus réalisées sur 15 stations,
9 analyses d'arbres sur pied réalisées sur 9 stations (voir graphique n° 1).



Graphique n° 1

ANALYSE DE TIGES - Pin de Salzmann

Données originale + 1 an

Abcisse : âge en années - Ordonnée : hauteur en mètre

1/ Correction des données

Les analyses de tiges sur arbres abattus ont été effectuées par comptage des cernes annuels sur des sections faites à des intervalles réguliers (2 m). Les couples (Hauteur, Age) ainsi obtenus ont été corrigés pour tenir compte d'un biais, les sections de tiges n'intervenant que rarement à l'extrémité d'une pousse annuelle.

La correction (CARMEAN, 1972 cité par Legoff) consiste à ajouter à la hauteur mesurée la moitié de l'accroissement moyen annuel en hauteur calculé sur la période comprise entre cette mesure et la mesure au niveau supérieur.

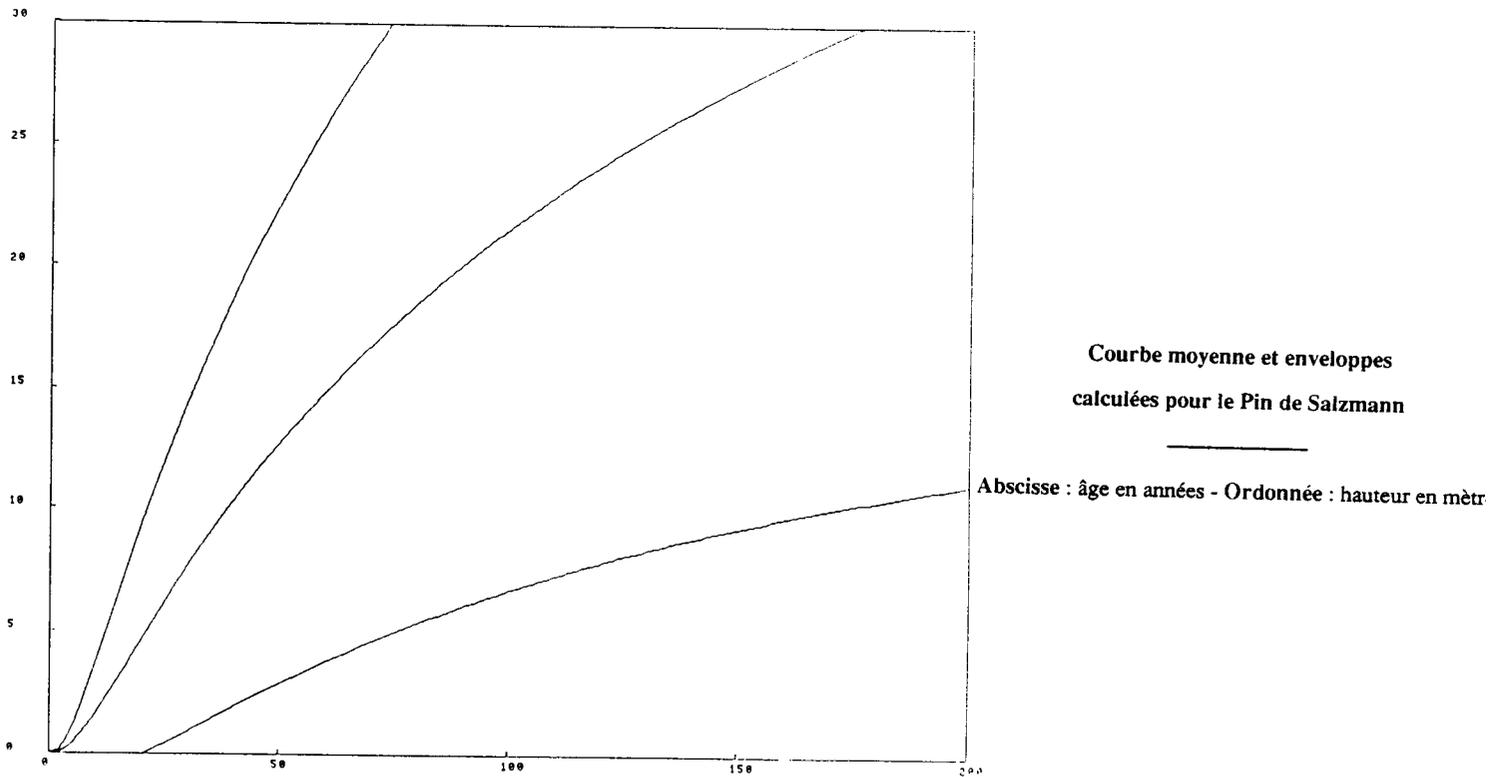
2/ Modélisation

La totalité de la modélisation a été réalisée par J.C. HERVE, thésard à l'Université Claude Bernard à Lyon, dont le sujet de thèse porte sur la modélisation de la croissance des Pins noirs.

Un résumé de sa méthode se trouve en annexe n° 7.

A partir des analyses de tiges, le modélisateur a pu mettre au point un modèle de croissance spécifique au Pin de Salzmann.

Courbe moyenne et variance de la courbe moyenne



Dans un deuxième temps, cette modélisation a servi à calculer la hauteur dominante à 50 ans (ou indice de fertilité) dont nous avons besoin pour établir des comparaisons entre les relevés.

IV - ANALYSE DES DONNEES

A. PRELIMINAIRE

Avant de débiter l'analyse des données, trois points devaient être envisagés :

- la fiabilité de l'indice de fertilité,
- l'homogénéité des stations vis à vis de cet indice,
- le caractère équienne des peuplements mesurés.

Nous discuterons successivement de ces trois points.

1/ Fiabilité de l'indice de fertilité

La hauteur à 50 ans a été calculée grâce à un modèle mathématique, présenté précédemment. Comme tout modèle mathématique, celui-ci présente des limites, c'est-à-dire qu'il prédit plus ou moins bien la croissance des arbres, selon l'âge auquel on les a mesurés mais également selon leur "classe" de fertilité.

Pratiquement, la hauteur à 50 ans des arbres mesurés très jeunes sera moins bien déterminée que la hauteur à 50 ans d'arbres mesurés à un âge avancé, même si les deux âges sont équidistants de l'âge de référence. En effet, la courbe de croissance des arbres mesurés jeunes n'est déterminée que par deux points relativement proches : l'origine et le couple (Hauteur, Age) de la mesure. Les deux points se situent tout les deux dans la même partie inférieure de la courbe. Au contraire, les courbes des arbres mesurés à un âge supérieur à l'âge de référence seront déterminées par deux points éloignés, rendant plus fiable la valeur de l'indice.

En résumé, il y a plus de danger à extrapoler qu'à "intrapoler". Ajoutons que si les arbres mesurés jeunes appartiennent déjà à une très mauvaise "classe" de fertilité, leur croissance sera relativement bien déterminée.

Le modèle nous fournit pour chaque indice calculé l'écart-type ET correspondant . Cet écart-type rend compte des approximations liées au modèle, et de l'erreur de mesure, estimée ici à 40 cm (cette estimation tente de rassembler les erreurs de mesure sur la hauteur et sur l'âge). L'indice i a donc 95 % de chance de se trouver dans un intervalle compris entre $i + 2ET$ et $i - 2 ET$.

Nous avons estimé qu'une valeur était fiable si l'écart-type correspondant ne dépassait pas 2 m. On admet ainsi une incertitude de 8 m sur la valeur mais on réduit l'erreur maximale à 4 m en prenant l'indice calculé.

A partir de ce critère, un tri a été effectué. A l'issue de ce tri, 9 stations ont été rejetées. L'âge des arbres mesurés sur ces stations ne dépassait pas 20 ans.

2/ Homogénéité des stations vis a vis de l'indice de fertilité

Pour chaque station, l'indice de fertilité de chacun des 6 arbres est déterminé, puis on prend leur moyenne.

En calculant l'amplitude de l'indice de fertilité sur chaque station, nous avons constaté une variation parfois non négligeable de cet indice.

Normalement, si les lois de EICHHORN sont vérifiées, l'indice de fertilité est inhérent à la station ; cela signifie que deux arbres pris sur une même station doivent présenter des indices de fertilité comparables.

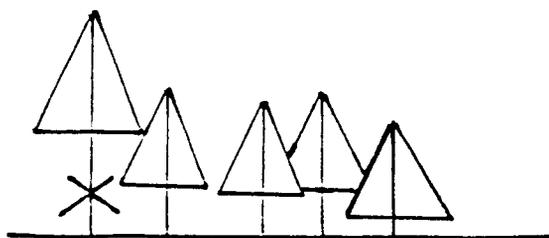
Or, il arrive que cela ne soit pas vérifié.

Trois explications peuvent être avancées.

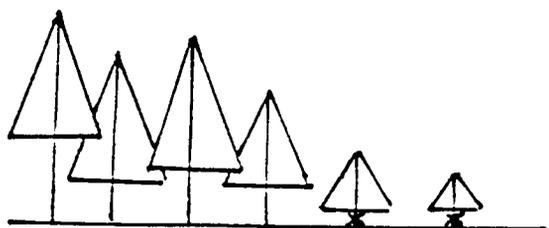
- . la station est hétérogène et une variation subtile a pu échapper aux différents enquêteurs,
- . le peuplement n'est pas équienné (le point sera envisagé ultérieurement).
- . la dominance des arbres n'est pas certaine (erreur d'interprétation du protocole par les enquêteurs).

Nous avons essayé de limiter cette variation en tenant compte à la fois de la précision recherchée et de notre obligation de conserver un maximum de données.

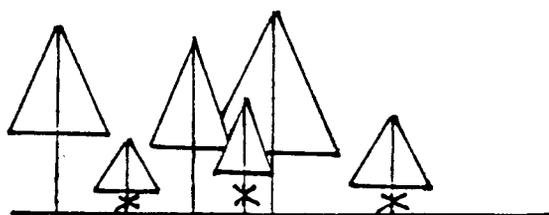
Dans un premier temps, nous avons essayé de réduire les variations de l'indice à un maximum de 5 m, en écartant certains arbres.



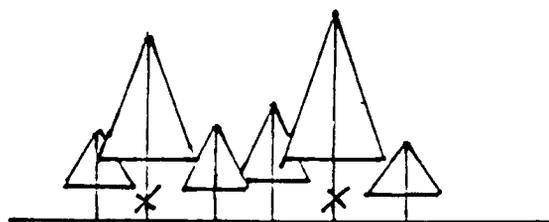
Suppression des arbres
à indice isolé
(plus haut ou plus bas)



Variation continue :
suppression des arbres à indice
le plus faible



Variation discontinue, même effectif
suppression des arbres à indice
le plus faible



Variation discontinue, effectifs différents
suppression des arbres appartenant
au groupe le moins représenté

On peut d'ores et déjà critiquer ces choix successifs :

Si comme dans le dernier cas envisagé on ignore les bons indices marginaux, la comparaison des stations pourra être erronée. En effet, une même station peut présenter ces bons indices uniquement et apparaître comme différente de la première, alors qu'il n'en est rien.

Cependant, nous ne pouvons pas nous permettre de supprimer la totalité des relevés présentant une trop grande variation de l'indice de fertilité, à cause de contraintes liées au nombre de relevés effectués.

Pratiquement, nous avons rejeté 13 arbres, sur 8 stations.

Par la suite, 7 stations où le nombre d'arbres mesurés était inférieur à 3 ont été supprimées.

Il restait donc 145 relevés.

3/ Caractère équiennne des peuplements

D'après le protocole, un peuplement était considéré comme équiennne si l'âge des arbres ne variait pas plus de 20 % par rapport à l'âge moyen. Théoriquement, seuls les peuplements équiennnes étaient retenus.

Or, à l'issue du dépouillement, il est apparu que plus de 30 stations devaient être rejetées à cause de cette restriction.

Cette constatation n'était nullement surprenante car un certain nombre de peuplements mesurés pouvait être qualifiés de naturels.

Cependant, étant donné le nombre restreint de relevés effectués, il n'était pas souhaitable de supprimer la totalité de ces relevés.

A l'issue de l'homogénéisation de l'indice de fertilité, 4 relevés ont vu leur variation en âge diminuer. Il subsistait néanmoins 11 relevés où cette variation dépassait 40 %.

Au vu du nombre de nos relevés, nous avons décidé de les conserver, en sachant qu'ils présentaient une certaine homogénéité vis à vis de l'indice de fertilité.

4/ Caractéristiques des données retenues

REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES 145 RELEVES

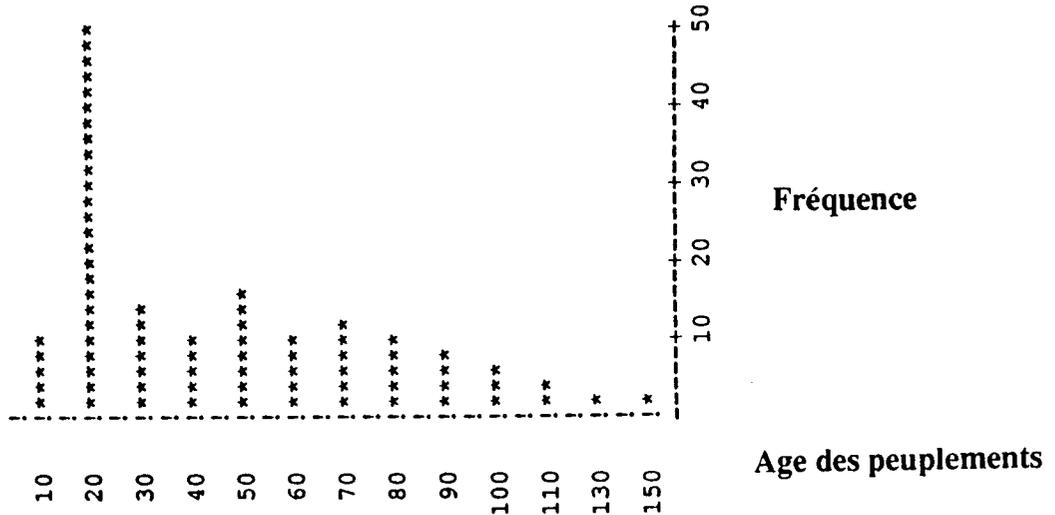
REGION PACA	
Alpes de Hte Provence	1
Vaucluse	6
Bouches du Rhône	7
	==
Total région	14

REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON	
Gard	34
Hérault	30
Aude	16
Pyrénées-Orientales	39
Lozère	3
	===
Total région	122

REGION RHONE-ALPES	
Ardèche	9

Age des peuplements échantillonnés

L'âge des peuplements s'échelonne de 11 à 155 ans. Un tiers des peuplements mesurés se situe dans la classe 20-30 ans.



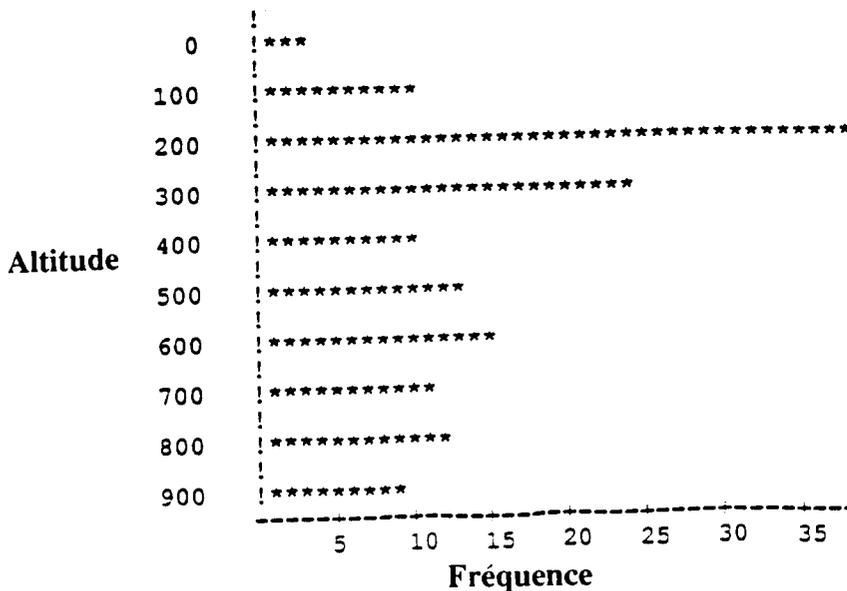
Equienneté

Ce critère a été considéré comme secondaire par rapport à l'homogénéité de l'indice de fertilité sur la station.

Répartition altitudinale

Les peuplements sont présents à des altitudes allant de 10 à 1 270 m. La moitié des relevés se situent à une altitude comprise entre 200 et 400 m.

En dehors de cette zone, la répartition est relativement homogène.



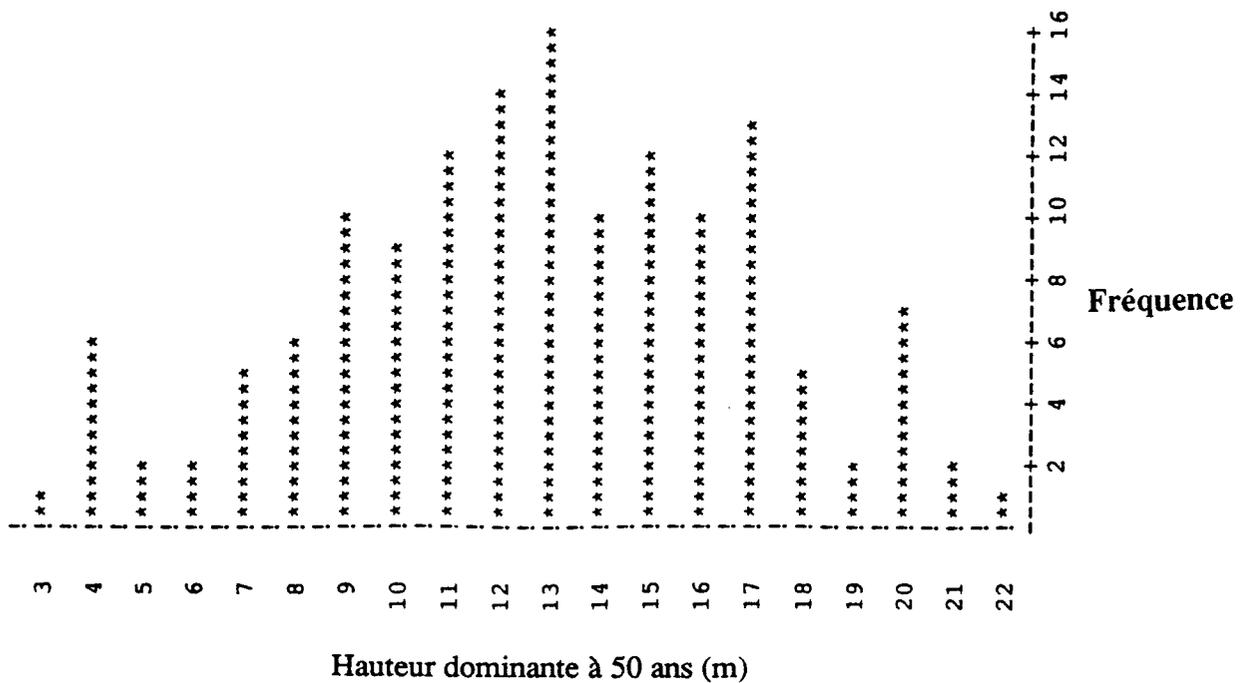
Substrat

Le Pin de Salzmann est présent sur la plupart des types de roches, à l'exclusion des roches d'origine éruptive.

Indice de fertilité

Il s'échelonne de 3,3 m à 22,3 m. La majorité des indices se situent dans la fourchette 10-17 m.

REPARTITION DE L'INDICE DE FERTILITE



Pour les différents traitements qui vont suivre, il nous fallait diviser cet indice en classes. Nous avons choisi de distinguer cinq classes d'amplitude 4 m :

- Classe n° 5 (I5) indice ≤ 8 m
- Classe n° 4 (I4) indice]8-12]
- Classe n° 3 (I3) indice]12-16]
- Classe n° 2 (I2) indice]16-20]
- Classe n° 1 (I1) indice > 20 m

B. ANALYSE DES DONNEES

Nous allons maintenant chercher à mettre en évidence d'éventuelles relations entre l'indice de fertilité et des paramètres écologiques, qu'ils soient élémentaires (altitude, texture), secondaires (Réserve utile, ETP) ou synthétiques (flore).

Nous aborderons d'abord l'étude par un traitement global de la flore. Dans un deuxième temps, nous considérerons l'influence de chaque facteur du milieu, isolé ou en couple, puis nous envisagerons un traitement de l'ensemble des variables du milieu.

1/ Analyse de la flore

Outils utilisés : Analyse Factorielle Des Correspondances (AFC)

"L'AFC est essentiellement un mode de présentation graphique de tableaux de contingence. Elle vise à rassembler en un ou plusieurs graphes la plus grande partie possible de l'information contenue dans un tableau, en s'attachant, non pas aux valeurs absolues mais aux correspondances entre les caractères, c'est-à-dire aux valeurs relatives "(Initiation à l'analyse des données - Jean de Lagarde - 1983)".

a) Par rapport au milieu

Cette analyse a pour but de caractériser les différents milieux échantillonnés grâce à la flore.

Pour réaliser cette analyse, on introduit l'ensemble des plantes bien représentées en variables actives, au même titre que les 145 relevés (la liste des plantes utilisées se trouve en annexe n° 8).

En revanche, les variables écologiques ne jouent ici qu'un rôle d'illustration (variables supplémentaires).

On cherche à mettre en évidence des affinités ou des incompatibilités entre les 91 plantes qui constituent les fichiers, afin de caractériser, grâce à des groupes de plantes stables, des milieux différenciés.

En outre, il est intéressant d'observer les corrélations entre la fertilité du Pin de Salzmann et les groupes de plantes. La superposition des variables écologiques nous fournit des éléments de description des groupes floristiques.

En résumé, cette analyse doit aboutir aux résultats suivants :

- distinction de milieux différents grâce à la flore,
- description de ces milieux grâce aux paramètres écologiques,
- évaluation de l'explication de la fertilité par la flore,
- création de groupes floristiques homogènes et stables, si possible en relation avec la fertilité de l'essence.

- Sur fichier total

La première analyse a été réalisée sur le fichier total (145 relevés). Son interprétation a été rendue difficile par la trop grande importance prise par un seul facteur : la réaction à HCl. Il apparaît donc que la flore est surtout sensible à la présence de calcaire dans le sol. Par ailleurs, la fertilité est très mal corrélée aux axes de cette analyse.

Ainsi, il est apparu comme indispensable de scinder le fichier en deux sous-fichiers :

- un sous-fichier **Roches calcaires et dolomie,**
- un sous-fichier **Roches acides.**

Le critère "Roche" a été préféré au critère "réaction à HCl" afin de conserver une certaine homogénéité dans les sous-fichiers.

Les formations dolomitiques ont été associées aux roches calcaires, malgré leur caractère acide, car du point de vue de la flore, les stations sur dolomie se rapprochent des stations sur roches calcaires (les deux possibilités ont été testées).

- Sur sous-fichier

* Analyse du sous-fichier roches calcaires et dolomie

Le fichier regroupe 69* relevés et 65 plantes (certaines ont dû être écartées en raison de leur trop rare présence).

Résultats (voir graphique n° 4)

	Inertie restituée (%)	Cumul (%)
Axe 1	10,7	10,7
Axe 2	8,0	18,7
Axe 3	5,9	24,6
Axe 4	5,5	30,1
Axe 5	5,1	35,2

Les cinq premiers axes restituent 40 % de l'inertie totale.

Interprétation des axes

Voir ci-après (tableau n° 3, 4 et 5).

* Pour éviter de donner un poids trop important à un seul type de milieu seuls deux relevés sur les 6 qui avaient été réalisés à St Lambert (84) ont été conservés.

AXE 1

-	+
Brachypodium ramosum Quercus coccifera Daphne gnidium	Crataegus monogyna Fragaria vesca Sorbus aria
	Clematis vitalba Cornus sanguinea Hedera helix Helleborus foetidus Pteridium aquilinum Quercus pubescens Viburnum lantana Viola sp.
Indices climatiques 75-84-87 (chaleur et sécheresse) Nombre de mois secs > 1,5 Pluie estivale ≤ 100 mm Indices pluie 7-8 Altitude ≤ 300 m Roches grès calcaire Topographie défavorable Cailloux en affleurement ≥ 30 % Indice fertilité 4 (mauvaise)	Climats plus humides et plus frais. Nombre de mois secs ≤ 1,5 Pluie estivale > 100 mm Indices pluie 2-3-6 Altitude > 700 m Exposition Nord Tendance limon (texture limon sableux argile sableuse) Cailloux en affleurement < 10 % Indice fertilité 2 (bonne).

AXE 1 : Axe essentiellement climatique.
Il oppose les milieux proches du littoral, de faible altitude où la sécheresse estivale est particulièrement marquée à des milieux plus frais, plus arrosés en été où l'altitude est relativement élevée.

Fertilité Salzmänn Dans le premier cas, la croissance du Pin de Salzmänn est plutôt faible (indice 8-12 m) ; dans l'autre cas, elle est nettement meilleure (indice 16-20 m).

CTR "très forte" ≥ 50 ‰ CTR "forte" ∈ [30-50 ‰ CTR "moyenne" ∈ [20-30 ‰	Echelle pour les contributions aux axes
---	---

AXE 2

-	+
Dorycnium suffruticosum	Arbutus unedo Lonicera implexa Phillyrea latifolia Ruscus aculeatus Smilax aspera) CTR "très forte"
Viburnum lantana	) CTR "forte"
Lavandula latifolia Teucrium chamaedrys	Hedera helix Ilex aquifolium) CTR "moyenne"
Pas de climat précis Exposition versant est altitude > 500 m Cailloux en affleurement ≥ 30 % Réaction HCl forte (Plutôt bonnes fertilités)	Indice climatique : 75 Mois secs 1,5 à 2 Déficit hydrique > 260 mm (max) Distance à la mer ≤ 40 km Altitude 300-500 m Roche : dolomie Tendance : sable (texture : sable) Réaction HCl faible ou nulle Zone : Bédarieux (Plutôt mauvaises fertilités).

AXE 2 : Il distingue :

- un milieu très caractérisé : terrains dolomitiques de Bédarieux sous climat chaud et sec.
- des milieux typiquement calcaires, avec un pourcentage de cailloux important. L'altitude est supérieure à 500 m.

Fertilité
Salzmann

On constate de bonnes croissances sur les terrains calcaires. En revanche les stations dolomitiques de Bédarieux ne semblent pas favorables à la croissance du Pin de Salzmann.

Tableau n° 5

AXE 3

-	+
Genista scorpius Ligustrum vulgare Lonicera etrusca Sedum sp	Arbutus unedo Lonicera implexa Phillyrea latifolia Ruscus aculeatus) CTR "très forte"
Rosa sp	) CTR "forte"
Juniperus communis	Lonicera implexa Lonicera xylosteum) CTR "moyenne"
Indice pluie 6 Pluie été 100-150 mm Mois sec (1-1,5) Exposition versant sud Distance mer 60-80 km Pas d'affleurement rocheux Pas de cailloux (< 10 %) Tendance argile-limon Test tarière 40-60 cm Plutôt bonnes RU (≥ 40 mm/cm) Pentas ≤ 10 % Bonnes fertilités	Indice pluie 2 Pluie été 150-200 mm Mois sec (0,5-1) Distance mer < 40 km Roche : dolomie Cailloux en affleurement ≥ 30 % Tendance sable Zone : St Guilhem Très mauvaises fertilités.

AXE 3 : Il distingue :

- les stations sur dolomie de St Guilhem le désert, avec un pourcentage de cailloux en affleurement non négligeable.
- des stations sous un climat relativement sec avec des sols aptes à recevoir et à garder l'eau (bonne RU, pente faible).

Fertilité
Salzmann

De très mauvaises croissances sont observées à St Guilhem. Le deuxième cas est nettement plus favorable.

Elaboration des groupes floristiques

Nous avons effectué une C.A.H. (Classification Ascendante Hiérarchique) sur les 65 plantes, grâce aux 3 premiers facteurs de l'AFC. Cette classification a regroupé les plantes selon leur proximité dans l'espace engendré par ces trois facteurs.

A partir de ces groupes plus ou moins homogènes, dépendant fortement de l'échantillonnage, nous avons cherché à élaborer des groupes de plantes véritablement représentatifs de certains milieux, grâce à la superposition des variables écologiques et de nos connaissances sur leur écologie.

Nous avons distingué 7 groupes floristiques sur milieux calcaires ou dolomitiques :

GROUPES FLORISTIQUES - MILIEUX CALCAIRES OU DOLOMITIQUES

C1	Altitude élevée Fraicheur - Humidité
<p>Pteridium aquilinum Helleborus foetidus Viola sp Crataegus monogyna Viburnum lantana Pinus sylvestris Fragaria vesca Sorbus aria * Evonymus europaeus * Coryllus avellana * Daphne laureola</p>	

C2	Etage supraméditerranéen - Bonne réserve utile
<p>Ilex aquifolium Hedera helix Lonicera xylosteum Quercus pubescens Prunus mahaleb Acer monspessulanum Ligustrum vulgare Cornus sanguinea Clematis vitalba</p>	

C3	Etage supra/mésoméditerranéen - Sol moins favorable que C2
<p>Prunus avium Buxus sempervirens Lonicera etrusca Rosa sp Genista pilosa Juniperus communis Amelanchier rotundifolia Prunus spinosa</p>	

C4	Chênaie verte installée Chaleur
<p>Quercus ilex Rhamnus alaternus Rubia peregrina Phillyrea angustifolia Rubus sp Asparagus acutifolius Lonicera implexa</p>	

C5	Etage mésoméditerranéen Sécheresse - Lieux ouverts
<p>Teucrium chamaedrys Aphyllantes monspeliensis Sanguisorba minor Leuzea conifera Teucrium polium Lavandula latifolia Dorycnium suffruticosum * Spartium junceum * Ulex parviflorus</p>	

C6	Chênaie verte Roche mère dolomie notamment
<p>Arbutus unedo Phillyrea latifolia Ruscus aculeatus Smilax aspera Clematis flammula Viburnum tinus</p>	

* Plantes peu présentes. Ajoutées ultérieurement.

GROUPES FLORISTIQUES CALCAIRE (suite)

C7	Etage mésoméditerranéen Chaleur - sécheresse Sols souvent superficiels et pierreux
Juniperus phoenicea Daphne gnidium Rosmarinus officinalis Pinus halepensis Euphorbia characias Stachelina dubia Pistacia terebinthus Thymus vulgaris Juniperus oxycedrus Erica arborea Quercus coccifera Brachypodium ramosum Helianthemum ovatum Helichrysum stoechas Cistus salviaefolius Carlina corymbosa Cistus albidus Genista scorpius Sedum sp Bupleurum fruticosum Fumana coridifolia	

* Analyse du sous-fichier roches acides

Il regroupe 72 relevés et seulement 46 plantes.

Résultats (voir graphique n° 5)

	Inertie restituée (%)	Cumul (%)
Axe 1	12,3	12,3
Axe 2	9,2	21,5
Axe 3	8,6	30,1
Axe 4	6,0	36,1
Axe 5	5,4	41,5

Les cinq premiers axes restituent 41,5 % de l'inertie totale, soit un peu plus que pour la précédente analyse.

Interprétation des axes (voir tableaux n° 6, 7 et 8)

AXE 1

Tableau n° 6

-	+
Erica cinerea Teucrium scorodonia Erica scoparia Lonicera etrusca	Cistus laurifolius Lavandula stoechas Rosa sp Thymus vulgaris Dorycnium suffruticosum
Indice pluie 2 ou 1 Pluie estivale 150-200 mm Mois sec 0,5 à 1 Distance mer > 80 km Formation superficielle : Restanques Roches : schistes et grès Grès + conglomérats Texture sable argileux limon sableux Assez bonne RU Pas de cailloux en affleurement ($\leq 10\%$) Microtopographie favorable Zone : Bessèges (30) Altitude 100-300 m	Indices pluie 6 et 8 Pluie estivale 100-150 mm Plus de 1 mois sec Distance mer ≤ 60 km Colluvions moraines moraine - gneiss Faible RU Cailloux en affleurement $\geq 10\%$ Croupes Zone : Prades (66) Altitude 700-900 m

AXE 1 : Il oppose deux zones :

- la vallée de la Têt dans les Pyrénées, région relativement sèche, malgré son altitude,
- la région de Bessèges, dans les Basses Cévennes, plus humide notamment en été.

Tableau n° 7

AXE 2

-	+
Fragaria vesca Fraxinus excelsior Lonicera xylosteum	Cistus monspeliensis Daphne gnidium Dorycnium suffruticosum Juniperus oxycedrus
Clematis vitalba Prunus avium Viola sp	
Indice pluie 3 ou 6 Pluie estivale > 200 mm Mois sec ≤ 0,5 Exposition Nord Topographie à tendance favorable (mi-versant - bas versant - thalweg) Jeunes peuplements Bonnes fertilités	Indice pluie 8 Pluie estivale ≤ 100 mm Mois sec > 1,5 Topographie défavorable (croupes, haut versant) Moraines Vieux peuplements Mauvaises fertilités.

AXE 2 : Cet axe est caractérisé par le climat et par la topographie. Il distingue d'un côté un milieu relativement humide, où la topographie est globalement favorable et où le Pin de Salzman se comporte bien et de l'autre un milieu plus sec où la topographie est défavorable et où le Pin de Salzman végète.

Tableau n° 8

AXE 3

-	+
Cistus laurifolius Genista pilosa Pinus sylvestris Sarothamnus scoparius Juniperus communis	Asparagus acutifolius Daphne gnidium Hedera helix
Indice climatique 64 Mois sec 1 - 1,5 Pluie estivale 100-150 m Roche : Gneiss Affleurement cailloux $\leq 10 \%$ Affleurement rocheux $\leq 10 \%$ Cailloux dans le sol $\leq 10 \%$ Tendance sable Faible RU < 40 mm/an Fertilité médiocre	Indices pluviométriques 6-7-8 Mois secs > 1,5 Pluie estivale ≤ 100 mm Schistes

AXE 3 : On retrouve d'un côté la région de Prades, plus précisément les stations sur moraines de gneiss.
A l'opposé, apparaît un milieu sec évoluant sur schistes.

Elaboration des groupes floristiques

(voir analyse du fichier calcaire-dolomie)

6 groupes floristiques ont pu être distingués.

GROUPES FLORISTIQUES - MILIEUX ACIDES

A1	Bonne RU Texture Sa ou Ls Caractéristique Bessèges
<i>Erica cinerea</i> <i>Erica scoparia</i> <i>Teucrium scorodonia</i> <i>Sorbus aria</i> <i>Lonicera etrusca</i> <i>Ilex aquifolium</i> <i>Pteridium aquilinum</i> <i>Castanea sativa</i> <i>Sorbus torminalis</i>	

A2	Sol moins profond, + filtrant Topographie défavorable Caractéristique Bessèges
<i>Phillyrea angustifolia</i> <i>Arbutus unedo</i> <i>Rubia peregrina</i> <i>Cistus salviaefolius</i> <i>Pinus pinaster</i> <i>Genista pilosa</i> <i>Clematis flammula</i>	

A3	Bonne RU Bonne topographie Climats variables.
<i>Quercus pubescens</i> <i>Crataegus monogyna</i> <i>Hedera helix</i> <i>Sarothamnus scoparius</i> <i>Rubus sp</i> <i>Rosa sp</i> <i>Prunus avium</i> <i>Acer monspessulanum</i> <i>Fragaria vesca</i>	

A4	Altitude élevée Humidité - Fraîcheur
<i>Lonicera xylosteum</i> <i>Viola sp</i> <i>Clematis vitalba</i> <i>Fraxinus excelsior</i>	

A5	Sol superficiel Roche fissurée
<i>Calluna vulgaris</i> <i>Erica arborea</i> <i>Juniperus communis</i> <i>Asparagus acutifolius</i> <i>Pinus sylvestris</i> <i>Cistus laurifolius</i> <i>Teucrium chamaedrys</i> <i>Polypodium vulgare</i>	

A6	Sol superficiel Sécheresse
<i>Juniperus oxycedrus</i> <i>Dorycnium suffruticosum</i> <i>Cistus monspeliensis</i> <i>Thymus vulgaris</i> <i>Lavandula stoechas</i> <i>Sedum sp</i> <i>Daphne gnidium</i> <i>*Pistacia lentiscus</i>	

- Groupes floristiques et fertilité du Pin de Salzmänn

Grâce à des analyses de variances successives, nous avons pu nous rendre compte des éventuelles relations entre l'indice de fertilité du Pin de Salzmänn et l'effectif de chacun des groupes, ramené à une valeur comparable allant de 0 à 4.

Analyse sur sous-fichiers séparés

• Sous-fichier calcaire

	Groupes floristiques							Indices de fertilité moyens
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
0	11,3	11,1	--	--	14,1	13,3	15,4	
1	13,8	12,9	12,7	12,6	12,1	11,7	12,9	
2	14,4	13,9	12,6	13,7	12,5	10,9	11,2	
3	--	--	--	11,9	(13,9)	--	--	
4	--	--	--	--	--	--	--	
P*	0,01	0,03	0,90	0,32	0,30	0,16	0,03	
	+	+					-	

Seuls trois groupes sont significatifs au seuil de 5 %.

• Sous-fichier acide

	Groupes floristiques					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
0	10,6	17,5	--	12,7	17,1	14,1
1	15,6	11,6	11,8	(18,5)	13,4	12,3
2	13,8	13,8	14,9	--	12,7	(13,6)
3	15,5	11,8	16,7	--	--	--
4	--	--	--	--	--	--
P*	0,003	0,0009	0,006	0,003	0,02	0,344
	+	-	+	(+)	-	

5 groupes sur 6 sont significatifs au seuil de 5 %.

Il apparaît donc que les groupes floristiques sur roche acide sont globalement plus liés avec la fertilité que les groupes sur roches calcaire.

On peut rapprocher ce résultat du comportement général des peuplements sur roches calcaires : leur fertilité se situe essentiellement dans la classe moyenne (analyse de variance).

* Probabilité que l'hypothèse H₀ (égalité des moyennes) soit vérifiée

Notons cependant que les groupes de plantes indiquant les meilleures fertilités ont été caractérisés par :

- une altitude élevée (étage supraméditerranéen),
- de bonnes réserves utiles.

A l'inverse, le groupe lié aux plus mauvaises fertilités est constitué de plantes indiquant un milieu chaud et sec, avec un sol souvent superficiel et pierreux. On retrouve là l'importance de l'eau pour le Pin de Salzman. Essence méditerranéenne présente à la fois dans l'étage mésoméditerranéen et l'étage supraméditerranéen, elle montre de nettes préférences pour l'étage le plus élevé, où la sécheresse estivale est moindre.

Sur roche acide, outre le climat, ce sont la texture, la profondeur du sol et l'alimentation en eau qui séparent les "bons" des "mauvais" groupes.

Analyse sur fichier total

Nous avons testé la corrélation entre la présence des groupes élaborés à partir des sous-fichiers acides et calcaires et la fertilité des stations à Pin de Salzman sur le fichier total.

Suivent les groupes qui restent bien corrélés avec la fertilité, au seuil de 5 %.

Bonne fertilité : C1 (Calcaire - Etage supraméditerranéen - Altitude élevée)
 A1 (Acide - Bessèges - Bonne RU)
 A3 (Acide - Bonne RU - Bonne topographie)
 A4 (Acide - Altitude élevée)

Mauvaise fertilité : C7 (Calcaire - Etage mésoméditerranéen - Chaleur et sécheresse - Sol superficiel)
 A2 (Acide - Etage mésoméditerranéen - Bessèges - Sol filtrant - Topographie défavorable)
 A6 (Acide - Etage mésoméditerranéen - Sécheresse - Sol superficiel).

Remarque

Ces groupes prennent en compte toutes les plantes suffisamment présentes sur chaque fichier. Il est bien évident que certaines plantes sont très significatives d'un certain milieu, bon ou mauvais pour le Pin de Salzman, tandis que d'autres sont présentes sur des milieux très variés, indifféremment.

Ces groupes sont donc par nature plus descriptifs que caractéristiques.

En revanche, il nous serait utile de déterminer s'il existe des plantes réellement caractéristiques de bonne ou mauvaise fertilité.

Pour cela, une autre analyse a été envisagée.

b) Analyse par rapport à la fertilité du Pin de Salzman

- AFC

Cette analyse s'effectue après avoir croisé les différentes classes de fertilité avec les plantes (tableau croisé). On effectue une AFC qui se servira de la fertilité pour structurer la flore et vice versa.

Les axes regrouperont donc des plantes caractéristiques liées avec des indices de fertilité Salzman identiques ou proches. Ces regroupements n'auront pas nécessairement de significations écologiques réelles.

Parmi ces plantes, seules certaines sont vraiment bien représentatives d'une ou deux classes de fertilité. Ce sont les plantes qui contribuent le plus fortement aux axes de l'analyse. Nous les avons séparées en plantes + ou en plantes -, en laissant de côté les plantes caractéristiques de la classe moyenne. Nous les avons notées dans le tableau qui suit ainsi que les groupes floristiques auxquels elles appartiennent.

CROISSANCE DU PIN DE SALZMANN

(Les lettres suivies d'un chiffre correspondent aux groupes floristiques)

Substrat rencontré	Plante -	Plante +
Acide	A5 Cistus laurifolius A6 Lavandula stoechas A2 Arbutus unedo	A1 Castanea sativa A1 Teucrium scorodonia A3 Sarothamnus scoparius A4 Fraxinus excelsior A1 Pteridium aquilinum
Divers	A6 Cistus monspeliensis	A3 Prunus avium A1 Sorbus aria A4 Viola sp A4 Clematis vitalba A3 Hedera helix
Calcaire	C3 Amelanchier rotundifolia C7 Brachypodium ramosum C7 Cistus salviaefolius C7 Daphne gnidium C7 Euphorbia characias C7 Juniperus phoenicea C4 Lonicera implexa C7 Quercus coccifera	C2 Cornus sanguinea C1 Crataegus monogyna C1 Viburnum lantana

Conformément à l'analyse précédente, on compte plus de plantes - sur substrat calcaire que sur substrat acide et vice versa. On peut rapprocher ce résultat des différentes répartitions des relevés sur roche calcaire et ceux sur roche acide selon le climat.

Les peuplements sur roche calcaire bénéficient en général de pluie d'été faible ou très faible (indice pluie 6 et 8) tandis que les peuplements sur roche acide sont plus arrosés (indices pluie 3-2-6). Il est donc normal que l'on retrouve en plantes - des plantes indiquant des milieux particulièrement chauds et secs sur calcaire.

En revanche, les bons milieux sont caractérisés aussi bien sur milieux calcaires que sur milieux acides.

Pour avoir une vision plus précise de ces groupes et pour confirmer ces résultats, nous avons entrepris un calcul d'information mutuelle.

- Information mutuelle

Grâce au calcul (voir annexe n° 9) de l'information mutuelle entre chaque espèce et l'indice de fertilité divisé en 5 classes, allant de médiocre à très bonne (ces classes correspondent aux 5 classes de l'AFC), on a pu rassembler les espèces dont la présence est relativement bien liée à la fertilité du Pin de Salzmänn.

Le calcul des fréquences relatives de chaque espèce dans chaque classe de fertilité a ensuite permis d'affirmer si l'espèce indiquait une bonne, une mauvaise ou différentes croissances sans direction privilégiée.

D'autre part, nous avons choisi de ne pas considérer comme indicatrices les plantes trop peu présentes sur l'ensemble des relevés. La limite d'effectif a été fixée à 10, mais les résultats sont d'autant plus fiables que les effectifs sont importants (voir tableau page suivante).

Trois plantes peu présentes semblent indiquer des milieux favorables au Pin de Salzman : le Noisetier (*Coryllus avellana*), le laurier (*Daphne laureola*), et la Viorne lantane (*Viburnum lantana*).

A l'issue du calcul de l'information mutuelle, nous pouvons faire un bilan des deux méthodes qui viennent d'être utilisées dans le même but :

- la majorité des plantes + et - se retrouvent dans l'une et l'autre des méthodes.

- quelques plantes n'apparaissent pas dans les résultats de l'information mutuelle, alors qu'elles ressortent dans l'AFC (*Sorbus aria*, *Euphorbia characias*). Seule une plante ne ressort que dans le calcul de l'information mutuelle : *Fragaria vesca*.

- la quasi totalité des plantes mentionnées appartiennent aux groupes floristiques déjà cités pour leur relation avec un plus ou moins bon indice de fertilité.

On peut comparer les espèces indicatrices de bonne et mauvaise croissance du Pin laricio et du Pin de Salzman, grâce à l'étude de R. COMMERÇON (1984).

On retrouve certaines espèces indicatrices de bonne croissance sur milieu

acide : Fougère aigle
Germandrée
Chataîgnier
Frêne
(Violette)

ou calcaire : Noisetier
Viorne lantane
Merisier
Frêne.

Par contre, les espèces indicatrices de mauvaise croissance ne sont pas les mêmes dans les deux cas, à deux exceptions près : le Ciste de Montpellier et l'Amélanchier.

On peut rapprocher cette constatation de la répartition des deux essences vis à vis du climat et de l'étage de végétation. En effet, le Pin de Salzman est présent dans des zones parfois nettement plus chaudes et plus sèches que le Pin laricio. Les plantes indicatrices de mauvaise croissance pour le Pin de Salzman sont en conséquence caractéristiques de zones dans l'ensemble plus sèches et plus chaudes que celles du Pin laricio.

INFORMATION MUTUELLE RESULTATS

ESPECES INDICATRICES DE BONNE CROISSANCE		Information Mutuelle	Frequence Totale	CROISSANCE DU PIN DE SALZMANN					Substrat Rencontré
				Fréquences corrigées					
				Mediocre	Mauvaise	Moyenne	Bonne	Tres bonne	
Genet à balai	<i>Sarothamnus scoparius</i>	0,185	33	0,55	0,46	0,84	1,97	1,76	ACIDE
Frêne élevé	<i>Fraxinus excelsior</i>	0,084	10	0,00	0,00	0,56	2,50	4,35	
Châtaignier	<i>Castanea sativa</i>	0,073	41	0,44	0,37	1,29	1,59	1,06	
Fougère aigle	<i>Pteridium aquilinum</i>	0,071	42	0,43	0,45	1,13	1,43	2,07	
Germandrée	<i>Teucrium scorodonia</i>	0,059	18	0,00	0,21	1,55	1,38	1,61	
Fraisier	<i>Fragaria vesca</i>	0,151	22	0,00	0,00	2,88	2,50	2,64	CALCAIRE ou DOLOMIE
Aubépine monogyne	<i>Crataegus monogyna</i>	0,110	30	0,00	0,25	1,21	2,00	1,45	
cornouiller sanguin	<i>Cornus sanguinea</i>	0,045	16	0,00	0,72	1,22	1,87	0,00	
Violette	<i>Viola sp.</i>	0,067	14	0,00	0,27	1,19	2,50	0,00	TOUS
Merisier	<i>Prunus avium</i>	0,051	16	0,00	0,24	1,57	1,25	1,81	
Clematite vigne blanche	<i>Clematis vitalba</i>	0,035	17	0,00	0,67	0,98	1,76	1,70	

ESPECES INDICATRICES DE MAUVAISE CROISSANCE		Information Mutuelle	Fréquence Totale	CROISSANCE DU PIN DE SALZMANN					Substrat Rencontré
				Fréquences corrigées					
				Médiocre	Mauvaise	Moyenne	Bonne	Très bonne	
Brachypode rameux	<i>Brachypodium ramosum</i>	0,101	23	0,39	2,50	0,61	0,22	0,63	CALCAIRE
Chèvrefeuille des Baléares	<i>Lonicera implexa</i>	0,081	22	2,10	1,91	0,63	0,23	0,00	
Chêne kermès	<i>Quercus coccifera</i>	0,069	24	0,40	2,07	0,93	0,21	0,60	
Genévrier de Phénicie	<i>Juniperus phoenicea</i>	0,047	12	1,51	1,91	0,93	0,00	0,00	
Amelanchier	<i>Amelanchier rotundifolia</i>	0,032	21	1,73	1,10	1,19	0,48	0,00	
Ciste à feuille de laurier	<i>Cistus laurifolius</i>	0,067	21	3,02	1,09	0,53	0,95	0,00	ACIDE
Arbousier	<i>Arbutus unedo</i>	0,075	21	1,29	1,64	1,20	0,00	0,00	DOLOMIE

2/ Analyse des facteurs écologiques

a) Facteurs envisagés isolément

Outil utilisé : l'analyse de variance à un ou deux facteurs.

L'analyse de variance considère un ou plusieurs facteurs préalablement découpés en classes ou en modalités.

Elle suppose l'égalité des variances et la normalité des populations d'origine.

A l'aide d'un test de Fisher, on teste l'hypothèse selon laquelle les moyennes des indices de fertilité des différentes modalités sont égales. Si cette hypothèse est vraie, le facteur considéré n'a pas d'influence significative sur la croissance du Pin de Salzmann.

Pour chaque analyse, le programme nous fournit la valeur de F et la probabilité P. Cette probabilité correspond à la valeur du risque pris dans le cas où l'on rejette l'hypothèse.

Conformément à la plupart des études, nous acceptons un risque de 5 %.

FACTEURS CLIMATIQUES

• Climat (indice du CEMAGREF)

Un regroupement préliminaire a été effectué, afin d'obtenir des modalités suffisamment bien représentées. La signification des indices climatiques du CEMAGREF se trouvent dans l'annexe n°5.

$$s = 0,0001$$

	32,33,34	65	13	55	84	86	63	64	23	75
Climat	53,44		14	25	85	87			24	
P an	++++	++	+++++	++++	+	+	++	++	++++	+
P été	++++	++	++++	+++	+	+	++	++	+++	+++
T moy	7 à 12	13	10 à 12	13	12 à 13	14 à 15	10	12	10 à 12	13
X	18.8	16.0	14.4	13.8	13.1	12.9	12.2	11.7	11.5	8.9
S	3.9	2.8	3.7	3.4	4.2	3.8	3.0	4.6	4.6	2.1
N	7	27	10	23	8	13	7	26	13	10
T	A	B	BC	BC	BC	BC	BCD	C	CD	D

X = moyenne

s = variance

N = effectif

T = test de Student

Le risque d'erreur de ce facteur est très faible (0,0001).

En revanche, il est difficile de le relier directement à l'indice de fertilité.

En effet, certains climats théoriquement favorables (23-24) sont représentés par des indices de fertilité en moyenne inférieurs à des climats théoriquement plus difficiles (64 ou même 86-87).

De même, le climat 65 serait plus favorable que des climats beaucoup plus arrosés tels 13-14-25.

Cependant, on observe une croissance significativement supérieure pour des climats caractérisés par une pluviométrie annuelle abondante (exception faite du climat 44) et une pluviométrie estivale supérieure à 220 mm (supérieure à celle de tous les autres climats cités).

• **Température (indice du CEMAGREF) P = 0,0223**

	Froid	Frais	Doux	Chaud	Très chaud	Assez chaud	
	2	3	7	5	6	4	T _m : Température moyenne annuelle
X	20.0	14.3	13.6	13.5	12.7	12.1	m : Température moyenne des minima du mois le plus froid
S	2.3	3.8	6.6	3.7	3.1	4.6	
N	3	14	3	64	10	49	
T	(0) AB	B	(0) AB	B	B	B	M : Température moyenne des maxima du mois le plus chaud
T moy	7.2	10.1	15.0	13.2	14.2	12.2	
m	-5	-1.9	5.4	0.8	2.7	0.8	
M	22.5	25.5	26.9	29.4	29.0	27.5	

On ne différencie aucune modalité de ce facteur, à cause d'un effectif trop réduit pour les modalités susceptibles d'apparaître comme différentes.

Globalement, l'indice de fertilité serait d'autant plus élevé que la température serait fraîche.

• **Pluie (indice du CEMAGREF) P = 0,0003**

Un regroupement préliminaire a permis d'obtenir des effectifs corrects.

	(4-3) 2	(1) 1	(6) 4	(2-5) 3	(8) 6	(7) 5
X	18,7	14,4	13,3	13,2	12,9	8,9
s	4,3	3,7	4,0	4,0	3,9	2,1
N	6	10	60	36	21	10
T	A	B	B	B	B	C
P an	875-1175	1640	729	996-1253	645	962
P été 147	221-240 173-189	92	112			220

L'analyse de variance permet de différencier trois groupes :

- Le plus favorable regroupe les indices de pluies 3 et 4, ce qui correspond exactement à la meilleure modalité des climats.
- Le plus défavorable correspond à l'indice de pluie 7, représenté uniquement par l'indice climatique 75.

Bien entendu, le manque de logique dans la distribution remarquée pour les climats se retrouve ici.

• **Indice de xéricité de Gaussen** = $\frac{\text{Pété (mm)}}{M (^{\circ}\text{C})}$ Avec M ($^{\circ}\text{C}$) = moyenne des maxima du mois le plus chaud.

s = 0,0001

Cet indice rend essentiellement compte de la sécheresse estivale. La zone méditerranéenne est généralement caractérisée par une valeur d'indice inférieur à 5.

	> 7 7 et +	4 < s ≤ 5 4	5 < s ≤ 6 5	6 < s ≤ 7 6	≤ 4 0
X	18,8	14,7	12,7	12,2	11,8
s	2,6	2,9	4,2	4,2	4,0
N	9	31	49	24	32
T	A	B	C	C	C

L'analyse de variance sur ce facteur distingue trois groupes. La meilleure fertilité est observée pour des valeurs d'indices supérieurs à 7. Il s'agit de stations ne se situant plus en zone méditerranéenne, même élargie.

Pour les valeurs d'indice inférieur à 7, seule la mauvaise prestation des zones à indices très faibles (≤ 4) peut s'expliquer simplement : une sécheresse estivale particulièrement intense aboutit généralement à un ralentissement ou à un arrêt de la croissance des arbres.

• **Déficit en eau annuel (ETP - Précipitations)** P = 0,0001

L'ETP représente le besoin en eau théorique de l'arbre dans un climat donné.

ETP - P illustre la nécessité de puiser dans les réserves d'eau du sol (Réserve Utile)

Ce déficit recouvre à peu près les variations climatiques.

• **Nombre de mois secs selon Gaussen** P = 0,0122

Un mois sec est défini par une valeur (en mm) des précipitations du mois inférieure à deux fois la température moyenne du mois.

	0	3	1	2	1,5
X	15,11	13,6	13,3	12,7	10,1
s	4,2	6,6	4,1	3,0	3,8
N	23	3	91	14	14
T	A	(0)	A	AB	B

Correspondance nombre de mois secs / climat

0	13 - 53 - 32 - 33 - 34
1	14 - 24 - 25 - 55 - 64 - 65
1,5	75 - 85
2	84 - 86
3	87

DESCRIPTION DES ZONES

N°	Nom	Localisations (département)	Climat
1	Zone littorale	Vallée de Maury (66) Corbières maritimes (66) Chaîne des côtes (13)	Très chaud Très sec
2	Zone viticole	Plateaux de Provence (13) Costières (30) Bassin d'Uzès et d'Alès (30) Limouxin (11) Minervois (11, 34) Plaines viticoles du Languedoc (11, 34)	Chaud sec
3	Zone des garrigues	Nord de Montpellier (34) Pli de Montpellier (34) Garrigues de Nîmes (34, 30) Garrigues gardo-ardéchoises (30, 07)	Chaud Sec
4	Zone montagnarde	Valespir et Aspres Hautes (66) Canigou (66)	Frais Très humide
5	Pyrénées méditerranéennes	Valespir et Albères Hautes (66) Aspres et Conflent (66) Roque Jalère (66) Fenouillèdes (66) Hautes Corbières Est (11)	Chaud Sec à très sec
6	Zone des Corbières	Hautes Corbières de Valmigère (11) Basses Corbières Ouest (11) Quillannais (11)	Assez chaud Sec
7	Zone de Bédarieux	Fosse de Bédarieux et Bassin du Lodévois (34)	Chaud Très Sec
8	Zone de Saint -Guilhem	Escandorgue (34) Buège et Gorges de l'Hérault (34)	Assez chaud Humide
9	Basses Cévennes	Basses Cévennes métamorphiques Basses Cévennes sédimentaires	Frais Très humide
10	Bassin Houiller	Bassin Houiller	Frais Humide

On retrouve la préférence du Pin de Salzman pour des climats arrosés en été (nombre de mois secs = 0 ou 1).

Les zones les plus défavorables connaîtraient entre 1,5 et 2 mois secs, ce qui reste difficile à expliquer.

Notons cependant, que ces zones correspondent essentiellement à l'indice climatique 75, qui se comporte particulièrement mal. Pour information, ce type de climat est localisé dans la région de Bédarieux, dans l'Hérault.

Facteurs non explicatifs

- . Q2 Quotient d'Emberger (orienté vers la reconnaissance des étages de végétation)
- . Altitude.

Conclusion partielle climat

Globalement, la croissance du Pin de Salzman semble favorisée par une pluviométrie abondante, surtout en période estivale, et par des températures relativement fraîches.

Des croissances particulièrement importantes ont été observées pour des valeurs de l'indice de xéricité supérieures à 7 et pour un nombre de mois secs inférieur à 1,5.

Le Pin de Salzman, essence méditerranéenne, marquerait donc une préférence pour des climats plus tout à fait méditerranéens, tendant vers le montagnard.

FACTEURS REGIONAUX

- Distance à la mer $s = 0,0384$

Seule la régression a permis d'obtenir un seuil suffisamment faible. Globalement, la fertilité croît à mesure qu'on s'éloigne de la mer.

- Zone

Certains regroupements ont été effectués, afin d'obtenir des effectifs suffisants. Ces regroupements ont recherché une homogénéité lithologique et/ou climatique. 10 zones recouvrent les 32 zones du départ (voir tableau ci-contre).

	4	6	9	2	1	10	3	5	8	7
X	20,4	15,9	14,4	13,8	13,6	13,6	13,1	11,7	11,3	9,3
s	1,8	2,4	3,7	3,1	5,8	3,5	3,0	4,4	5,6	2,4
N	5	5	10	17	6	24	21	32	8	9
T	A	B	BE	BD	BD	BD	BD	CD	CE	C

La zone apparaissant comme la plus favorable regroupe les types de climats les meilleurs (32, 33, 34). Elle est localisée dans le Haut-Vallespir (66).

Des croissances très correctes ont été observées dans l'ouest des Corbières et le Quillanais (zone 6) ainsi que dans les Basses Cévennes (zone 9).

A l'opposé, les croissances les plus faibles sont observées dans l'Hérault, dans les massifs de St Guilhem (8) et de Bédarieux (7). Notons que ces deux zones 8 et 7 sont homogènes vis à vis des substrats : dans les deux cas il s'agit de Dolomie.

La zone 5 semble également assez défavorable. Elle rassemble l'ensemble des Pyrénées méditerranéennes (Conflent, Vallespir et partie est des Corbières).

• Département $s = 0,0117$

	04	48	13	07	11	30	66	84	34
X	19,3	16,1	15,1	14,9	14,6	13,6	13,2	11,6	10,9
s	0	1,8	3,7	3,6	3,0	3,5	5,3	2,9	3,4
N	1	3	7	9	16	34	39	2	30
T	(A)	(A)	A	A	A	A	A	(0)	B

Nous mettons ici en évidence la croissance particulièrement faible des peuplements de l'Hérault. Or ces peuplements font partie des plus connus par les milieux scientifiques et forestiers. Cela explique peut-être la mauvaise réputation des Pins de Salzmann dans ces milieux. Notons également la position des massifs naturels dans cette analyse : le Gard, les Pyrénées Orientales et l'Hérault ne se placent pas en tête du classement.

FACTEURS STATIONNELS

• Topographie $P = 0,0024$

Ce facteur renseigne sur le caractère déficitaire ou bénéficiaire de la station par rapport aux mouvements naturels (gravitaires) de l'eau.

	Plaine vallée 0	Thalweg 1	Bas versant 2	Mi- versant 3	Plateau replat 4	Haut versant 5	Croupe sommets 6
X	18,3	15,2	14,5	13,6	13,0	11,7	10,3
s	1,6	3,4	2,8	4,2	3,2	4,4	4,9
N	3	9	19	54	25	17	18
T	(0)	A	A	AB	AB	BC	C

Pratiquement, on observe donc une augmentation de la croissance des positions hautes (croupe - sommet) aux positions basses (thalweg, bas versant).

Cependant, la modalité "plateau ou replat" serait moins favorable que la modalité "mi-versant", ce qui paraît contraire à la logique. Il est probable que cette particularité soit due au caractère hétérogène de cette modalité.

D'autre part, l'effectif de la modalité mi-versant représente le tiers de l'effectif total. Il serait donc intéressant de croiser cette modalité avec certains facteurs.

	Alluvions	Schistes ou Mica-schistes	Molasse	Grès siliceux	Calcaire dur	Grès et Conglomérats siliceux	Schistes et Grès	Grès calcaires	Marnes ou Calcaires marneux	Calcaire tendre	Gneiss	Moraines	Dolomie
	10	8	13	6	1	5	9	11	4	2	7	12	3
X	15.7	15.5	15.5	15.3	13.9	13.3	13.1	13.1	12.5	11.8	11.8	11.4	10.5
s	3.8	4.0	2.7	2.6	3.1	4.0	4.5	4.7	3.7	2.0	5.6	3.4	4.4
N	7	16	3	13	18	8	13	5	14	10	19	5	14
T	AC	A	-----	AB	AD	***	***	-----	BDE	CDE	DE	-----	E

TOPO 3 x Altitude P = 0,0034

La fertilité augmente avec l'altitude (résultat acquis par régression).

TOPO 3 x Profondeur du sol P = 0,0378

La fertilité augmente avec la profondeur du sol.

On distingue les stations où la profondeur de sol est supérieure à 60 cm de celles où cette profondeur est inférieure à 20 cm.

TOPO 3 x ROCHE P = 0,0023

En tenant compte uniquement des modalités suffisamment bien représentées, on obtient :

	8 Schiste mica	7 Gneiss	9 Schiste +grès	6 Grès siliceux	3 Dolomie
X	17,8	14,9	14,0	13,1	8,0
s	2,6	4,2	4,8	1,0	2,9
N	7	10	9	5	7
T	A	AB	B	B	C

Globalement, les roches feuilletées semblent favoriser la croissance du Pin de Salzman, peut-être parce qu'elles sont moins drainantes que les grès ou les dolomies. Cette préférence sera à mettre en parallèle avec l'analyse de la texture.

On retrouve sur cet échantillon la particulièrement mauvaise croissance observée sur dolomie.

LITHOLOGIE• **Substrat** P = 0,0262

Un regroupement a été effectué (voir tableau ci-contre).

- La fertilité du Pin de Salzman n'est visiblement pas liée à la présence ou l'absence de calcaire dans le sous-sol.
- En revanche, on distingue nettement la dolomie des calcaires. La dolomie correspond à des fertilités particulièrement basses.
- Parmi les roches calcaires, le Pin de Salzman semble préférer les calcaires durs.
- Les meilleures fertilités sont observées sur des formations alluviales, mais également sur des schistes et des grès siliceux.

• **Affleurement du substrat**

P = 0,0011

La fertilité augmente significativement dès que l'affleurement de la roche devient inférieur à 10 % de la surface.

	1	2
X	13,6	10,3
s	4,02	4,1
N	126	19
T	A	B

1 : 0 - 10 %

2 : + de 10 %

• **Formation superficielle**

P = 0,0001

	Alluvions 4	Colluvions 3	Restanques 6	Altération 2	Moraine 5
X	15,7	15,2	14,9	12,6	9,7
s	3,8	3,4	3,2	4,1	4,6
N	7	25	18	82	13
T	A	A	A	B	B

Les sols formés à partir de moraines semblent particulièrement défavorables au Pin de Salzmann. Ils sont localisés essentiellement dans la région de Prades (66).

Notons également la différence significative existant entre des sols résultant de l'altération de la roche mère (qui constituent la grande majorité) et des sols modifiés par la construction de restanques (anciennes terrasses cultivées, soutenues par un mur en pierres sèches) principalement observées dans les Basses Cévennes.

Les formations alluviales et colluviales montrent les meilleures fertilités.

Facteurs non significatifs :

. Nature du pendage (peut-être dû aux effectifs trop réduits)

FACTEURS EDAPHIQUES

- Profondeur du sol (moyenne des 5 sondages à la tarière)

$$P = 0,0245$$

	60	45	30	20	0
X	15,3	13,7	12,8	12,7	11,8
s	3,6	4,0	4,5	4,4	3,6
N	26	26	30	34	29
T	A	AB	B	B	B

Les fertilités sont nettement inférieures dès que la profondeur du sol descend sous la barre des 30 cm.

Au contraire, elles sont nettement supérieures quand la profondeur du sol excède 60 cm.

- Tendance texturale (texture simplifiée en quatre tendances)

$$P = 0,0943$$

Ce facteur ne montre pas de différence significative à 5 %, mais à 10 %. La fertilité croît des sables aux limons.

- Texture

$$P = 0,0034$$

Ce facteur a été relevé sur 62 stations

	LS 5	SA/AS 2	A 1	SI 3	S 4
X	16,7	13,8	12,4	11,1	10,9
s	2,8	2,4	3,3	5,7	4,2
N	13	8	11	17	13
T	A	AB	B	B	B
RU mm/cm sol	1,55	1,40 ou 1,70	1,7 ou 1,85	1,0	0,70

Globalement, la fertilité augmente des sables aux limons en passant par les argiles.

Les sols à texture limono-sableuse apparaissent comme très favorables.

Le Pin de Salzmann marque donc une préférence pour les sols peu drainants tout en évitant les sols lourds. En effet, malgré la bonne capacité de rétention d'eau des argiles, celles-ci restent inférieures aux limons sableux.

- Pourcentage de cailloux en affleurement $P = 0,0191$

La fertilité augmente significativement dès que la proportion de cailloux est inférieure à 30 %.

- Réserve utile (voir annexe n° 11)

1/ Calculée approximativement à partir de la tendance texturale

$$s = 0,0134$$

	RESERVE UTILE en mm							
	80	30	60	50	10	20	40	0
X	16,5	13,8	13,6	13,3	12,5	12,5	12,2	11,4
s	2,7	4,7	4,2	2,9	4,8	4,3	3,4	3,9
N	18	20	16	14	18	28	9	22
T	A	B	B	B	B	B	B	B

La fertilité augmente significativement dès que la réserve utile dépasse 80 mm.

On a pu calculer plus précisément la réserve utile pour toutes les stations où la texture avait été notée.

2/ Calculée plus précisément à partir de la texture

$$s = 0,0017$$

Le risque d'erreur est plus faible.

	RESERVE UTILE en mm					
	80	60	40	30	20	0
X	16,9	13,5	13,4	11,6	11,5	9,1
s	3,0	4,0	3,8	3,6	5,2	4,6
N	12	13	8	13	7	8
T	A	B	AB	BD	BD	D

La modalité RU < 20 mm est nettement différente de l'ensemble des modalités où la RU est supérieure à 40 mm.

- Un facteur synthétique

$$\text{QUOT} = \frac{\text{RU (mm)}}{\text{DEF (mm)}} \quad (\text{Sans unité})$$

RU : Réserve Utile
DEF : Déficit en eau

Dans un premier temps, la régression linéaire sur ce nouveau facteur nous permet d'affirmer qu'il influe sur la fertilité d'une façon monotone (le risque d'erreur est égal à 10^{-4}).

Dans un deuxième temps, un découpage en classes nous a permis de procéder à une analyse de variance. Le risque d'erreur est égal à 7.10^{-4} , ce qui reste très faible.

	43	27	18	10	0
X	16,3	14,7	13,5	12,4	11,9
s	3,3	3,7	3,4	4,6	4,0
N	17	22	22	37	47
T	A	AB	BC	C	C

Ce facteur croît avec la RU et décroît avec le déficit en eau annuel. Il illustre donc la compensation existant entre ces deux facteurs. Pratiquement, cette analyse nous permet de distinguer les valeurs de QUOT faibles (< 18) et les valeurs de QUOT supérieures à 27.

On peut donc dire que la fertilité diminue dès que la RU est inférieure à 18 fois le déficit en eau annuel. A l'opposé, elle augmente quand la RU devient supérieure à 27 fois le déficit.

• **Horizon de surface** **P = 0,0001**

Ce facteur est hautement significatif mais le protocole n'était pas suffisamment clair pour que l'on puisse l'interpréter.

	Peu organique 2	Autre 4	Organique 3	Minéral 1
X	13,8	13,2	13,0	6,9
s	3,8	0	4,4	2,8
N	97	1	39	8
T	A	(0)	A	B

Facteurs non explicatifs au seuil de 5 %

- Pourcentage de cailloux dans le sol (il est par ailleurs intégré dans la RU),
- réaction HCl terre fine.

Le Pin de Salzmänn semble indifférent à la présence de calcaire actif dans le sol.

FACTEURS HUMAINS

• **Antécédents culturaux** **P = 0,0002**

Ce facteur, très significatif, montre que la croissance du Pin de Salzmänn est favorisée par un passé agricole.

Le passé forestier serait le moins favorable.

Les autres facteurs humains n'étaient pas suffisamment bien représentés pour servir de base à une analyse valable.

FACTEURS LIES AU PEUPEMENT

• La forme $P = 0,00220$

Nous avons mis en évidence une relation entre la fertilité de la station et la forme des arbres.

	Très bonne 4	Bonne 3	Moyenne 2	Mauvaise 1
X	14,7	13,5	11,3	10,9
s	3,8	4,1	4,5	6,1
N	23	42	23	11
T	A	AB	B	B

• L'âge du peuplement $P = 0,0001$ $F = 11,96$

	30 à 50	10 à 30	50 à 70	70 à 90	90 et +
X	16,5	14,3	12,9	11,1	9,7
s	3,2	3,6	3,7	2,5	9,5
N	24	59	25	11	17
T	A	B	BC	CD	D

On met en lumière ici un phénomène troublant : l'indice de fertilité serait très bien expliqué par l'âge du peuplement mesuré. Globalement, les classes d'âges les plus basses représenteraient les meilleures fertilités et vice versa.

On peut émettre l'hypothèse selon laquelle les jeunes peuplements grandiraient sur des stations meilleures que les anciens.

En effet, les jeunes reboisements ont été effectués sur des stations sans doute plus favorables que celles où se trouvent les peuplements naturels. D'autre part, des terres agricoles ont été colonisées naturellement surtout pendant la seconde moitié du siècle. Cependant, l'analyse de variance ne nous permet pas de trancher.

Elle met simplement en évidence la participation de chaque facteur à la croissance du Pin de Salzmann. Nous constatons que le milieu mais aussi l'âge du peuplement, contribuent à cette explication.

TABLEAU RECAPITULATIF (voir page suivante)

Parmi les facteurs climatiques, seuls la pluie estivale et les indices climatiques de sécheresse estivale semblent influencer directement sur la croissance.

**ANALYSE DE VARIANCE
RECAPITULATION**

		Facteur	Favorable H50 < 10 m	Indifférent 10 m < H50 < 15 m	Défavorable H50 > 15 m
C L I M A T	***	Climat	32 - 33 - 34 53 - 44 - 65	13 - 14 - 25 63 84 - 85 - 86 - 87	64 - 75 23 - 24
	***	Pluie	3 - 4 (1175 mm)	1 - 6 - 2 - 5 - 8	7 (962 mm)
	**	Pluie été	> 200 mm		< 200 mm
	*	Mois secs	< 1,5	2 --> 3	1,5 --> 2
	***	S (sécheresse estivale)	> 7	4 --> 5	5 à 7 ou < 4
	***	Déficit hydrique	< 100 mm		200 - 300 mm
	*	Température	(2 ou 3) 7,2 °C 10,1 °C	(5 ou 7) 13,2 °C 15,0 °C	(4 ou 6) 12,2 °C 14,2 °C
R O C H E	*	Roche	Alluvions Schistes Grès siliceux	Calcaire dur Grès+conglomérats Schistes + grès	Dolomie Gneiss Calcaire tendre Calcaire marneux Marnes
	**	% Affleurement rocheux	< 10 %		> 10 %
S O L	***	Formation superficielle	Alluvions Colluvium Restanques	Altération roche mère	Moraine
	*	Affleurement rocheux	< 30 %		> 30 %
	*	Profondeur du sol	> 60 cm	45 - 60 cm	< 45 cm
	***	Texture	Limon - sableux	Sables argileux Argiles sableuses	Argile Sable limoneux Sable
	**	R U	> 80 mm/cm	40 - 80 20 - 40	< 20 mm/cm
A U T R E	**	Topographie	Plaine - vallée Thalweg	Mi-versant Plateau ou replat	Haut de versant Croupe, sommet
	***	Antécédents	Terres de culture		Forêts Landes Garrigues

Les facteurs lithologiques et édaphiques sont primordiaux pour expliquer la croissance du Pin de Salzman. Fait intéressant à noter, les stations sur roches dolomitiques sont nettement défavorables au Pin de Salzman. Par contre, si la roche Gneiss paraît défavorable, c'est sans doute parce que cette roche est souvent associée à une topographie défavorable. Plus que la nature de la roche, c'est la texture qui semble conditionner la croissance.

Le Pin de Salzman, essence rustique, pouvant se contenter de sols superficiels, présente de biens meilleures croissances dès lors qu'on lui fournit de bonnes conditions édaphiques.

Enfin, la position topographique est apparue comme l'un des facteurs du milieu les plus liés à la fertilité.

b) Facteurs envisagés par couples• **Nature du substrat - Position topographique**

Nous avons d'abord effectué un regroupement des positions topographiques en 4 modalités : favorable, mi-versant, plateau/replat, défavorable.

Sous cette forme, la position topographique explique la fertilité avec un seuil de 7.10^{-4} . Nous avons ensuite analysé l'effet conjoint de la topographie et de la nature du substrat.

Le risque d'erreur descend alors à 2×10^{-4} . Il est inférieur aux deux seuils obtenus par analyses séparées.

Tableau n° 9

SUBSTRAT	Calcaire dur	Calcaire tendre	Dolomie	Marne calcaire marneux	Grès siliceux	Gneiss	Schistes mica-schistes	Schistes grès	Alluvions
TOPO	1	2	3	4	6	7	8	9	10
0 Favorable (vallée, thalweg et bas de versant)	13,9 4		14,2 4		15,0 4				17,0 4
1 Mi-versant	16,6 4		8,0 7		13,1 5	14,9 10	17,8 7	14,0 9	
2 Plateau, replat	13,1 8	10,6 4		11,8 6					
Défavorable (haut de versant croupe, sommet)					18,3 4	5,2 6	12,4 6		

LEGENDE :

X
N

A cause des effectifs trop réduits, il ne nous est pas permis d'envisager toutes les combinaisons possibles (nous ne comparons que des modalités dont l'effectif est supérieur à 6).

Notons seulement que :

- En mi-versant, les schistes/micaschistes sont liés avec de bonnes fertilités, au contraire de la dolomie.
- Dans la modalité "plateau ou replat", les calcaires durs seraient plus favorables que les formations marneuses.
- En position topographique défavorable, des fertilités très faibles ont été observées sur les gneiss, alors qu'elles sont nettement meilleures sur les schistes et micaschistes. Par ailleurs, les fertilités observées sur ces deux roches augmentent nettement lorsque la position topographique devient un peu plus favorable (mi-versant). La différence entre les deux s'estompe alors sensiblement.

c) Facteurs envisagés simultanément

En premier lieu, nous avons pour but de décrire, à l'aide de paramètres écologiques, les milieux où se trouvent les peuplements de Pin de Salzman.

En second lieu, nous tenterons d'établir des rapprochements entre ces paramètres et la fertilité de l'essence.

- Analyse par rapport au milieu

Une première analyse, réalisée sur fichier complet, a apporté quelques éléments d'explication de la variabilité du milieu. Dans cette analyse, seuls quelques paramètres, que nous appellerons variables globales ont réellement participé à la formation des axes, parallèlement au milieu. Ce sont :

La formation superficielle
Le substrat
La topographie
La pluie (indice)
La température (indice)
L'altitude

Ces paramètres ont été préférés à tous les autres dans le but d'établir une hiérarchie dans l'explication de la fertilité. Un zonage établi grâce aux variables globales a semblé souhaitable pour une première approche.

Les autres paramètres, ainsi que la fertilité n'ont fait que se superposer à l'analyse, sans y participer.

Pourcentage d'explication des différents axes :

	%	% cumulé
Axe 1	7,6	7,6
Axe 2	6,8	14,4
Axe 3	6,0	20,4
Axe 4	5,9	26,3
Axe 5	5,3	31,6

Interprétation des axes

AXE 1

Il oppose

- Pôle -** Une zone se situant à des altitudes > 700 m, sur des substrats formés de moraines et/ou de gneiss principalement.
Les variables supplémentaires nous apprennent qu'il s'agit des régions de Prades et de Prats dans les Pyrénées Orientales. L'indice de xéricité de Gaussen supérieur à 5 caractérise généralement des milieux où le climat n'est plus tout à fait méditerranéen. On y trouve des pentes fortes et des réserves utiles assez faibles.
- Pôle +** Une zone caractérisée par un substrat formé d'alluvions, sous un climat relativement chaud, à des altitudes peu élevées.
Les variables supplémentaires nous apprennent qu'il s'agit de terrains où la réaction à HCl est positive, où les pentes sont faibles et l'indice de xéricité inférieur à 5 (milieu typiquement méditerranéen).
Cet axe est donc à la fois un axe substrat et un axe climat/altitude.

AXE 2

Il oppose

- Pôle -** Une zone caractérisée par des roches schisto-gréseuses et un indice de pluie 2 (pluie estivale assez faible, pluie annuelle abondante).
Ces milieux évoluent fréquemment sur restanques.
D'après les variables supplémentaires, il s'agit de milieux acides, à tendance sable principalement, bénéficiant de pluies estivales non négligeables.
Le nombre de mois sec est inférieur à 1.
Les pentes seraient fortes mais la profondeur du sol dépasserait 60 cm. On peut localiser ces milieux dans la région de Bessèges, dans les basses-Cévennes.
- Pôle +** On y retrouve des milieux chauds et secs sur alluvions (le nombre de mois sec est supérieur à 1). La réaction à HCl est forte.

Commentaires

Il semble que les paramètres écologiques généraux ne suffisent pas à distinguer les différents milieux. A part quelques milieux qui se retrouvent dans plusieurs axes, l'ensemble des milieux n'apparaît que partiellement expliqué par les paramètres écologiques. Nous attribuerons ce résultat au manque de continuité des zones et à l'extrême diversité des substrats et des types de climat qui de ce fait sont parfois très peu représentés.

La fertilité n'est pas bien corrélée aux axes en général. Les paramètres qui définissent les axes ne semblent pas conditionner la croissance du Pin de Salzmann.

Pour mettre en relation la fertilité avec les paramètres écologiques, nous avons effectué une analyse différente.

- Analyse par rapport à la fertilité

* 1^{ère} analyse : sur variables globales

On cherche à expliquer la fertilité à l'aide des mêmes variables globales. Les variables ne sont plus regroupées en fonction de leur proximité dans le milieu mais en fonction de la fertilité. Le regroupement rassemble donc des éléments qui ne se trouvent pas nécessairement sur la même station.

Inertie restituée :	40,9 %	Axe 1	
	26,3 %	Axe 2	
	24,6 %	Axe 3	
	8,2 %	Axe 4	100 %

On parvient par ce biais à déterminer les correspondances entre chaque indice de fertilité et certaines valeurs des variables globales. On met par ailleurs en relation la fertilité avec certaines variables stationnelles, introduites comme variables supplémentaires.

Résultats : voir graphiques n° 6 et 7 et tableaux n° 10, 11 et 12.

- ⇒ Les variables climatiques ne font qu'illustrer les variations de fertilité, mais ne les expliquent pas. Seule la pluie estivale semble participer à l'explication.
- ⇒ Parmi les variables globales, notons l'importance de
 - la formation superficielle,
 - la topographie,
 - la roche.
- ⇒ Des variables stationnelles apportent une information non négligeable. Il serait peut être bon de les intégrer à l'analyse, au même titre que les variables globales.

Parmi ces variables stationnelles, citons :

- la texture de la terre fine,
- l'abondance des cailloux,
- la profondeur du sol.

Interprétation

• Les très mauvaises fertilités ($H < 8$ m) sont observées dans des milieux caractérisés par :

le substrat	→ gneiss ou dolomie,
la topographie	→ défavorable,
la tendance texturale	→ sableuse,
la formation superficielle	→ moraine notamment.

Il est facile de reconnaître deux zones distinctes :

Les moraines gneissiques de la région de Prades (66)
(altitude ≥ 700 m Topographie défavorable)

Les arènes dolomitiques du massif de St Guilhem le désert ou de Bédarieux (34).

• Les très bonnes fertilités ($H > 20$ m) sont observées dans des milieux caractérisés par:

- une pluie estivale supérieure à 200 mm,
- une altitude élevée.

Les indices climatiques les plus favorables (32-33-34) sont essentiellement localisés dans le haut-Vallespir. La pluie estivale y est supérieure à 240 mm et l'altitude dépasse les 1000 m. Ces conditions ne concernent qu'un faible nombre de relevés.

• Considérons maintenant la majeure partie des peuplements, en excluant les deux extrêmes. Globalement l'indice de fertilité s'échelonne de 8 à 20 m.

Les fertilités minimales semblent être observées dans des milieux où :

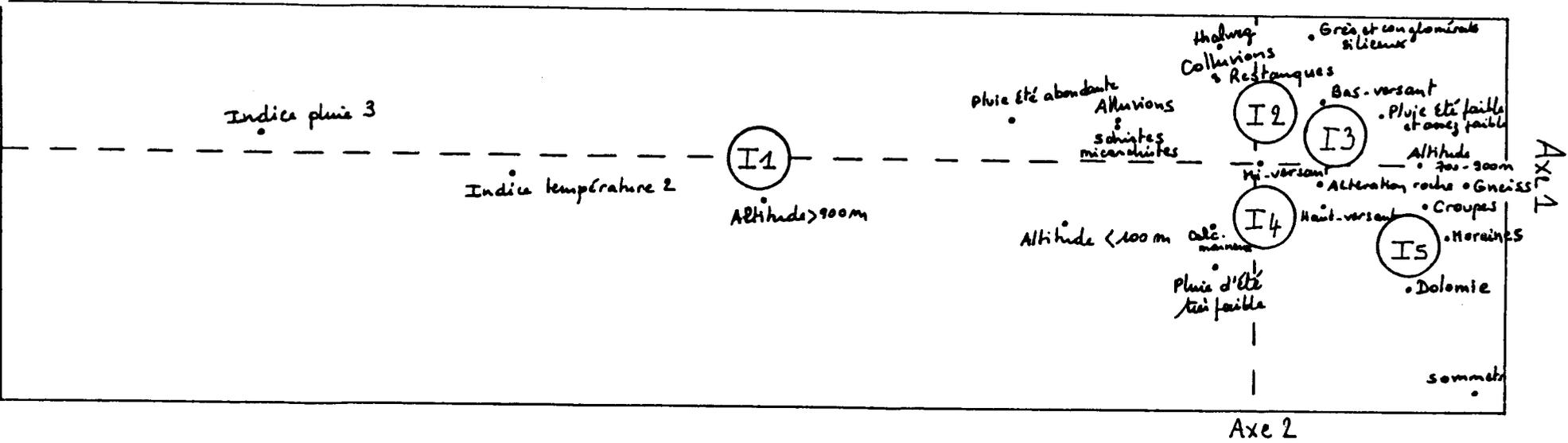
- la distance à la mer est faible ≤ 40 km,
- la pluie d'été est faible (sécheresse estivale marquée),
- la topographie est défavorable,
- le pourcentage de cailloux est non négligeable (≥ 30 %),
- la profondeur du sol est inférieure à 60 cm,
- la texture est argileuse, sableuse ou équilibrée.

A l'opposé, on observe de bonnes ou moyennes fertilités dans des milieux où :

- la distance à la mer ≥ 80 km,
- la formation superficielle est caractérisée par des colluvions ou restanques,
- le substrat est formé de roches acides (grès, conglomérats siliceux),
- la topographie est nettement favorable,
- le pourcentage de cailloux est très faible (< 10 %) ainsi que l'affleurement rocheux,
- la profondeur du sol est supérieure à 60 cm,
- la texture est limoneuse.

Graphique n° 6

Représentation des principaux paramètres écologiques
 et de l'indice de fertilité dans le plan 1-2 de l'AFC
 Variables écologiques / Indices de fertilité

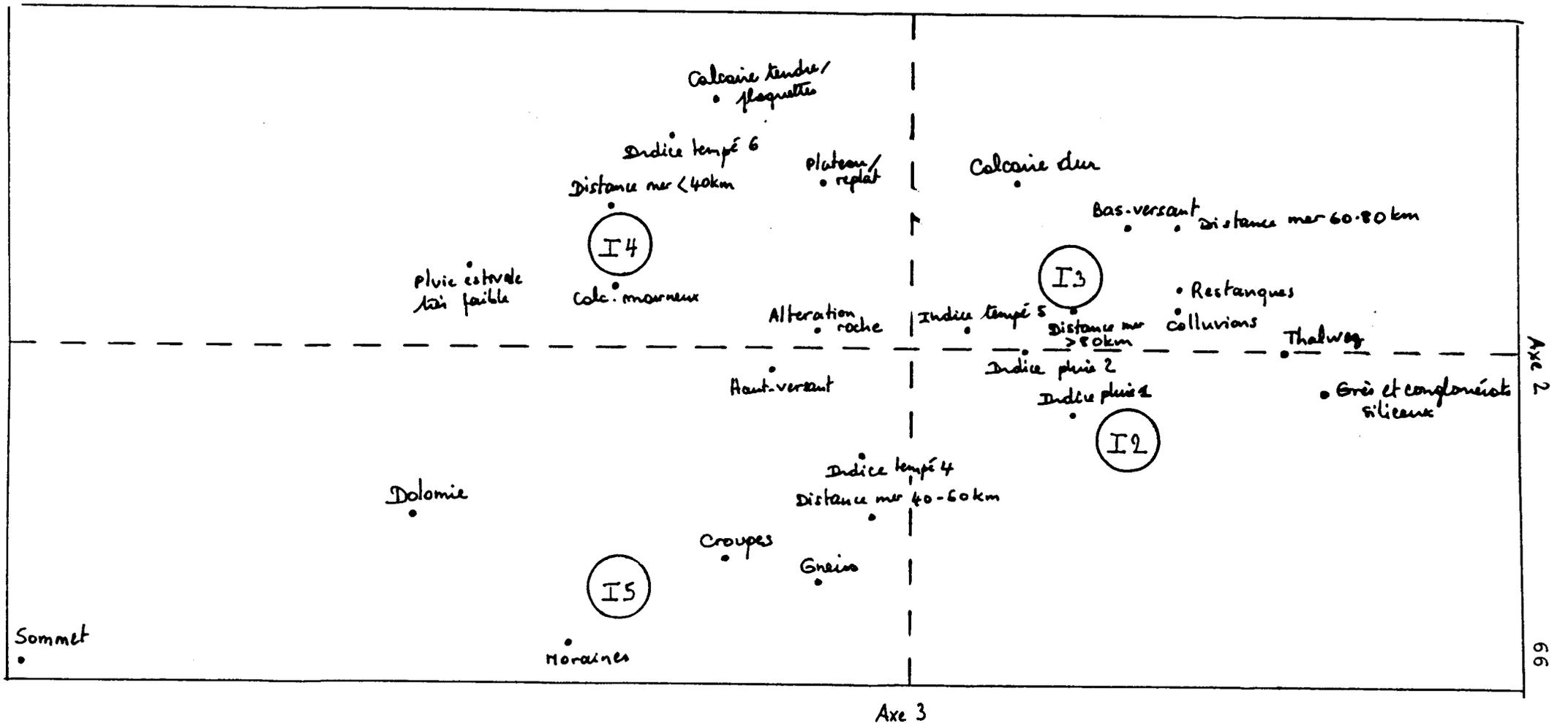


Graphique n° 7

Représentation des principaux paramètres écologiques

et de l'indice de fertilité dans le plan 2-3 de l'AFC

Variables écologiques / Indices de fertilité



AXE 1 -

I 1

Indices climatiques 32 - 33 - 34 (très arrosé, frais)

Pluie d'été ≥ 200 mm (Abondante)Altitude ≥ 900 m (la plus élevée)—→ Affleurement roche et cailloux ≤ 10 % (minimal)

Exposition Est

Tendance texturale : limon (texture limono-sableuse)

Profondeur du sol ≥ 40 cmRéserve utile ≥ 60 mm/cm de sol

Zone HAUT VALLESPIR principalement

I 5 (I3)

Pluie d'été 100-150 mm (assez faible)

Roches gneiss, dolomie

—→ Pourcentage de cailloux dans le sol élevé (≥ 60 %)Affleurement rocheux ≥ 10 %

Exposition ouest

Microtopographie défavorable

Profondeur du sol ≤ 40 cmRéserve utile ≤ 60 mm/cm de sol

Zone CONFLENT - St Guilhem-le-Désert

AXE 1 +

(Les premiers facteurs cités sont des variables actives dans l'analyse ; les facteurs suivant la flèche sont des variables d'illustration uniquement. Les premières sont globales, les autres stationnelles.)

Les indices de fertilité bien corrélés aux axes ont été notés dans la partie supérieure gauche de chaque case.)

AXE 2 -

I 5 I 4

Pluie d'été ≤ 100 mm (très faible)

Distance à la mer ≤ 40 km (faible)

Roches dolomie, marnes, calcaires marneux, moraines

Topographie défavorable (sommet, haut de versant)

→ Pourcentage de cailloux en affleurement et dans le sol ≥ 30 %

Roche en affleurement ≥ 10 %

Tendance texturale : équilibrée (texture argile - sable limoneux)

Profondeur du sol ≤ 60 cm

Déficit hydrique important. Mois sec $\geq 1,5$

Zone BEDARIEUX ou "LITTORAL CALCAIRE"

I 3 I 2

Distance à la mer ≥ 80 km

Roches grès siliceux, grès + conglomérats siliceux

Formation superficielle : colluvions ou restanques

Topographie bas versant ou thalweg

→ Peu de cailloux ≤ 10 %

Pas de roche en affleurement

Exposition nord-est

Tendance texturale limon (texture argilo-sableuse ou limono-sableuse)

Profondeur du sol ≥ 60 cm

Microtopographie favorable

Zone CORBIERES OCCIDENTALES - Basses Cévennes

AXE 2 +

AXE 3 -

I 5 (I2)

Formation superficielle : moraines

Roche : gneiss

Altitude ≥ 700 m

Distance à la mer 40 - 60 km

Topographie croupes-sommets

—→ Peu de cailloux en affleurement comme dans le sol (≤ 10 %)

Affleurement rocheux ≥ 10 %

Exposition Nord

Tendance sable (texture sablo-limoneux ou sable)

Réaction HCl nulle

I 4 (I3)

Roches : calcaire dur, calcaire tendre ou en plaquettes, grès calcaire

Altitude relativement faible

Topographie plateau/replat ou haut de versant

—→ Cailloux dans le sol et en affleurement ≥ 10 %

Exposition sud-est

Réaction HCl forte Microtopographie défavorable

Tendance argile ou équilibrée (texture argile, arg. sableuse ou sable argileux)

Pente faible

Nombre de mois sec ≥ 2

AXE 3 +

** 2ème analyse : sur variables mixtes*

A l'issue de cette étape, il nous a paru intéressant d'envisager de nouveau une analyse par rapport à l'indice de fertilité, en introduisant en tant que variables principales tous les paramètres, qu'ils soient globaux ou stationnels, bien corrélés avec les axes de l'analyse précédente.

- Ce sont
- la formation superficielle,
 - la topographie et la pente,
 - le pourcentage de cailloux en affleurement,
 - le pourcentage de cailloux dans le sol,
 - la tendance texturale et la texture,
 - la profondeur de sol,
 - la pluie estivale.

La nature du substrat en a été exclue à cause de sa grande diversité et de la bonne corrélation qui existe entre la roche et la tendance texturale.

Inertie restituée :		Cumul
Axe 1	39,3 %	39,3 %
Axe 2	30,5 %	69,8 %
Axe 3	18,3 %	88,1 %
Axe 4	11,9 %	100 %

Elle est comparable à celle que nous avons obtenue précédemment.

Interprétation des axes

AXE 1

Il oppose

- Pôle -
- Des sols limoneux, profonds (> 60 cm) avec très peu de cailloux (< 10%)
 - Des topographies très favorables (thalweg-vallon). Des pente faibles (5 à 10 %)
 - Des milieux bénéficiant de restanques et de colluvions
- indices de fertilité > 16 m
- Pôle +
- Des sols caillouteux (en affleurement > 30 % et dans le sol > 60 %) peu profonds (20-40 cm) et sableux.
 - Des topographies très défavorables (sommets) et des pentes assez fortes (30 à 50 %)
 - Des moraines
 - Une pluie estivale très faible
- indices de fertilité < 12 m

AXE 2

Il oppose

- Pôle -
- Des sols à texture argileuse ou équilibrée avec une proportion de cailloux non négligeable
 - Une topographie plateau-replat
 - Une pluie d'été très faible
- indices de fertilité 8-12 m
- Pôle +
- Des sols à texture sableuse, avec très peu de cailloux (< 10 %)
 - Des moraines
 - Une topographie défavorable (croupes)
- indices de fertilité < 8 m (exceptionnellement 16-20 m)

AXE 3

Il oppose

Pôle -

- Des sols à texture argilo-sableuses ou sablo-argileuses, peu profonds
- Des topographies favorables (bas-versant)
- Une pluie estivale assez faible (150-200 mm)

→ indices de fertilité (12-16 m)

Pôle +

- Des sols profonds
- Des topographies très favorables (vallée), des pentes faibles (5-10 %)
- Des formations alluvionnaires
- Une pluie estivale très faible

→ indices de fertilité > 20 m

V - VERS UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DES POTENTIALITES DU PIN DE SALZMANN

1/ Essais de clé dichotomique

Les travaux d'autécologie menés par le CEMAGREF ont généralement abouti à une clé dichotomique permettant grâce à quelques critères discriminants d'établir une prédiction plus ou moins précise de la croissance en hauteur des essences considérées.

Nous avons tout d'abord cherché à établir une telle clé pour le Pin de Salzmann mais il nous est vite apparu que la diversité des cas à envisager et les limites de l'échantillonnage nous empêchaient d'obtenir une clé qui à la fois prenne en compte la majorité des situations observées et aboutisse à une précision satisfaisante.

En effet, au bout de deux ou trois dichotomies, nous étions contraints de constater d'une part, que l'effectif ne nous permettait pas de continuer le traitement et d'autre part, que la précision obtenue à ce niveau restait trop faible.

Le fait d'envisager la croissance à travers une unique succession de critères hiérarchisés occultait une grande partie de son explication.

C'est pourquoi une autre approche a été envisagée. Au premier abord, elle paraîtra moins rationnelle que la première, mais elle a l'avantage d'envisager la quasi-totalité des cas rencontrés et aboutit à une précision acceptable.

2/ Utilisation de la CAH de l'analyse des facteurs écologiques

A partir de la CAH effectuée sur les relevés en fonction des 3 premiers facteurs de l'AFC sur les variables les plus discriminantes (cf. fin du chapitre précédent), nous avons cherché à savoir, pour chaque groupe de la CAH, ce qui le caractérisait dans les facteurs du milieu qui avaient été retenus, et si il présentait une certaine homogénéité au point de vue de la fertilité. Certains des groupes les plus homogènes de la CAH pouvaient être repris tels quels. Pour le reste, une manipulation "à la main" des relevés a presque toujours été nécessaire. Ainsi, les groupes de la CAH ont été épurés, divisés ou regroupés de telle façon à obtenir des groupes :

- suffisamment importants en effectif,
- bien caractérisés du point de vue de l'écologie,
- aussi précis que possible vis à vis de l'indice de fertilité.

A l'issue de cette étape, et grâce aux connaissances acquises pendant la recherche d'une clé dichotomique, nous nous sommes tournés vers deux découpages basés sur deux facteurs du milieu dont l'influence primordiale est apparue lors des différents traitements successifs :

- la pluie estivale,
- la tendance texturale.

Résultats

Les deux découpages proposent deux angles sous lesquels aborder la prédiction.

Dans chaque approche et cela constitue une différence notable par rapport aux études précédentes, **LES INTERSECTIONS ENTRE GROUPES NE SONT PAS NECESSAIREMENT VIDES.**

Ces cas écologiques non parfaitement distincts nous ont paru une solution très intéressante dans la mesure où il existait relativement peu de relevés qui, de plus, présentaient une grande dispersion au point de vue de l'écologie.

Cette solution nous a permis de considérer l'ENSEMBLE DES RELEVÉS, alors qu'un découpage classique ne nous aurait permis de prendre en compte qu'une partie de ces relevés.

D'autre part, il peut être souhaitable de comparer deux prédictions pour mieux situer le niveau de croissance auquel on peut s'attendre. Le fait qu'un même relevé puisse participer à l'élaboration de plusieurs groupes signifie que ses caractéristiques écologiques sont appréhendées de plusieurs points de vue qui chacun est déterminant pour la croissance du Pin de Salzmann. Il ne peuvent être pris en compte simultanément, faute d'un échantillon suffisant. Exemple : les groupes écologiques PAF1 et PAF2 (voir tableau "pluie estivale assez faible" qui va suivre)

Le premier découpage, basé sur la pluie estivale, propose une prévision de la croissance dans 19 conditions écologiques. Il a permis de prendre en compte 90 % des relevés effectués.

Le second découpage, basé sur la tendance texturale, propose une prévision de la croissance dans 13 conditions écologiques. Il recouvre 77 % des relevés effectués.

Les relevés qui ne rentrent dans aucun des cas cités sont soit très marginaux au point de vue de l'écologie soit douteux au point de vue de la fiabilité des paramètres écologiques.

3/ Utilisation des tableaux regroupant les cas écologiques

Dans ces tableaux, on peut lire de gauche à droite et pour chaque cas écologique

- le nom du cas écologique,
 - la moyenne de l'indice de fertilité, son écart type, ses valeurs minimales et maximales,
 - son effectif.
- Sous ces valeurs figure une représentation de la fourchette de l'indice de fertilité replacée sur l'échelle des 5 classes de fertilité.
- les facteurs qui ont servi à discriminer le cas écologique des autres cas (vrais pour tous les relevés du cas),
 - les facteurs précisant le cas sans le conditionner (vrais pour la majorité des relevés, mais pas pour tous),
 - les facteurs induisant une variation de croissance à l'intérieur du cas.

Dans la pratique, pour déterminer sur le terrain si un site est favorable ou non au Pin de Salzmann, il faudra :

1. Se situer dans les 4 modalités de la pluie estivale pour choisir le tableau à utiliser.
2. Déterminer, grâce aux facteurs discriminants mentionnés, le ou les groupes dans lesquels on se situe. Si aucun des groupes ne convient, on peut essayer de se rapprocher des groupes existants. Si ce n'est pas possible, le milieu à tester n'a jamais été rencontré dans l'échantillonnage.
3. Vérifier, grâce aux facteurs descriptifs complémentaires, que le milieu dans lequel on se trouve n'est pas trop éloigné du milieu réellement étudié.
4. Prendre connaissance de la moyenne de l'indice de fertilité sur le groupe, et de la fourchette de croissance rencontrée. Les variations internes peuvent servir à préciser le diagnostic.
Vous avez alors une prédiction de la hauteur à 50 ans du Pin de Salzmann sur votre milieu.

TABLEAUX AVEC ENTREE PAR LES PLUIES ESTIVALES

PLUIE ESTIVALE TRES FAIBLE Indices pluie 7 et 8

MOY	ET	Min	Max	N	Facteurs discriminants	Facteurs descriptifs	+ / -	Variations internes
PTF1	9,1	2,2	5,6	11,9	8	Topographie défavorable Formation superficielle: altération de la roche mère Pourcentage de cailloux dans le sol >10%	Pente généralement <30% Roches diverses Altitude <=600m Distance mer <=50 km Mois secs: >1,8 Groupes floristiques Présents : A2 A6 C4 C5 C7 Absents : A1 A4 C1	
	V	IV	III	II	I			
	>-----<							
PTF2	9,2	1,7	7,3	11,9	7	Topographie : croupe ou sommet	Pentes généralement < 30 % Roches diverses Altitude < 400 m Distance mer < 50 km Mois secs >1,7 Groupes floristiques Présents : A2 A6 C4 C7 Absents : A1 A4 C1	+ Tendances argile et limon - Tendances sable et équilibrée
	V	IV	III	II	I			
	>-----<							
PTF3	10,2	1,7	8,2	12,3	5	Topographie : Plateau / replat Pente < 10 % Pourcentage de cailloux dans le sol > 30 %	Tendance équilibrée ou argile Roches calcaires Test tarière < 30 cm Altitude < 450 m Mois secs >1,7 Distance mer < 50 km Groupes floristiques Présents : A2 C3 C4 C7 Absents : aucun	
	V	IV	III	II	I			
	>-----<							
PTF4	11,2		8,2	15,6	12	Topographie favorable ou neutre Test tarière < 50 cm	Tendance argile ou équilibrée Pentes généralement faibles Roches plutôt calcaires Cailloux dans le sol > 10 % Altitude < 450 m Distance mer <50 km Groupes floristiques : Présents : A2 A3 A5 A6 C3 C4 C7 Absents : aucun	+
	V	IV	III	II	I			
	>-----<							

PLUIE ESTIVALE TRES FAIBLE Indices pluie 7 et 8 (suite)

MOY	ET	Min	Max	N	Facteurs discriminants		Facteurs descriptifs	+ / -	Variations internes
							Altitude < 400 m Distance mer < 40 km Roches calcaires Affleurement rocheux < 10 % Groupes floristiques : Présents : C3 C4 C7 Absents : C2		
PTF5	11,3	1,4	9,5	13,2	5	Test tarière 10 - 40 cm			
	V	IV	III	II	I	Tendance argile Pourcentage cailloux dans le sol > 10%			
							Altitude 200 - 400 m Distance mer 40 km Pourcentage cailloux > 10 % Groupes floristiques Présents : C4 C6 C7 Absents : C1 C2	+	Restanques
PTF6	9,2	2,5	6,6	13,0	5	Roche Dolomie			
	V	IV	III	II	I	Tendance sable			
PTF7	9,7	1,9	7,3	12,3	6	Tendance équilibrée	Altitude < 450 m		
	V	IV	III	II	I	Pente < 30 % Test tarière < 30 cm Pourcentage de cailloux dans le sol >= 10 %	distance mer < 60 km Roches diverses		

PLUIE ESTIVALE FAIBLE Indice pluie 6										
MOY	ET	Min	Max	N	Facteurs discriminants		Facteurs descriptifs		+ / -	Variations internes
15,3	2,1	12,5	18,2	10	Tendance sable		Roche gneiss sur 6 relevés Climat indices 64 ou 65 Distance mer 20 - 70 km Groupes floristiques : Présents : A3 A5 Absents: aucun	+	Présence groupe A4	
V	IV	III	II	I	Topographie favorable ou neutre Test tarière > 20 cm ou pente < 50 %					
>-----<										
5,5	2,1	3,3	9,3	7	Roche gneiss et / ou moraine		Climat indice 64 Pente < 40 % Tendance sable ou équilibrée Altitude 700 - 900 m Distance mer 60 km Groupes floristiques : Présents : A5 Absents : A1 A4	+	Tendance équilibrée	
V	IV	III	II	I	Topographie défavorable Test tarière < 40 cm					
>-----<										
15,8	2,3	11,0	18,5	11	Tendance limon		Climat indices 64 ou 65 Distance mer 30 - 60 km Plutôt roches acides Groupes floristiques Présents : A3 Absents : C6	-	Pente > 40 %	
V	IV	III	II	I						
>-----<										
16,7	1,4	14,2	18,5	8	Tendance limon		Groupes floristiques Présents : A3 Absents : C6			
V	IV	III	II	I	Pente <20 % ou test tarière > 30 cm					
>-----<										
13,3	1,9	10,1	15,3	8	Tendance argile ou équilibrée		Altération de la roche mère Pente < 20 % Groupes floristiques Présents : C3 C4 C7 Absents : aucun	+	Tendance argile	
V	IV	III	II	I	Roche calcaire Topographie plateau / replat					
>-----<										
14,6	1,5	12,6	18,0	12	Tendance argile		Colluvions ou altération roche Climat indices 64 ou 65 Groupes floristiques Présents : C2 C3 C4 C5 C7 Absents : C6			
V	IV	III	II	I	Roche calcaire ou molasse					
>-----<										
12,7		9,5	17,2	10	Tendance équilibrée		Cailloux dans le sol >10 % Roche calcaire dur essentiellement Groupes floristiques : Présents : C3 C4 C5 Absents : aucun	+	Absence groupe C6	
V	IV	III	II	I	Roche calcaire					
>-----<										

COMMENTAIRES DU TABLEAU "PLUIE ESTIVALE FAIBLE"
--

Ce tableau, pouvant servir pour réaliser une prédiction ponctuelle, peut également être riche d'enseignements.

- Les plus mauvaises croissances ont été observées dans le cas PF2 où la roche intervient en facteur discriminant (Gneiss et/ou moraine).
Ce type de milieu est très localisé : il se situe exclusivement dans une zone du confluent.
- Si l'on regarde le cas PF1, on remarque que là aussi, nombre de relevés ont été réalisés sur des gneiss. Pourtant, la croissance serait ici bien meilleure. Les critères qui semblent ici conditionner la croissance sont la topographie et la profondeur du sol.
- Pour illustrer les interpénétrations des groupes, chacun peut remarquer que le groupe PF4 est entièrement compris dans le groupe PF3. Le groupe PF4 présente une fourchette de croissance plus réduite que PF3, mais le nombre inférieur de relevés rend l'information moins sûre.
- Au sein du groupe PF5, les relevés sur tendance argile sont en général meilleurs que les relevés sur tendance équilibrée (variation internes).
Les groupes PF6 et PF7 illustrent cette constatation.

PLUIE ESTIVALE ABONDANTE						Indice pluie 1 ou 3		
MOY	ET	Min	Max	N	Facteurs discriminants		Facteurs descriptifs	
								Topographie mi- ou bas-versant
								Pente > 30 %
								Tendance sable
PA1	15,2	3,0	10,6	18,7	6	Climat indice 13 ou 14	Distance mer 70 - 80 km	
	V	IV	III	II	I	Test tarière > 35 cm	Roches acides	
								Groupes floristiques :
								Présents : A1 A2
								Absents : A4 A6
								Topographie mi- ou bas-versant
								Pente > 30 %
								Test tarière > 20 cm
								Roches variées
PA2	20,4	1,8	17,6	22,3	5	Climat indices 32 33 34	Cailloux dans le sol >10 %	
	V	IV	III	II	I	Nombre mois secs = 0	Altitude >1000 m	
								Distance mer 40 - 50 km
								Groupes floristiques :
								Présents : A3 A4
								Absents : A2 A5 A6

TABLEAUX AVEC ENTREE PAR LES TEXTURES DU SOL

TENDANCE ARGILE

MOY	ET	Min	Max	N	Facteurs discriminants	Facteurs descriptifs	+ / -	Variations internes
						Altitude < 400 m Distance mer < 40 km Roche : calcaire ou grès calcaire		
11,3	1,4	9,5	13,2	5	Pluie estivale très faible / Indice pluie 7 ou 8 Test tarière 10 - 40 cm Pourcentage cailloux dans le sol >= 10%	Affleurement rocheux < 10 % Groupes floristiques : Présents : C3 C4 C7 Absents : C2		
V	IV	III	II	I				
>-----<								
						Colluvions ou altération roche Climat indices 64 ou 65 Groupes floristiques		
14,6	1,5	12,6	18,0	12	Pluie estivale faible / indice pluie 6 Roche calcaire ou molasse	Présents : C2 C3 C4 C5 C7 Absents : C6		
V	IV	III	II	I				
>-----<								

TENDANCE EQUILIBREE

MOY	ET	Min	Max	N	Facteurs discriminants	Facteurs descriptifs	+ / -	Variations internes
					Pluie estivale très faible	Roches calcaires		
9,7	1,9	7,3	12,3	6	Pente < 30 % Test tarière < 30 cm Cailloux dans le sol > 10 %	Topographie plateau / replat ou défavorable		
V	IV	III	II	I				
>-----<								
						Altération de la roche mère Pente souvent < 30 % Test tarière < 30 cm	-	Distance mer < 30 km
12,7		9,5	17,2	10	Pluie estivale faible Roche calcaire	Cailloux dans le sol > 10 %		
V	IV	III	II	I				
>-----<								

TENDANCE SABLE

	MOY	ET	Min	Max	N	Facteurs discriminants	Facteurs descriptifs	+ / -	Variations internes
TS1	15	3,2	10,1	20,2	11	Pluie indices 2 6 7 8 Formation superficielle : restanques >-----<	Test tarière souvent > 60 cm Absence de roches calcaires Nombre mois secs = 1 (ou 1,8) Groupes floristiques : Présents : A1 A2 Absents : A4	+	Absence groupe A6
	V	IV	III	II	I				
TS2	15,5	2,5	12,0	19,1	12	Pluie indices 2 ou 6 Restanques ou colluvions Test tarière > 40 cm >-----<	Roches acides variées Pente < 40 % Groupes floristiques : Présents : A1 A2 A3 Absents : A4 A6	+	Cailloux dans le sol < 10 %
	V	IV	III	II	I				
TS3	15,2	1,9	12,5	18,2	8	Pluie indices 2 ou 6 Test tarière < 40 cm Cailloux dans le sol < 60 % Topographie favorable ou neutre >-----<	Surtout pluie indice 6 Absence roches calcaires Absence dolomie Pente < 40 % Cailloux dans le sol > 10 %	-	Moins de 4 plantes du groupe A3
	V	IV	III	II	I				
TS4	5,5	1,8	3,3	8,4	8	Pluie estivale non abondante Test tarière < 40 cm Topographie défavorable >-----<	Roches acides (surtout gneiss) Parfois moraines Pente < 40 %		
	V	IV	III	II	I				
TS5	16,5	3,2	10,6	20,4	9	Pluie estivale abondante Test tarière > 30 cm >-----<	Roches acides Topographie favorable ou neutre Cailloux dans le sol > 10 %	+	Pluie indice 3
	V	IV	III	II	I				

TENDANCE LIMON

MOY	ET	Min	Max	N	Facteurs discriminants	Facteurs descriptifs	+ / -	Variations internes
TL1	17,3	2,7	13,8	21,4	9	Test tarière > 25 cm Colluvions , alluvions , ou restanques	Topographie mi- ou bas-versant Pente rarement > 40 % Pas de roche calcaire Texture limono-sableuse Nombre mois sec 0 - 2,8 Groupes floristiques : Présents : A1 A3 Absents : aucun	
	V	IV	III	II	I			
>-----<								
TL2	16,6	2,3	13,2	20,4	13	Test tarière > 25 cm Pente < 20 %	Texture limono-sableuse Roches variées Nombre mois secs 1 - 2,8	
	V	IV	III	II	I			
>-----<								
TL3	10,6	2,9	5,6	13,6	6	Test tarière < 30 cm Pente > 40 %	3 relevés sur moraines Roches acides Nombre mois secs 1 - 2	
	V	IV	III	II	I			
>-----<								
TL4	15,4	3,6	10,3	21,4	12	Roche : Schistes Micaschistes ou formations schisto - gréseuses	Pente souvent <40 % Nombre mois secs 0 - 2,8	+ Restanques ou colluvions
	V	IV	III	II	I			
>-----<								

COMPLEMENT

Comparaison des exigences écologiques des différents Pins noirs

EXIGENCES ECOLOGIQUES : COMPARAISON

		Pin noir d'Autriche	Pin laricio de corse	Pin de Salzman
CLIMAT	Etage bioclimatique Aire naturelle	Méditerranéen - montagnard à Montagnard humide	Méditerranéen - montagnard	Méditerranéen à Méditerranéen - montagnard
	Résistance au froid	Bonne	Limitée	Incertaine
	Résistance à la sécheresse	Bonne	Faible	Bonne
SUBSTRAT	Substrat aire naturelle	Roches dolomitiques	Roches siliceuses	Roches diverses En Espagne : roches calcaires
	Comportement / Calcaire	Indifférence si RU >100 mm	Croissance moindre	Indifférence

EXIGENCES ECOLOGIQUES (commentaires)

Par rapport aux deux sous-espèces avec lesquelles il a été comparé, le Pin de Salzman est sans nul doute le plus méditerranéen.

D'après les plantations comparatives de provenances de l'I.N.R.A., localisées sous des climats de type océanique, le Pin de Salzman serait inadapté à de telles situations, dans lesquelles les dégâts dus au froid sont importants et où sa croissance est particulièrement faible.

Cependant, en Espagne le Pin de Salzman est parfois soumis à de rudes hivers secs, auxquels il résiste bien. La variété hispanique serait à ce point de vue la plus adaptée.

CONCLUSION

Les peuplements de *Pinus nigra* subsp. *clusiana* couvrent à peine 2000 ha en France contre environ 350 000 ha en Espagne. Son aire naturelle, typiquement en régression, le situe de l'étage mésoméditerranéen supérieur à l'étage supraméditerranéen, ce qui le place comme le plus méditerranéen des Pins noirs de l'ouest de l'Europe.

Dans l'absolu, sa croissance, comparable à celle du Pin noir d'Autriche est inférieure à celle du Pin laricio de Corse (à 50 ans sa hauteur dominante va de 4 à 22 m).

Sa répartition dans le sud de la France, qu'elle soit naturelle ou artificielle est très hétérogène. Outre les trois grands massifs naturels, les milieux sont particulièrement divers et peu représentés. Toutefois, des constances sont apparues quant aux facteurs conditionnant sa croissance.

Ce sont :

- La pluie estivale
- La texture du sol (en relation avec la nature du substrat)
- La profondeur du sol
- La position topographique

Le bilan hydrique revêt donc une importance primordiale.

Si son écologie prouve que le Pin de Salzmann est adapté à des conditions difficiles, que ce soit par la pauvreté et la faible profondeur du sol ou par l'intensité de la sécheresse estivale, sa croissance est bien meilleure quand ces facteurs limitants n'existent pas.

De par sa rusticité, le Pin de Salzmann peut être utilisé comme essence de protection, au même titre que le Pin noir d'Autriche, bien qu'il semble sensible à des températures trop basses. En revanche, sa croissance n'est pas limitée par la présence de calcaire actif dans le sol.

Dans les stations où sa croissance n'est pas limitée, il peut représenter une production de bois intéressante, dont la qualité serait proche de celle du bois de Pin laricio.

Pour conclure, cette essence "en déclin", retirée sur des milieux souvent très difficiles, peut apporter une réponse aux reboiseurs méditerranéens, soucieux de préserver le patrimoine forestier français. Pour cela, une meilleure connaissance des différentes provenances et de leurs potentialités et la protection contre la pollution génétique des peuplements purs les plus intéressants seraient très souhaitables.

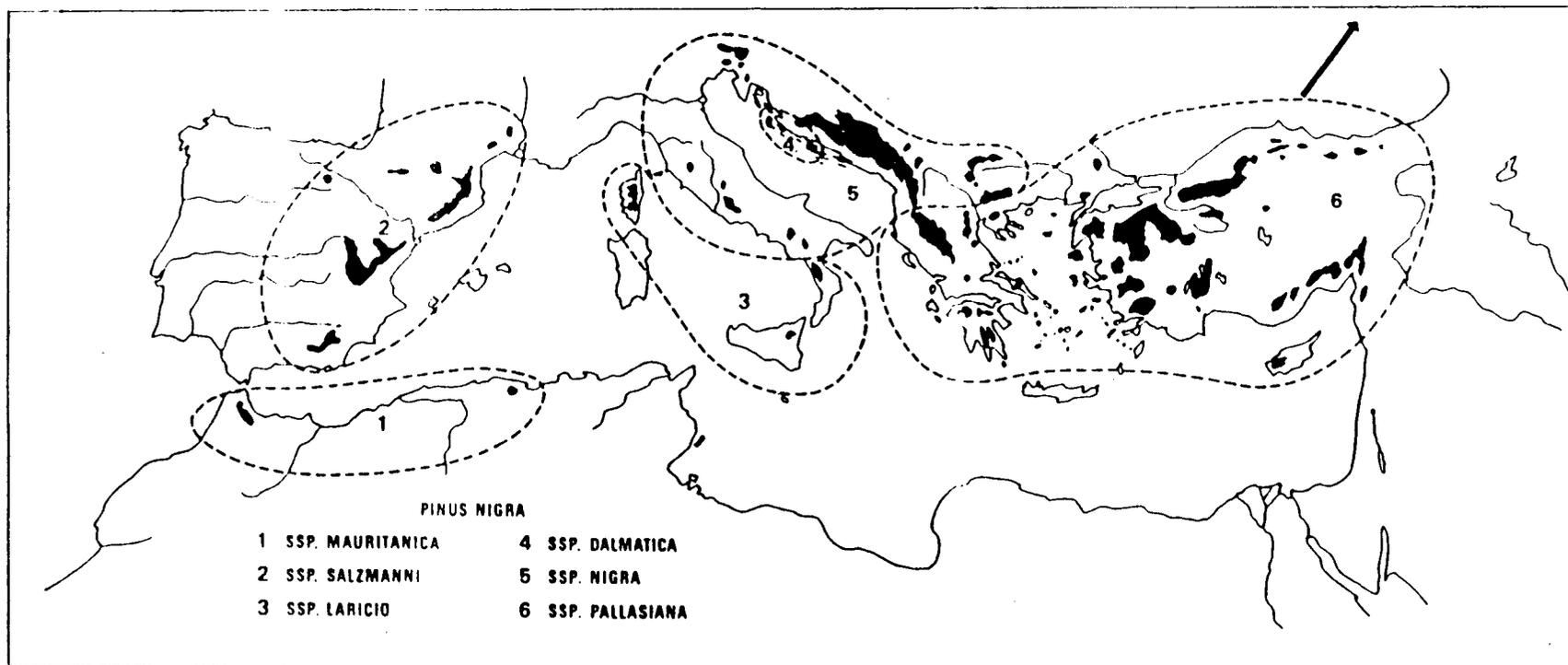
PRINCIPAUX OUVRAGES CONSULTÉS

- ARBEZ et MILLIER - Contribution à l'étude de la variabilité géographique de *PINUS nigra* Arn. - Ann. Sci. Forest., 28 (1), 23-49, 1971.
- BRAUN-BLANQUET - La forêt de *Pinus salzmanni* de Saint-Guilhem-le-Désert - *Collectanea botanica* - vol. IV, fasc. III, n° 33, 1955.
- CALAS M. - Le Pin laricio de Salzmann - R.T.M., Exposition universelle internationale de 1900.
- CALAS M. - Le Pin laricio de Salzmann - XV^e bulletin de la Société Agricole, scientifique et littéraire des Pyrénées Orientales, 1899.
- CALAS M. - La processionnaire du Pin - Restauration des terrains en montagne, 1900.
- COMMERÇON R. - Comportement du Pin laricio en région méditerranéenne française - Mémoire ENITEF 3^e année, 1984.
- DEBAZAC - Manuel des conifères, p. 93-96.
- DEBAZAC J.F. - L'aire spontanée du Pin de Salzmann en France - R.F.F., n° 10, p. 768-783, 1963.
- DUCAMP - A propos du Pin de Salzmann - Revue du E & F, 1931.
- DUNAL Félix - Description du *Pinus Salzmanni* de la forêt de Saint-Guilhem-le-désert - Bull. Soc. Bot. de France, 1851.
- DUPLAT, TRAN-HA - Modèles de croissance en hauteur dominante pour le Hêtre, le sapin pectiné, le Pin sylvestre dans le massif de l'aigoual - section technique de l'ONF - Mai 1986.
- DURAND Eug. - Note sur le Pin de Salzmann - Bull. Soc. Bot. de France, 1893.
- GATHY P. - Etude de quelques caractères de forme de diverses races de *Pinus nigra* Aunold - Soc. Roy. For. de Belgique, n° 12, 1961.
- GAUSSEN H. - A propos du Pin laricio de Salzmann dans les pyrénées - Bull. Soc. Bot. de France, t. 71, 1924.
- GEGOUT et MORTIER - Etude préalable à la création d'une réserve biologique domaniale en vue de la conservation du Pin de Salzmann (F.D. de Saint-Guilhem-le-désert/Hérault) - ENGREF Nancy, ONF, Conservatoire botanique de Porquerolles, 1990.
- GERBER Sophie - Chimiotaxonomie et hybridation interrassiale chez les Pins noirs - mémoire INA - INRA Bordeaux, 1989.
- Groupe de travail sur la typologie des stations forestières - Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques, pp. 14-50, octobre 1989.
- LE GOFF - Productivité du Frêne en région Nord-Picardie - Courbes de croissance en hauteur - Ann. Sci. foresti., 1982, 39 (3), 259-288.
- MIHOUBI Marie - La forêt domaniale de St Guilhem-le-désert et le Pin laricio de Salzmann - Maîtrise de physiologie végétale - Université Paul sabatier - Toulouse III, 1989.

ANNEXES

- Annexe 1 :** Représentation des formes géographiques de l'espèce collective *Pinus nigra* Arn. (QUEZEL, 1980).
- Annexe 2 :** Chimiotaxinomie et hybridation interracial chez les Pins noirs (GERBER, 1989).
- Annexe 3 :** Caractérisation édaphique des Pinèdes autochtones espagnoles de *Pinus nigra* Arn. (traduction-résumé d'un texte espagnol).
- Annexe 3 bis :**
Etude phytosociologique des pinèdes à Pin de Salzman dans les Pyrénées catalanes et l'Est de l'Aragon (GAMISAN et GRUBER, 1988).
Caractérisation phytoécologique des communautés de Pin de Salzman sur les affleurements rocheux du système ibérique méridional (PAJARES ESCUDERO, 1989).
- Annexe 4 :** Localisation des plantations comparatives de provenance de l'INRA. Dispositif de POMET : Résultats.
- Annexe 5 :** Fiche de relevés et protocole d'étude.
- Annexe 6 :** Protocole des analyses de tiges.
- Annexe 7 :** Modélisation de la croissance (HERVE, 1991).
- Annexe 7 bis :** Comparaison de croissance (Anales del instituto forestal, 1984).
- Annexe 8 :** Liste des plantes.
- Annexe 9 :** Information mutuelle.
- Annexe 10 :** Localisation précise des relevés effectués.

Représentation des formes géographiques de l'espèce collective *Pinus nigra* arn. (QUEZEL, 1980)



Extraits du rapport de Sophie GERBER

CHIMIOTAXINOMIE ET HYBRIDATION INTERRACIALE

CHEZ LES PINS NOIRS

c- Profils terpéniques.

Parallèlement à une comparaison basée sur les isozymes, la composition en terpènes, hydrocarbures des essences volatiles des résines, peut apporter des informations concernant la différenciation. Les concentrations relatives en terpènes se sont en effet révélées utiles pour la chimiotaxinomie des espèces résineuses et, en particulier, chez le genre Pinus.

Une étude des tissus corticaux des rameaux de 14 provenances de Pins noirs âgés de 9 ans (21 arbres par provenance), a permis de préciser la composition en monoterpènes (composés en C₁₀) des sous-espèces (Arbez et al., 1974). Les résultats ont été les suivants, le nombre de signes par case étant proportionnel à l'abondance relative du terpène considéré:

Sous espèce	Clusiana	Laricio Corse | Calabre		Nigricans	Pallasiana
Monoterpène					
limonène	***	*****	*	***	**
myrcène	*****	**	*	*	*
β-Pinène	*	*	*	***	***
δ3-carène		traces			
terpinolène		traces			

La sous-espèce clusiana serait distinguée grâce à sa forte teneur en myrcène, les Pins laricio de Corse et de Calabre diffèrent pour le limonène: les provenances corses sont plus riches et présentent en plus des traces de δ3-carène et de terpinolène.

b- Etude d'isozymes.

Des études de systèmes isoenzymatiques ont été menées pour préciser les différences entre sous-espèces.

Par électrophorèse sur gel d'amidon d'endospermes (haploïdes) de graines de 163 descendance maternelles des quatre sous-espèces, 4 loci, A, B, C et D ont été identifiés pour la glutamate-oxaloacétate-transaminase (GOT), seuls B et C présentaient une différenciation exploitable (Bonnet-Masimbert et Bikay-Bikay, 1978). Schématiquement (le nombre de signes caractérise l'importance relative des fréquences des différents allèles):

Sous espèce	Clusiana	Laricio		Nigricans	Pallasiana
		Corse	Calabre		
Locus B					
allèle B ₁	***	*	***	*	*
Locus C					
allèle C ₀	*	φ	φ	φ	φ
allèle C ₂	***	***	***	*	***
allèle C ₃		*		***	φ
allèle C ₄	**				φ
allèle C ₅	**	φ	φ	φ	φ

Les auteurs constatent une absence de variation clinale dans les compositions isoenzymatiques, interprétées par l'influence d'effets de dérive génétique. La sous-espèce Clusiana présente plusieurs bandes caractéristiques (C₀, C₄, C₅). L'allèle C₃ permet de distinguer les sous-espèces nigricans et pallasiana. L'étude statistique des résultats indique un isolement de la sous-espèce clusiana et une séparation entre la sous-espèce nigricans et le groupe composé des sous-espèces laricio et pallasiana. Selon une étude portant sur des endospermes de 11 populations de nigricans et laricio le système isoenzymatique de la shikimate-deshydrogénase permet de différencier les Pins laricio de Corse, par leur fréquence élevée pour l'allèle B₁ (Fineschi, 1983).

TRADUCTION ET RESUME D'ETUDES ESPAGNOLES SUR LE PIN DE SALZMANN

CARACTERISATION EDAPHIQUE DES PINEDES AUTOCHTONES ESPAGNOLES DE PINUS NIGRA ARN.

(O. SANCHEZ PALOMARES, R. ELENA ROSSELLO, M. PILAR CARRETERO CARRERO -1990-CARACTERIZACION EDAFICA DE LOS PINARES ESPANOLES DE PINUS NIGRA ARN.)

Il s'agit d'un travail de caractérisation des sols, dans les 4 régions espagnoles où le Pin de Salzman est présent :

- A -Les Pyrénées
- B -Le système ibérique oriental et les chaînes côtières méditerranéennes
- C -Les massifs montagneux de CUENCA , les hauts plateaux et reliques du système central
- D -Les montagnes de CAZORLA et de SEGURA

L'étude a été menée grâce à l'exploitation de 122 profils observés dans 122 parcelles différentes.

RESULTATS

Les auteurs ont distingué 4 grands types de substrats:

- 1 -Roches siliceuses
- 2 -Calcarénites et conglomérats calcaires
- 3 -Marnes et calcaires
- 4 -Dolomies

Región	Litof. 1	Litof. 2	Litof. 3	Litof. 4	Total
A	0	13	14	0	27
B	2	1	17	7	27
C	5	9	14	10	38
D	1	2	14	13	30
Total	8	25	59	30	122

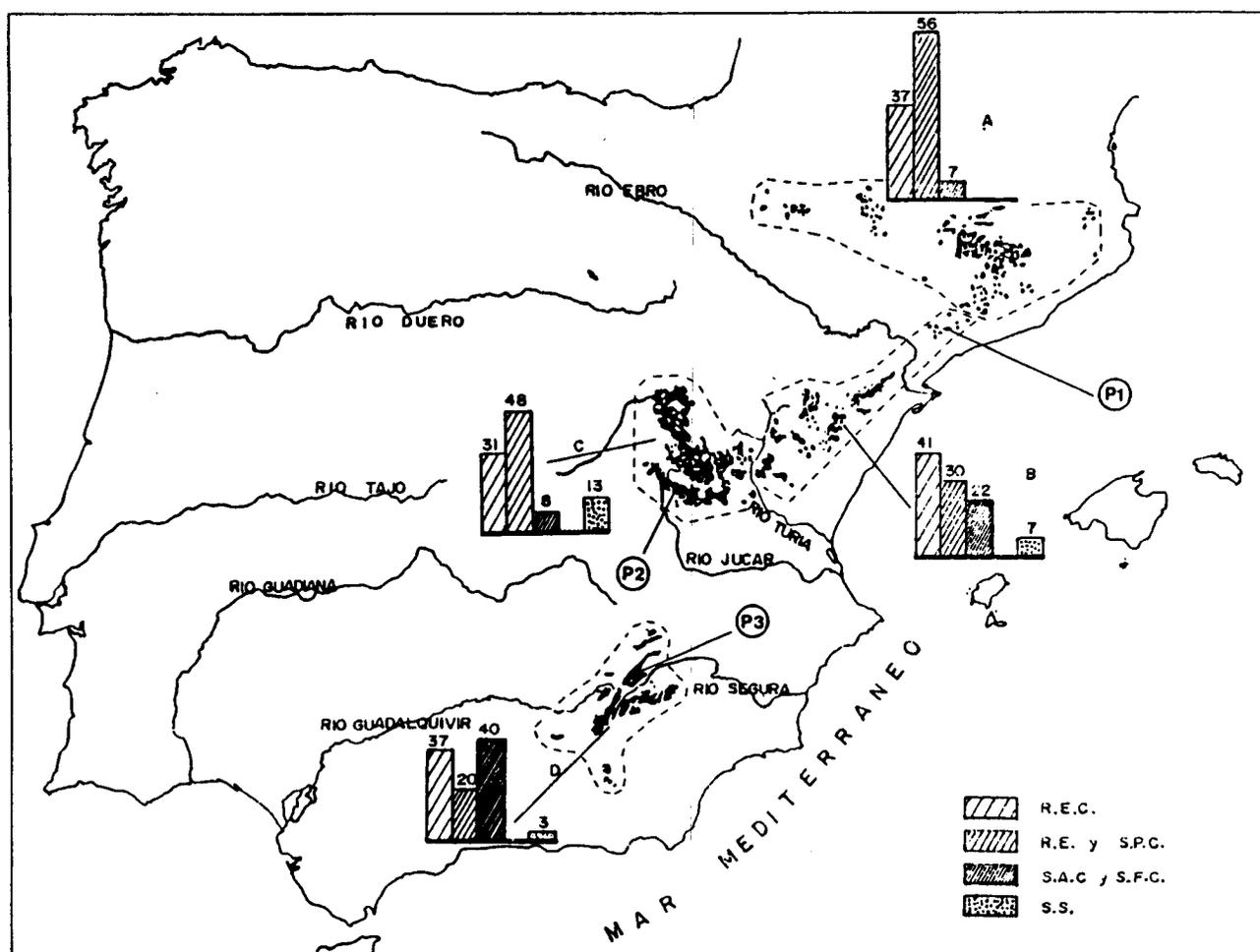
Le Pin de Salzman est surtout présent sur des substrats calcaires et particulièrement rare sur substrats siliceux.

Les sols ont été regroupés en types :

- Rendzines
- sols bruns calciques
- sols bruns lessivés sur substrat calcaire
- sols bruns eutrophes (substrat siliceux)
- sols bruns lessivés sur substrat siliceux

Suelos	Regiones			
	A	B	C	D
I Rendzina empardecida carbonatada	10	11	12	11
II Rendzina empardecida	15	8	14	6
III Pardo calcimórfico	—	—	4	—
IV Argilúvico calizo	2	5	2	6
V Ferriargilúvico calizo	—	1	1	6
VI Pardo eutrófico	—	1	3	1
VII Argilúvico	—	1	1	—
VIII Ferriargilúvico	—	—	1	—

Le Pin de Salzman est surtout présent sur rendzines, qui constituent des milieux relativement pauvres d'autant plus que dans 62 % des cas les profils sont limités par un horizon rocheux à moins de 50 cm, ce qui limite la capacité de stockage de l'eau.



TRADUCTION ET RESUME D'ETUDES ESPAGNOLES
SUR LE PIN DE SALZMANN (suite)

Jacques GAMISANS - Michel GRUBER

Els boscos de pinassa (Pinus nigra subsp. salzmannii) als
pireneus catalans i est-aragonesos: Estudi fitosociologic.

PYRENEES CATALANES ET EST DE L'ARAGON

* Sur les substrats calcaires (majorité des cas), il est possible de reconnaître deux communautés phytosociologiques :

- la première communauté, située à l'étage supra-méditerranéen (altitude 600 à 1250 m), correspond à l'association Lonicero-Pinetum salzmannii et peut être considérée comme le climax d'une série de Pinus nigra subsp. salzmannii.

- la seconde communauté est située à l'étage méso-méditerranéen supérieur (altitude 550 à 75m). On peut y rencontrer du Pin d'Alep.

* Sur les substrats siliceux, peu fréquents, deux niveaux supra-méditerranéens peuvent être distingués.

Niveau inférieur : altitude 500 à 900 m

Niveau supérieur : altitude 1000 à 1200 m

Pedro Regato PAJARES - Adrian ESCUDERO

Caracterizaci3n fitoecologica de las comunidades de Pinus nigra subsp. salzmannii en los afloramientos rocosos del sistema iberico meridional.

"Les pinèdes rupicoles du système ibérique méridional présentent un grand intérêt pour expliquer le caractère spontané de cette espèce dans ces stations.

Le pin de salzmann, dans ces stations où affleurent des roches calcaires ou dolomitiques, ne présente pas de problème de compétition avec les forêts feuillues climaciques de ce territoire car ces dernières ne supportent pas les conditions géomorphologiques extrêmes.

Le schéma de la dynamique proposée montre l'importance du rôle édaphogénétique et dynamique du Pin de salzmann dans ces situations rocheuses. Le reste des communautés non rupicoles dépendent de l'installation et du développement de ces pinèdes pour se développer sur ces milieux."

LOCALISATION DES EXPERIENCES DE L'INRA

- Forêt domaniale d'Amance (Meurthe et Moselle),
- Forêt domaniale de Lamotte-Beuvron (Loir et Cher),
- Forêt domaniale de Verdun (Meuse),
- Forêt domaniale de Loudéac (Côtes d'Armor),
- Série domaniale de Levens (Alpes de Haute Provence),
- Forêt domaniale de la Méouge (Hautes-Alpes).

PLANTATIONS COMPARATIVES DE PROVENANCES (INRA)

Dispositif de POMET

LISTE DES PROVENANCES

(15 ans)

CODE	PROV.	NOMS	ORIGINES	VARIETES
1	AINS	AINSA	ESPAGNE	CLUSIANA
2	PRIE	PRIEGO	ESPAGNE	CLUSIANA
3	FRES	FRESNEDA	ESPAGNE	CLUSIANA
4	GAGN	GAGNIERES	FRANCE (30)	CLUSIANA
5	PO-LV	POPOVA-LIVADA	YOUgosLAVIE	PALLASIANA
6	DOBL	DOBLHOFF	AUTRICHE	NIGRICANS
7	BANA	BANAT	ROUMANIE	NIGRICANS
8	SBAU	ST BAUZILLE	FRANCE (48)	NIGRICANS
10	VG-RA III	VISEGRAD III	YOUgosLAVIE	NIGRICANS
12	KARA	KARABELEN	TURQUIE	PALLASIANA
15	LBAR II G	LES BARRES	FRANCE (45)	LARICIO CAL.
17	TZAR	TZARVARITZA	BULGARIE	NIGRICANS
18	STUD I	STUDENICA I	YOUgosLAVIE	NIGRICANS
19	MILE I	MILEA I	GRECE	NIGRICANS
20	ASPR	ASPRMONTE	ITALIE	LARICIO CAL.
21	VILL	VILLARS/VAR	FRANCE (06)	NIGRICANS
22	PLEV	PLEVIJA	YOUgosLAVIE	NIGRICANS
23	PERT	PERITHORION	GRECE	NIGRICANS
24	PARL	PARLATGES	FRANCE (34)	NIGRICANS
25	EGRD II	EGRIDIR II	TURQUIE	PALLASIANA
26	MUGL	MUGLA	TURQUIE	PALLASIANA
27	CRIM IV	ALUCHTIN	RUSSIE	PALLASIANA
28	KOEK IV	KOEKELARE IV	BELGIQUE	"LARICIO"
29	VALD III	VALDONIELLO	FRANCE (Corse)	LARICIO COR.
30	COSE II	COSENZA II	ITALIE	LARICIO AL.

PROV.	ACC82	ACC85	ACC88	HT88
1	21.840	27.755	54.681	<u>339.947</u>
2	17.527	28.079	52.912	300.989
3	16.728	26.099	50.109	299.301
4	20.256	<u>29.656</u>	<u>58.846</u>	318.315
5	<u>13.811</u>	21.478	44.579	257.895
6	14.484	20.495	46.277	274.202
7	18.582	25.180	54.185	312.989
8	18.409	22.440	48.830	285.638
10	17.115	20.713	50.573	281.458
12	14.102	<u>18.575</u>	44.000	<u>242.611</u>
15	20.032	25.865	55.053	328.883
17	17.892	24.466	57.796	311.075
18	16.128	21.235	49.096	283.380
19	13.880	22.697	48.750	270.163
20	16.584	18.931	<u>39.944</u>	260.393
21	17.176	26.363	55.591	299.032
22	14.600	21.777	43.316	259.316
23	16.935	26.131	49.839	291.667
24	18.366	21.989	50.769	307.143
25	15.192	24.039	50.432	262.346
26	16.344	24.043	55.591	289.892
27	18.191	21.011	58.280	317.312
28	<u>23.527</u>	19.941	54.778	332.222
29	21.367	23.122	48.516	318.681
30	18.533	22.529	55.851	306.809

ACC : accroissement de l'année en cm

HT : hauteur en cm

Simple souligné : première provenance du classementDouble souligné : dernière provenance du classement

I - LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA STATION

1) SITUATION

Département / N° d'ordre (n° évent. des autres fiches portant sur le même bois) _____
Canton / Commune / Lieu
Région I.F.N./Secteur O.N.F./Distance au littoral (km)
Propriétaire : Etat (1) Département (2) Commune et collectivité (3) Particulier (4)
Latitude/Longitude (milligrades).....

2) STATION

Altitude : (en mètres)
Topographie : plaine ou vallée (0) plateau ou replat (1) sommet (2) haut de versant (3) mi-versant (4) bas versant (5)
thalweg ou vallon (6) croupe (7) 3+4 (8) 4+5 (8)
Microtopographie : Position défav. (1) Position équilibrée (2) Position fav. (3) apports d'eau except. (4) Position plate (5)
Exposition du versant : N (1) E (2) S (3) W (4) toutes (5)
Exposition de la station : N (1) NE (2) E (3) SE (4) S (5) SW (6) W (7) NW (8) toutes (9)
Pente (en %) :

3) SOUS-SOL

Nature de la roche mère (voir code) :
Affleurement de la roche mère : de 0 à 10 % (1) de 10 à 30 % (2) de 30 à 60 % (3) de 60 à 100 % (4)
Formation superficielle : roche mère nue (1) altération de la roche mère (2) colluvion (3) alluvion (4) moraine (5)
restanques (6) déblai (7)

4) SOL

Profondeur du sol : 5 sondages (en cm) :
Pourcentage de cailloux en affleurement : de 0 à 10 % (1) de 10 à 30 % (2) de 30 à 60 % (3) de 60 à 100 % (4)
Pourcentage de cailloux dans le sol : de 0 à 10 % (1) de 10 à 30 % (2) de 30 à 60 % (3) de 60 à 100 % (4)
Texture : Argile lourde (1) Argile (2) Argile sabl. (3) Sable argill. (4)
Sable limoneux (5) Sable (6) Limon sableux (7) Limon (8) Limono-argileux (9)
Horizon de surface (litière exclue) : minéral (1) peu organique (2) organique (3) autres (4)

5) OBSERVATIONS SUR LA STATION (en particulier facteurs déterminants éventuels)

Pendage : (conforme, inverse)
Erosion : (de surface, en rigoles, bad-lands)
Alimentation en eau : (drainage, hydromorphie)
Nature du colluvion : (% bloc, cailloux, graviers, fines)
Réaction HCl terre fine : nulle (1) légèrement audible non visible (2) nettement audible peu visible (3) visible (4) forte (5)

II - VEGETATION ENVIRONNANTE ET ACCOMPAGNATRICE

Département/N° d'ordre

esp.	.....	.....	.....	.....
dom.	.....	.....	.....	.....
nanter	.....	.....	.....	.....
.....
.....
.....

Département/N° d'ordre

.....
.....
.....
.....
.....
.....

OBSERVATIONS (notamment espèces introduites non étudiées) :
.....
.....

III - DESCRIPTION DU BOISEMENT

4ème carte

Département :/N° d'ordre
Espèce ou hybride

1) OBSERVATIONS SUR LE PEUPEMENT

Surface d'extension du boisement (en hectares et ares)
Recouvrement : strate arborescente/arbustive/herbacée (1/10)
Recouvrement relatif de l'espèce étudiée dans sa strate (1/10)
Nombre de plants/ha : bouquet ou alignement (1) disséminés moins de 50/ha (2) de 50 à 200/ha (3) plus de 200/ha (4) en plein ou en bandes moins de 500/ha (5) de 500 à 1000/ha (6) de 1000 à 2000/ha (7) plus de 2000/ha (8)
Mesures dendrométriques : Age lu sur carotte Hauteur (en dm) Analyse de tige non (0) oui (1)
Age connu par archives ou lu sur souche (années) Hauteur prélèvement carotte (en dm - 3)

2) REGENERATION NATURELLE

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

Forme : très mauvaise (0) mauvaise (1) moyenne (2) bonne (3) très bonne (4).....

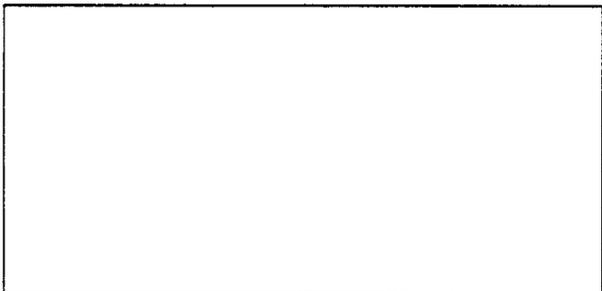
Description du défaut de forme

3) PLANTATION RECENTE - TRAVAUX - MATERIEL VEGETAL

Antécédents culturaux : terre de culture (1) lande (2) garrigue ou maquis (3) forêts (4) autres (5)
Mode plantation : en plein sur terrain nu (1) en mélange sur terrain nu (2) en sous-étage (3) en bandes (4) autres (5)
Travail du sol : aucune préparation (1) potets plochés (2) labour en bande ou total (3) rootage en ligne (4) rootage défoncement total (5) banquettes sou-solées (6)
Mise en place : au coup de pioche (1) potet ploché (2) autres (3)
Matériel végétal : semis naturels (1) semis artificiels (2) plants RN 1 an (3) plants RN 2 ans et repliés (4) plants 1.0.G (5) plants G 1+1 (6) plants RN sans précision d'âge (7) plants godets sans autres précisions (8) autres (préciser) (9)
Provenance ou pépinière : (en clair)
Entretiens : désherbage (1) binage (2) dégagement (3) / réalisés pendant 1, 2, 3 ans et plus
Taux de reprise : (/10) / Nombre de passages en regards :

OBSERVATIONS GENERALES (en clair)

Etat sanitaire :
Accidents :
Caractères remarquables :
Nombre d'arbres dans le cas d'un bouquet :
Observations sur la régénération :
Observations sur la plantation :
Autres observations sur le boisement :



Date :

Nom du rédacteur :

Croquis de repérage

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

PROTOCOLE D'ETUDE

1/ LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA STATION

1.1 Situation

La placette de mesures n'a pas de surface ni de forme précise. Elle est limitée par les changements de station.

1.2 Station

Zone

D'après le découpage de la région Languedoc-Roussillon et de la région PACA en secteurs écologiques (CEMAGREF, juin 1990), on rajoute 1000 aux chiffres couramment utilisés pour les zones de la région Languedoc-Roussillon, afin de les différencier de ceux utilisés pour la région PACA.

(Les données manquent pour les départements de la Drôme et de l'Ardèche).

Climat

Même référence : utilisation de la typologie climatique du découpage.

1er chiffre : N° du groupe pluviométrique auquel appartient la station. Ces groupes, au nombre de 8, ont été distingués par l'abondance des pluies totales annuelles et des pluies estivales (voir tableaux pages suivantes).

2ème chiffre : N° du groupe thermique auquel appartient la station. Ces groupes, au nombre de 7, ont été distingués par trois paramètres :

- . la température moyenne annuelle,
- . la moyenne des maxima du mois le plus chaud,
- . la moyenne des minima du mois le plus froid.

Altitude

Mesurée à l'aide d'un altimètre. A défaut, lecture sur la carte topographique au 1:25000ème.

Topographie. Estimée à l'échelle hectométrique.

Microtopographie

Estimée à l'échelle décamétrique. Précise la position de la station en estimant si localement elle est :

- défavorable (ex. : pente subitement plus forte, position haute ...),
- équilibrée (si la microtopographie n'ajoute rien à la topographie, ex pente régulière),
- favorable (ex. : rupture de pente, petite combe),
- plate sur une surface suffisamment grande pour que l'on puisse penser qu'une goutte d'eau arrivant sur cette station ne soit pas entraînée en aval, mais migre verticalement dans le sol.

ou si la station bénéficie d'apports exceptionnels (ex. : présence d'une source).

Exposition du versant

A partir de la carte topographique au 1:25000ème, référer à quel ensemble topographique appartient la station considérée, en essayant de la choisir à l'échelle du kilomètre. L'exposition du versant sera l'exposition du versant choisi comme l'ensemble topographique (s'aider des ombrages de la carte).

Exposition de la station

Mesurée à la boussole.

Pente

Mesurée au clisimètre.

1.3. Sous-sol

Nature de la roche mère (cf. code)

Vérification sur carte géographique au 1:50 000ème ou au 1:80 000ème.

Affleurement de la roche mère

Noter dans quelle fourchette se situe le pourcentage d'affleurement des blocs de roche peu ou pas altérés, paraissant statiques. Cette estimation se fait à l'oeil, après avoir dégagé un carré de sol suffisamment grand (50 cm x 50 cm au minimum). On procède à la même opération au moins 3 fois.

Formation superficielle (cf. fiche)

Restanques : anciennes terrasses soutenues par un mur de pierres sèches.

1.4. Sol

Profondeur du sol (en cm)

5 sondages à l'aide de la tarière à vis hélicoïdale. Noter 99 quand la profondeur dépasse 1 m.

Pourcentage de cailloux en affleurement (un caillou a un diamètre supérieur à 2 cm)

Utiliser les carrés cités pour l'affleurement de la roche mère. Estimation à l'oeil (on peut rassembler les cailloux dans un coin du carré pour mieux se rendre compte).

Pourcentage de cailloux dans le sol

Après avoir enlevé les cailloux présents en surface, on creuse le sol à l'aide de la pioche sur une profondeur de 30 cm au moins, si c'est possible. L'évaluation peut se faire de la même manière que précédemment.

Texture

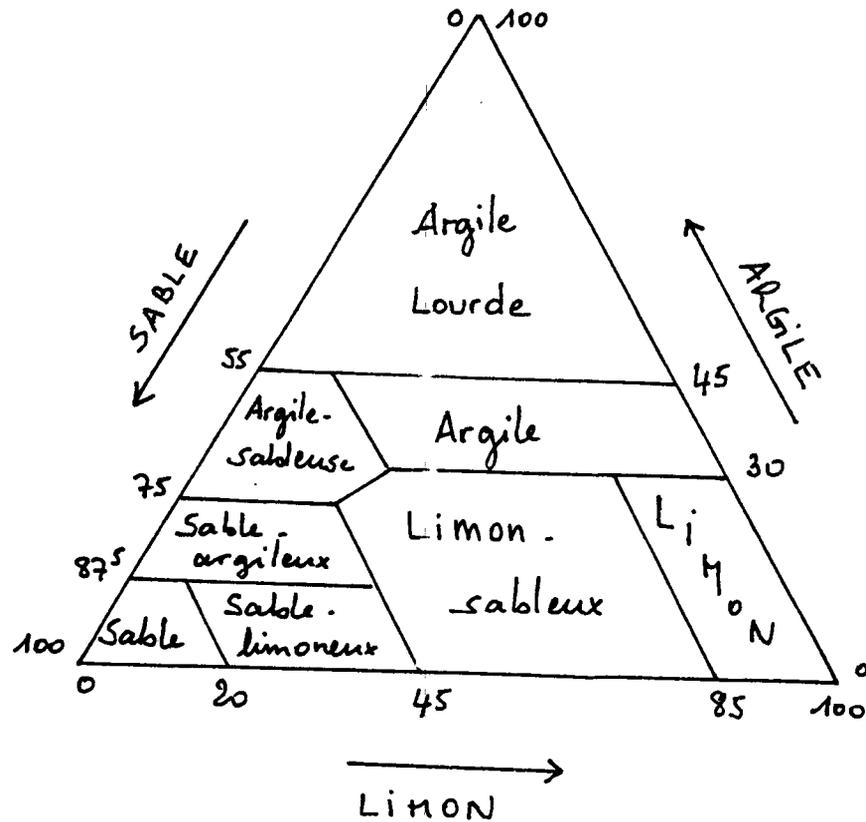
. Utiliser un tamis ayant pour maille 2 mm pour séparer la terre fine des éléments grossiers. Estimer la texture de la terre fine en l'humectant avec de l'eau.

ou

. Procéder à une analyse granulométrique de l'échantillon.

Codage : Triangle de JAMAGNE simplifié

1er chiffre : tendance argile (1) limon (2) sable (3) équilibrée (4) (ancien code)
 2ème chiffre : cf. fiche.



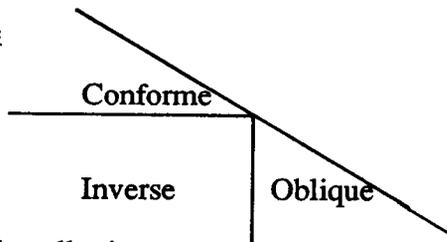
Horizon de surface (litière exclue)

En pratique, ne considérer que l'horizon A1

- minéral (roche à nu, sable de plage),
- peu organique (A1 de marron/noir à marron clair, minéralisation visiblement correcte à lente),
- organique (A1 épais et très noir, minéralisation très lente).

1.5. Observation sur la station

Pendage



Nature du colluvium

Noter le pourcentage de chaque série :	BLOCS	$\varnothing \geq 25$ cm
	CAILLOUX	$2 \leq \varnothing < 25$ cm
	GRAVIERS	$0,2 \leq \varnothing < 2$ cm
	FINES	$\varnothing < 0,2$ cm

Réaction HCl terre fine

Solution HCl diluée à 10 %. Voir code sur fiche.

2/ VEGETATION ENVIRONNANTE ET ACCOMPAGNATRICE

Noter d'abord les espèces dominantes.

Faire un inventaire le plus exhaustif possible des plantes présentes sur la placette et éventuellement dans ses abords immédiats pour peu que la station reste la même. En effet la densité du couvert forestier peut sensiblement faire varier le nombre d'espèces présentes sur une station.

Le codage se fera selon la liste établie par le CEFE de Montpellier.

Observations

Noter - les espèces introduites présentes sur la station,
- des observations sur la station.

3/ DESCRIPTION DU BOISEMENT

Recouvrement

Apprécier à l'oeil le recouvrement des trois strates :

arborescente : ligneux dont la hauteur est supérieure à 2 m,
arborescente : ligneux dont la hauteur est inférieure à 2 m,
herbacée : non ligneux.

Recouvrement relatif de l'espèce dans sa strate

Tient compte de la présence d'autres espèces concurrençant l'espèce considérée.

Mesures dendrométriques

On mesure l'âge et la hauteur des 6 arbres les plus hauts de la station.

Age -Lorsque c'est possible, l'âge est mesuré en comptant le nombre de verticilles de l'arbre.

-Dans le cas contraire, on sonde l'arbre à l'aide d'une tarière de pressler. Le sondage est effectué à une hauteur de 20 à 30 cm par rapport au pied de l'arbre.

-On considérera que le peuplement est équienné si la fourchette formée par les âges des 6 arbres dominants mesurés ne dépasse pas 20 % de l'âge moyen des arbres de la placette.

Par exemple, on tolérera une fourchette de vingt ans si les arbres ont un âge compris entre 90 et 110 ans, 14 ans de 60 à 80 ans et seulement 6 ans de 20 à 40 ans.

On se permettra un peu de laxisme si la fourchette est dépassée d'un ou deux ans.

Régénération naturelle

Apprécier l'abondance, voir fiche.

Noter si un incendie a parcouru le peuplement.

Forme

- exceptionnellement mauvaise (tous les arbres ont une très mauvaise forme),
- mauvaise (plus d'arbres de mauvaise forme),
- moyenne (autant d'arbres droits que d'arbres tortueux),
- bonne (arbres droits en majorité),
- exceptionnelle (tous les arbres sont droits).

ANALYSE DE TIGES (inspiré de Duplat, Tran-ha, 1986)

Choix des peuplements

Les peuplements choisis doivent :

- être purs (on tolère 20 % d'autres essences),
- paraître équienne,
- être de préférence âgés.

Il s'agit de peuplements forestiers, et non de simples alignements d'arbres.

Choix des tiges à analyser

On choisit dans chaque peuplement deux tiges appartenant à l'étage dominant.

Analyse d'une tige

Avant l'abattage, on repère soigneusement et on marque à la griffe le niveau " 1 m" mesuré à partir du sol (côté amont si le sol est en pente). Toutes les mesures sur la tige abattue seront faites à partir de cette marque.

Après l'abattage, on colle le ruban sur la tige principale de l'arbre, puis on marque sur cette tige l'emplacement des découpes à effectuer, en les numérotant de 1 à 4.

Pour chacune, on note sa hauteur par rapport au sol.

La détermination des découpes se fait comme suit :

- billes d'1 m dans la partie inférieure (2 premières billes),
- billes de 2 m ensuite.

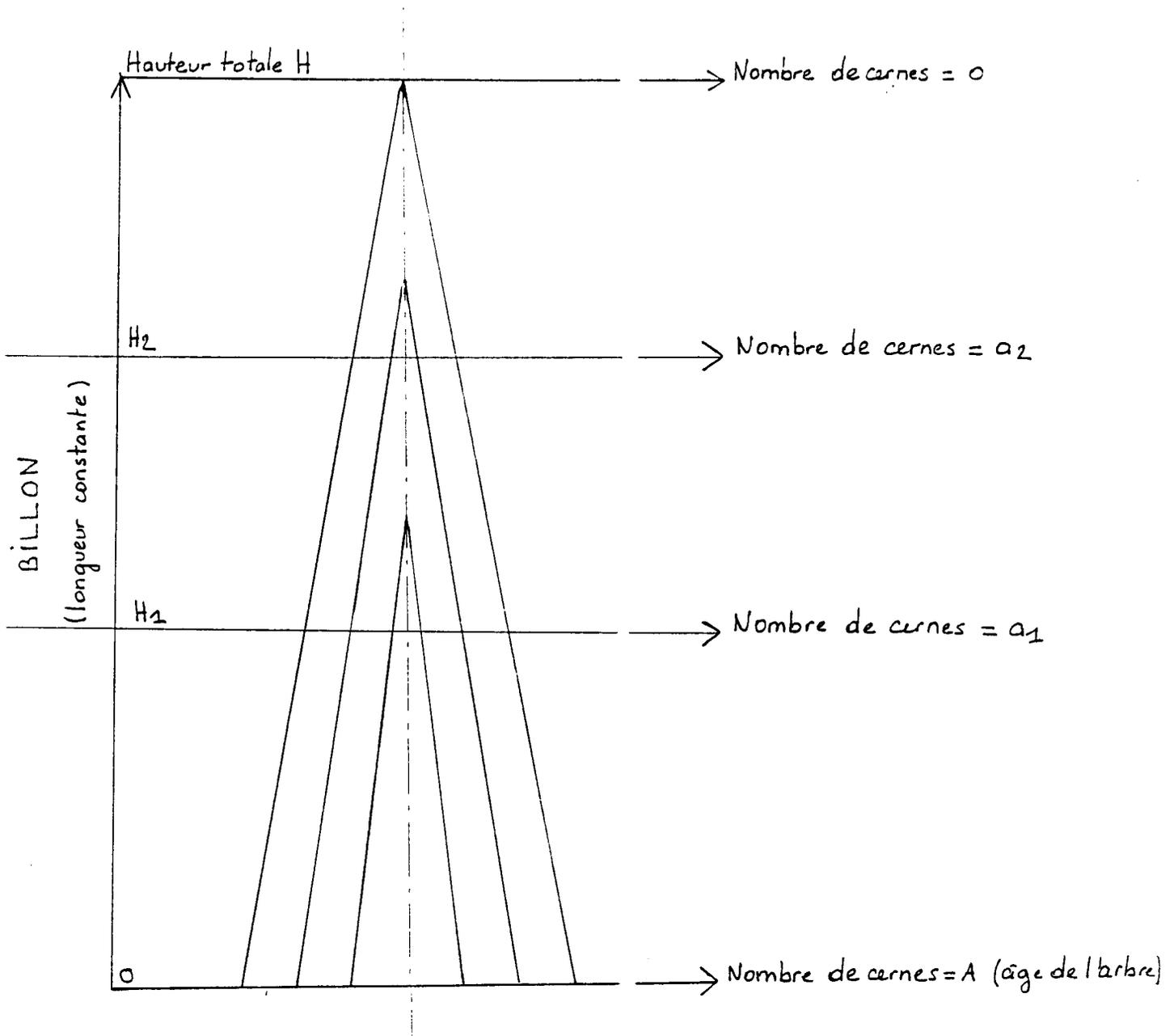
Quand toutes les découpes ont été marquées sur la tige, mesurées et notées sur fiche, le bûcheron les réalise.

On compte les cernes de chaque bille, soit sur le fin bout de la bille inférieure, soit sur le gros bout de la bille supérieure : il faut donc décoller légèrement les billes et billons, de façon que chaque face soit visible sur au moins un rayon.

Matériel utilisé

- Griffe,
- Double décamètre,
- Tronçonneuse,
- Matériel de prise de note,
- Loupe,
- Cutter,
- Essence de Térébenthine (pour estomper les traces de résine).

SCHEMA DE L'ANALYSE D'UNE TIGE



On a

$a_1 =$ âge de la partie de l'arbre entre H_1 et le sommet.

$a_2 =$ âge de la partie de l'arbre entre H_2 et le sommet.

$a_1 - a_2 =$ temps (en année) pendant lequel l'arbre a grandi de $H_2 - H_1$ (longueur d'un billon).

$A - a_1 =$ âge auquel l'arbre a atteint la hauteur H_1 .

ANNEXE N° 7

MODELISATION DE LA CROISSANCE

A. CHOIX D'UN MODELE MATHEMATIQUE

La croissance des arbres se présente généralement sous la forme d'une courbe sigmoïde qu'on cherche à approcher à l'aide d'un modèle mathématique. Plusieurs équations sont envisageables.

- P. DUPLAT (1986) propose le modèle suivant :

$$H = (b_0 A + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n + \dots) f(A)$$

où H = hauteur
A = âge
 b_0, b_i = paramètres de niveau
 x_i = variable muette valant 1 pour un point appartenant à la courbe i, 0 sinon

A la base, on a : $f(A) = (1 - e^{-PA})$.

On peut ajouter différents exposants pour rendre la courbe plus "souple".

Si $b_0=0$, ces courbes rendront compte de la variabilité de croissance grâce à un coefficient de proportionnalité constant entre deux courbes (faisceau de courbes affines).

Afin d'introduire une variabilité plus importante à l'intérieur du faisceau, une autre méthode a été envisagée.

Dans le cadre d'une thèse menée au sein du laboratoire de biométrie de l'Université Claude Bernard à Lyon (1), la croissance du Pin noir d'Autriche a été modélisée grâce à un modèle du type BAILEY et CLUTTER à 4 paramètres dont 2 variables :

$$H(t) = P_1 e^{-(1/u)^{P_3}}$$

$$\text{avec } u = \frac{P_2 t}{(P_1 P_3)} + \left(\log \left(\frac{P_1}{P_4} \right) \right)^{-1} / P_3$$

Interprétation des paramètres

P1 : asymptote (en mètres) ; elle est horizontale.

P2 :

On a : $\frac{dH}{dt}$ au point d'inflexion = $P_2 \exp [(1 + 1/P_3) (\log (1 + 1/P_3) - 1)]$

P3 : hauteur du point d'inflexion relativement à l'asymptote (sans unité)

$$\frac{H}{P_1} \text{ au point d'inflexion} = \exp - (1 + 1/P_3)$$

P4 : condition initiale - Hauteur à âge 0 (en m)

Il a été fixé à 0 sauf pour la phase de comparaison avec le Pin noir d'Autriche.

En raison de la finesse de la modélisation obtenue pour le Pin noir, c'est ce modèle qui a été choisi.

B. MODELISATION DU FAISCEAU : Détermination de la courbe moyenne et écart par rapport à cette courbe

1/ Estimation des paramètres

Le traitement a été effectué sans prendre en compte le premier couple (Hauteur, Age).

- On commence par donner des valeurs initiales aux quatre paramètres.

P1 et P2 sont traités en local (ils peuvent varier d'une courbe à l'autre) tandis que P3 et P4 sont traités globalement, c'est-à-dire qu'ils sont communs à toutes les courbes. P4 est fixé.

En clair, il existe deux paramètres P1 et P2 propres à chaque courbe. On ne présage donc en rien de la forme du faisceau.

A partir des valeurs initiales, le programme cherche à élaborer un ensemble de courbes s'ajustant le mieux possible aux données réelles obtenues par analyses de tiges. Il tend à minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées (principe de la régression).

On parvient ainsi par ajustements successifs à la meilleure adéquation courbe à courbe.

On peut visualiser la distribution des paramètres P1 et P2 sur le plan P1 /P2, sous la forme d'ellipses de confiance autour des valeurs calculées (ces ellipses correspondent à une région de confiance à 2 dimensions autour des valeurs calculées) voir graphique n° 2.

Certaines valeurs sont bien déterminées, d'autres non, selon l'étalement plus ou moins important des ellipses. Certaines valeurs s'écartent nettement de la masse.

On peut observer un certain alignement des points selon un axe, ce qui illustre une corrélation linéaire entre les deux paramètres P1 et P2 et qui prouve que le phénomène de croisements des courbes restent marginaux (voir, dans tableau ci-après, la valeur de la corrélation). La prise en compte d'un seul paramètre individuel pourrait donc avoir un sens, même si elle n'aboutit pas à une aussi bonne précision du modèle.

2/ Elaboration du faisceau de courbe définitif

A partir des résultats obtenus précédemment, on effectue une pondération, afin de faire participer la courbe moyenne à l'élaboration des courbes ajustées. Cela donne en quelque sorte un "air de famille" à toutes les courbes du faisceau.

Le nuage des points (P1, P2) devient ainsi plus resserré, avec les ellipses de confiance comparables pour chaque couple. La somme des carrés des écarts a un peu augmenté, puisqu'on s'est éloigné de l'ajustement uniquement individuel (voir graphique n° 3).

Quelques précisions

- P3 est un paramètre commun à chaque courbe. Il a été estimé à 0,437.

- P1 et P2 varient d'une courbe à l'autre. On suppose qu'ils sont distribués, dans la population considérée, selon une loi normale à 2 dimensions. On a estimé les moyennes de P1 et P2, ainsi que leur matrice de variance-covariance dans la population à partir des analyses de tiges.

	P1	P2
Moyenne	95.97 m	0,168 m/an
Variance	1107 m ²	0,00486 (m/an) ²
Covariance	1,11 m ² /an (corrélation = 0,478)	
Variance résiduelle	0,182 m ² (écart au modèle - erreur de mesure)	

3/ Elaboration des courbes prédictives

On cherche maintenant à calculer l'indice de fertilité (hauteur dominante à 50 ans) correspondant à chaque station.

Le modèle élaboré grâce aux données d'analyses de tiges va servir à estimer la croissance passée ou future des arbres mesurés au delà ou en deçà de 50 ans.

Deux niveaux d'informations seront utilisées :

- Niveau population (ou global) : les paramètres de la courbe moyenne, ainsi que l'écart moyen par rapport à cette courbe (variance des paramètres).
- Niveau individuel (ou local) : les couples (Hauteur-Age).

En effectuant une pondération entre ces deux informations, le programme élabore une courbe qui passe très près du point mesuré, les valeurs des paramètres P1 et P2 étant conformes à l'allure générale du faisceau. Formellement, on calcule l'espérance conditionnelle de la hauteur à 50 ans connaissant la courbe moyenne et le point (H, A). On peut calculer la variance conditionnelle associée au H50 estimée de telle sorte qu'on peut fournir l'intervalle de confiance de cette prédiction. L'erreur moyenne de mesure estimée entre dans le calcul de cet intervalle.

4/ Comparaison de la croissance pin noir d'autriche / pin de salzmann

- Si l'on choisit pour origine commune H = 1 m, Age = 0 ans (P4 = 1)

Les deux faisceaux d'analyses de tiges se recouvrent parfaitement, si l'on excepte quelques courbes de croissance exceptionnellement faibles du Pin de Salzmann (qu'on peut peut-être expliquer par l'échantillonnage).

A partir d'H = 1 m, les deux modalités de croissances peuvent donc être confondues, à peu de chose près.

- Si l'on choisit de travailler à partir de différentes estimations de l'âge réel, en prenant pour origine

H = 0	|	Pour le Pin de Salzmann
Age = 1		
H = 0	|	Pour le Pin Noir d'Autriche
Age = 3		
ou H = 0	|	Pour les deux
Age = 3		

Les deux faisceaux ne se recouvrent pas suffisamment bien pour que l'on puisse les confondre.

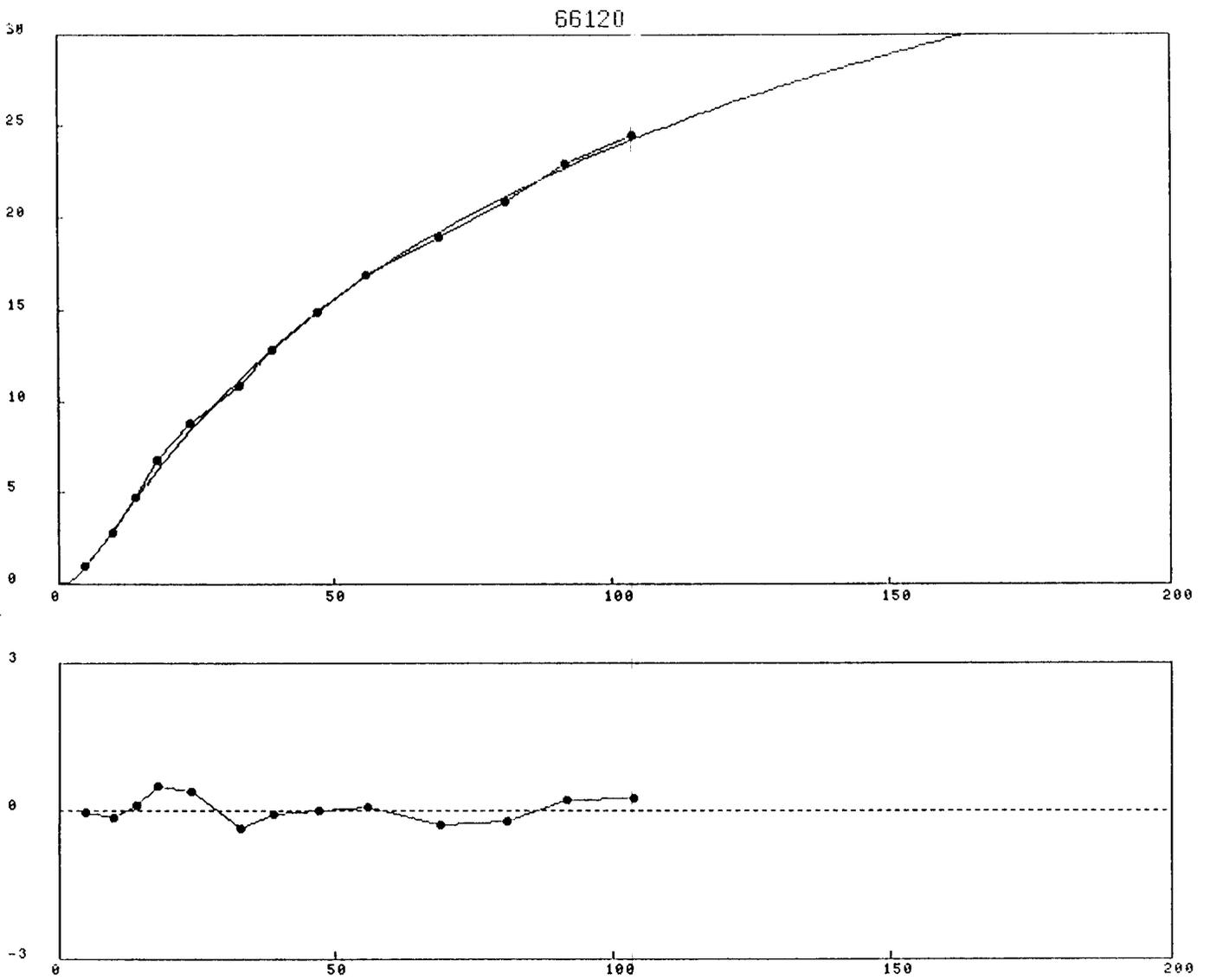
En effet, la croissance juvénile mesurée du Pin de Salzmann est apparemment différente de celle du Pin noir d'Autriche, mais il faut insister sur le fait que cette phase juvénile est très mal mesurée par les analyses de tiges.

On ne peut donc pas affirmer que les deux essences suivent le même modèle de croissance.

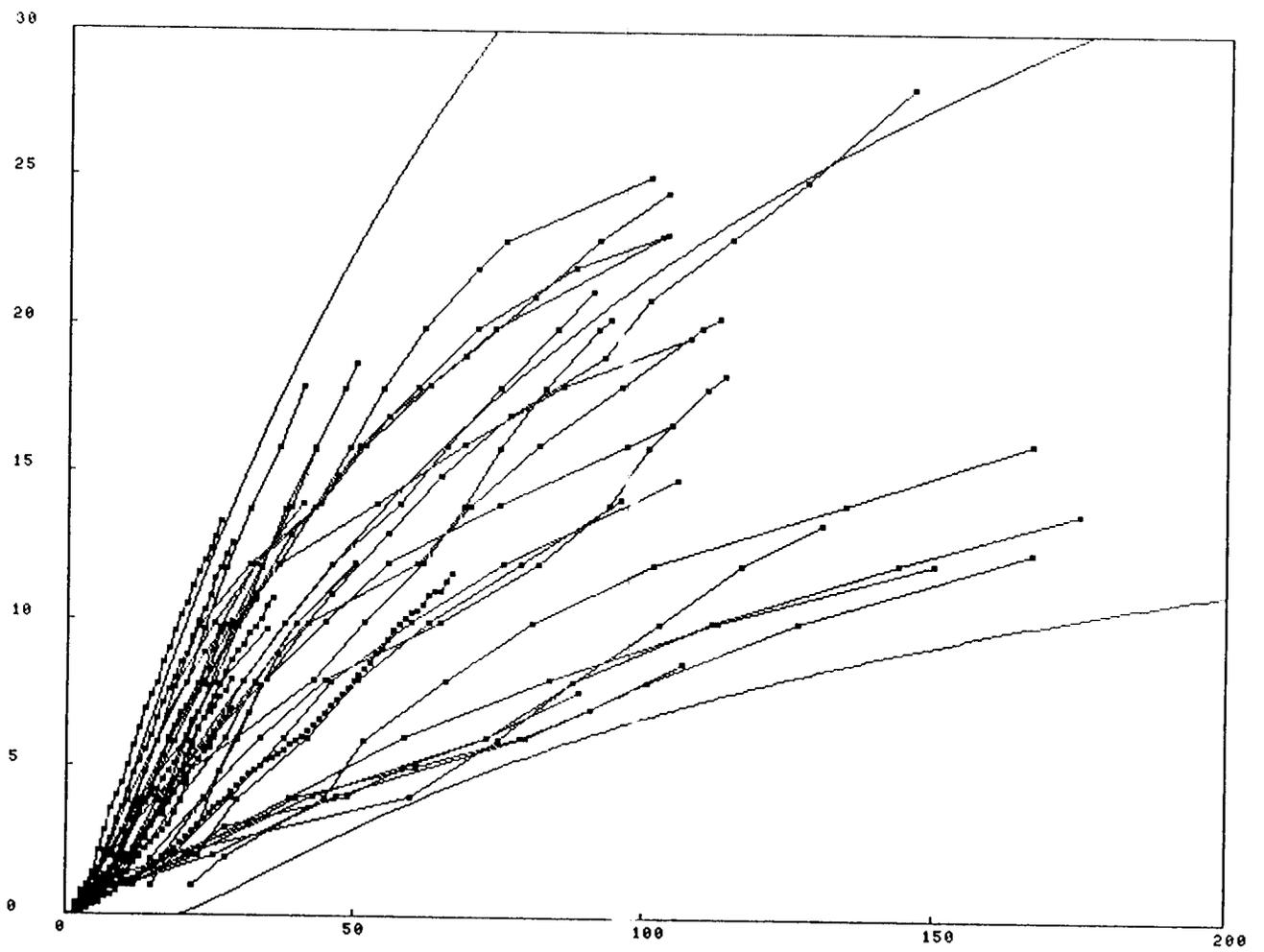
La différence concerne le paramètre P_3 , estimé à 0,437 pour le Pin de Salzman contre 0,65 pour le Pin noir d'Autriche. La courbe de croissance du Pin de Salzman est caractérisée par un point d'inflexion plus bas et plus précoce que pour le cas du Pin noir.

On a donc utilisé un modèle spécifique pour le Pin de Salzman.

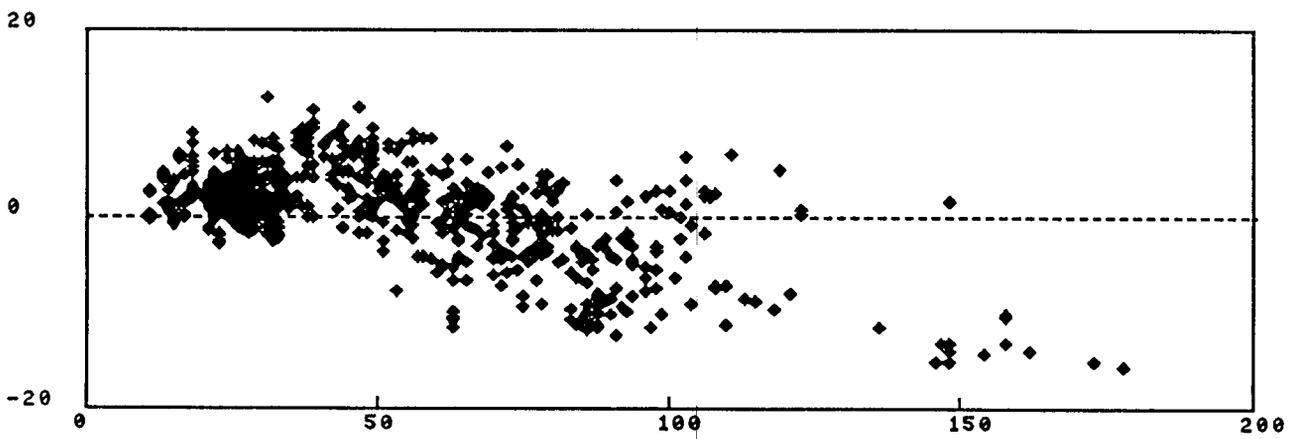
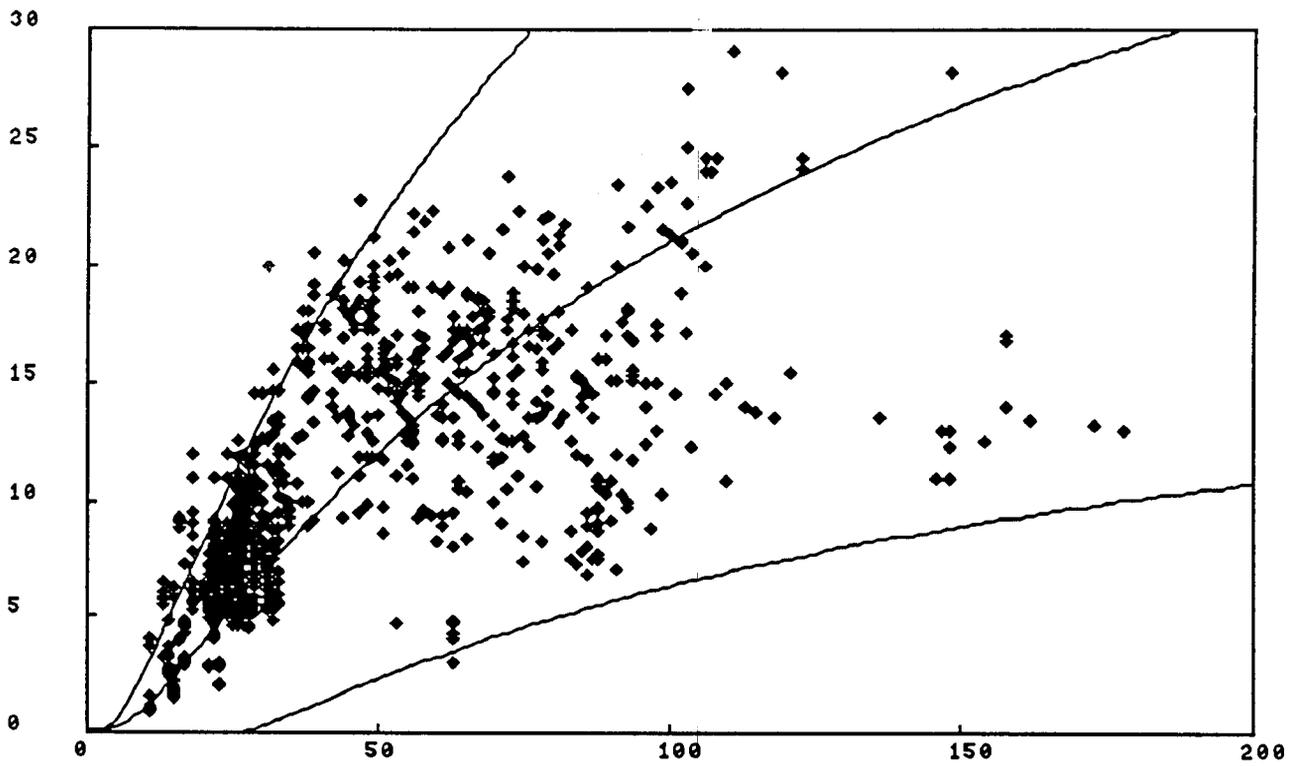
Arbre 66120 - Observations, modèle ajusté et résidus



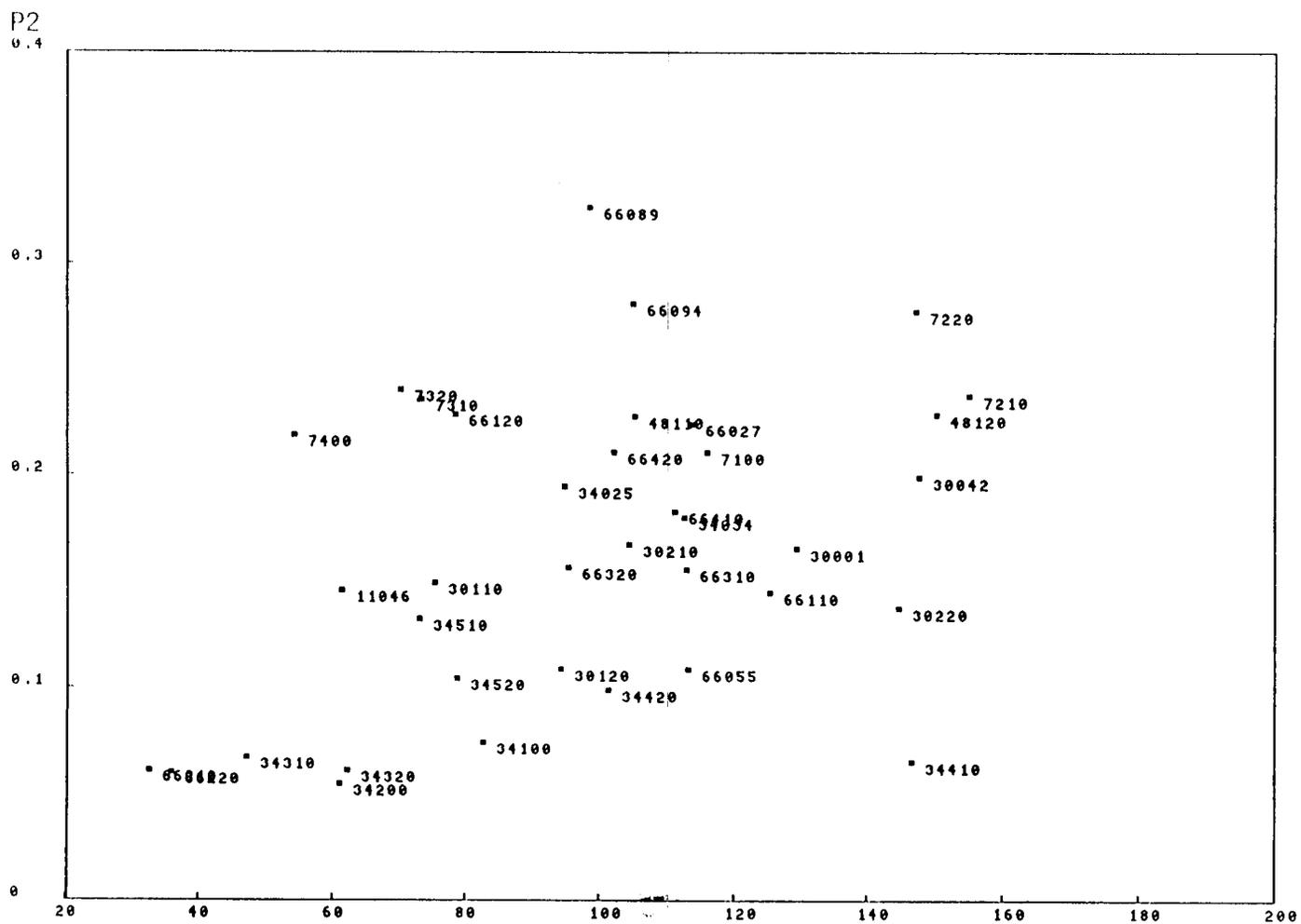
Analyses de tiges - Courbe moyenne et enveloppes



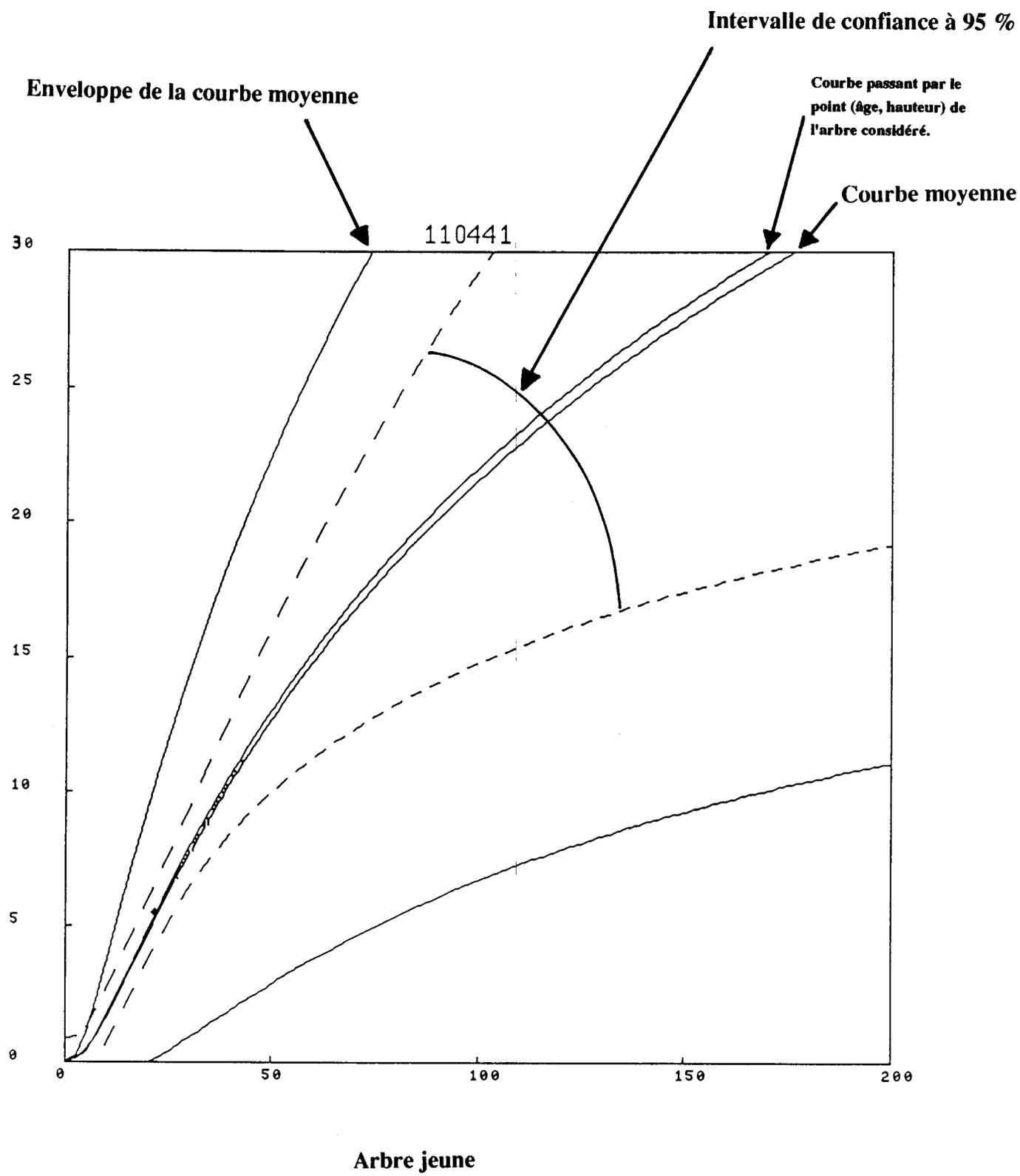
Données âge / hauteur
Ecart à la courbe moyenne des analyses de tiges

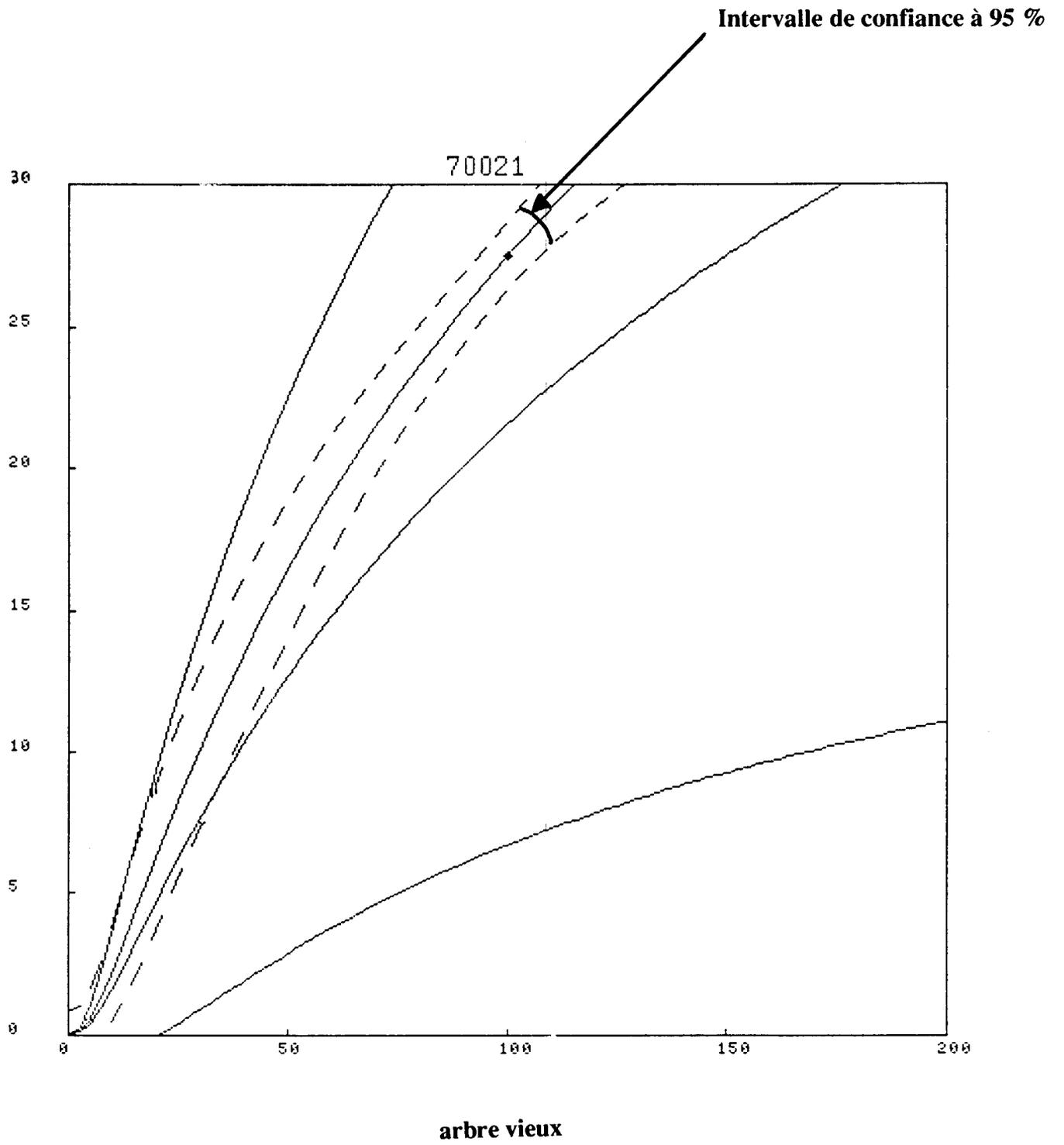


Représentation des arbres dans le plan P1 - P2



Exemples de prévision avec intervalle de confiance à 95 %





TRADUCTION ET RESUME D'UNE ETUDE ESPAGNOLE
SUR LE PIN DE SALZMANN

COMPARAISON DE CROISSANCE (Anales del instituto forestal)

5 classes de croissance ont été établies pour le Pin de Salzmänn en Espagne.

* Comparaison avec le Pin noir d'autriche

-La courbe de croissance en hauteur totale moyenne de la moins bonne classe autrichienne coïncide sensiblement avec la classe IV espagnole. La classe V espagnole n'est pas représentée dans les tables autrichiennes.

-Dans l'intervalle des 4 meilleures classes espagnoles sont incluses les 6 classes autrichiennes.

-L'évolution de la croissance en hauteur pendant la période 20 - 50 ans est très proche dans les deux systèmes de classification. Cependant, à partir de cinquante ans les meilleures classes autrichiennes augmentent clairement leur croissance en hauteur par rapport aux classes espagnoles correspondantes.

* Comparaison avec le Pin laricio de Corse (en Grande-Bretagne). La comparaison se fera sur la croissance en hauteur moyenne.

-Les deux premières classes anglaises ne sont pas représentées dans les peuplements espagnols. Ceci est dû aux conditions écologiques plus favorables des reboisements réalisés en Grande-Bretagne et à la supériorité de croissance du Pin laricio de Corse par rapport au Pin de Salzmänn, qui peut être confirmée par des essais effectués en Espagne.

-L'évolution du développement en hauteur des classes 3 et 4 anglaises et des classes I et II espagnoles est sensiblement la même si l'on s'intéresse à la période comprise entre 20 et 50 ans.

*Comparaison avec le Pin laricio de Corse (en France, Sologne).

-Les trois classes du Pin laricio en Sologne sont toutes supérieures aux classes du Pin de Salzmänn en Espagne.

*Comparaison avec le Pin laricio de Calabre (Sicile).La comparaison porte sur les hauteurs dominantes.

-Les trois qualités italiennes coïncident sensiblement avec les trois meilleures qualités espagnoles pendant les 50 premières années.Par la suite ces trois classes espagnoles ont une meilleure croissance.

-Il existe en Espagne des stations plus difficiles que celles du reste de l'Europe, qui imposent à l'administration forestière l'attention la plus soutenue au point de vue de la régénération et du traitement, déjà si difficiles dans les conditions les plus favorables à l'espèce.

COMPARAISON DES COURBES DE CROISSANCE DU PIN LARICIO ET DU PIN DE SALZMANN DANS LE SUD DE LA FRANCE CONTINENTALE.

(Le faisceau des courbes du Pin laricio est tiré du rapport de Roland COMMERCON).

-La meilleure classe du Pin laricio n'est pas représentée dans les classes du Pin de Salzmänn tandis que la moins bonne classe du Pin de Salzmänn n'a pas d'équivalent chez le Pin laricio. Notons que le Pin laricio n'a pas été introduit dans des stations aussi xériques que le Pin de Salzmänn.

LISTE DES PLANTES PRESENTES PLUS DE 5 FOIS DANS LES RELEVÉS

ANNEXE N° 8

Code	Effectif	N°		Code	Effectif	N°	
6	13	1.	<i>Acer monspessulanum</i>	2058	10	41.	<i>Helleborus foetidus</i>
211	23	2.	<i>Amelanchier rotundifolia</i>	2214	21	42.	<i>Ilex aquifolium</i>
317	10	3.	<i>Asphyllantes nonspelliensis</i>	2312	36	43.	<i>Juniperus communis</i>
352	25	4.	<i>Arbutus unedo</i>	2313	59	44.	<i>Juniperus oxycedrus</i>
429	26	5.	<i>Asparagus acutifolius</i>	2314	13	45.	<i>Juniperus phoenicea</i>
635	27	6.	<i>Brachypodium ramosum</i>	2426	39	46.	<i>Lavandula latifolia</i>
701	10	7.	<i>Cynpleurum fruticosum</i>	2428	11	47.	<i>Lavandula stoechas</i>
716	39	8.	<i>Buxus sempervirens</i>	2474	9	48.	<i>Leuzea compta</i>
749	53	9.	<i>Calluna vulgaris</i>	2484	15	49.	<i>Ligustrum vulgare</i>
753	17	10.	<i>Calycolome spinosa</i>	2586	29	50.	<i>Lonicera etrusca</i>
941	6	11.	<i>Carlina corymbosa</i>	2587	24	51.	<i>Lonicera impleta</i>
954	46	12.	<i>Castanea sativa</i>	2593	26	52.	<i>Lonicera caerulea</i>
1147	13	13.	<i>Cistus albidus</i>	3217	52	53.	<i>Phillyrea angustifolia</i>
1151	22	14.	<i>Cistus lamifolius</i>	3218	11	54.	<i>Phillyrea latifolia</i>
1152	14	15.	<i>Cistus nonspelliensis</i>	3276	12	55.	<i>Pinus halepensis</i>
1155	18	16.	<i>Cistus salviifolius</i>	3279	13	56.	<i>Pinus pinaster</i>
1167	16	17.	<i>Clematis flammula</i>	3281	18	57.	<i>Pinus sylvestris</i>
1169	19	18.	<i>Clematis vitalba</i>	3291	8	58.	<i>Pinus mugo</i>
1220	16	19.	<i>Cornus sanguinea</i>	3293	6	59.	<i>Pistacia lentiscus</i>
1225	6	20.	<i>Coronilla myrtilis</i>	3294	6	60.	<i>Pistacia terebinthus</i>
1244	6	21.	<i>Corylus avellana</i>	3393	7	61.	<i>Polypodium vulgare</i>
1260	33	22.	<i>Crataegus monogyna</i>	3499	18	62.	<i>Prunus avium</i>
1385	25	23.	<i>Daphne gnidium</i>	3506	7	63.	<i>Prunus mahaleb</i>
1386	8	24.	<i>Daphne laureola</i>	3512	35	64.	<i>Prunus spinosa</i>
1479	49	25.	<i>Doryenium suffruticosum</i>	3518	47	65.	<i>Pteridium aquilinum</i>
1582	21	26.	<i>Erica arborea</i>	3541	28	66.	<i>Quercus coccifera</i>
1585	20	27.	<i>Erica cinerea</i>	3543	101	67.	<i>Quercus ilex</i>
1589	32	28.	<i>Erica scoparia</i>	3544	108	68.	<i>Quercus lamellosa</i>
1672	27	29.	<i>Euphorbia characias</i>	3610	26	69.	<i>Rhamnus alaternus</i>
1676	6	30.	<i>Euphorbia cyparissias</i>	3665	86	70.	<i>Rosa sp</i>
1708	7	31.	<i>Euphorbia serrata</i>	3692	22	71.	<i>Rosmarinus officinalis</i>
1738	7	32.	<i>Euonymus vulgaris</i>	3693	91	72.	<i>Rubia perigrina</i>
1797	28	33.	<i>Fragaria vesca</i>	3709	96	73.	<i>Rubus sp</i>
1803	16	34.	<i>Fraxinus excelsior</i>	3742	15	74.	<i>Ruscus aculeatus</i>
1816	8	35.	<i>Fumana coridifolia</i>	3818	17	75.	<i>Sarcocolla minor</i>
1896	50	36.	<i>Genista pilosa</i>	3831	40	76.	<i>Sarcothamnus scoparius</i>
1898	10	37.	<i>Genista scorpius</i>	4002	19	77.	<i>Sedum sp</i>
2016	41	38.	<i>Hedera helix</i>	4184	21	78.	<i>Smilax aspera</i>
2035	8	39.	<i>Helianthemum ovatum</i>	4214	13	79.	<i>Sorbus aria</i>
2051	8	40.	<i>Helichrysum staechea</i>	4222	7	80.	<i>Sorbus torminalis</i>
				4235	6	81.	<i>Spartium juncium</i>
				4283	29	82.	<i>Stachys dubia</i>
				4355	49	83.	<i>Teucrium chamaecris</i>
				4362	19	84.	<i>Teucrium polium</i>
				4366	19	85.	<i>Teucrium scorodonia</i>
				4413	46	86.	<i>Thymus vulgaris</i>
				4561	6	87.	<i>Ulex parviflorus</i>
				4659	8	88.	<i>Viburnum lantana</i>
				4661	6	89.	<i>Viburnum tinus</i>
				4731	29	90.	<i>Viola sp</i>
				4818	8	91.	<i>Heracium</i>

LISTE DES PLANTES SUPPLEMENTAIRES
 PRESENTES MOINS DE 5 FOIS DANS LES
 RELEVES

5	1	448	<i>Asphodelus fistulosus</i>
4	2	600	<i>Betula verrucosa</i>
5	3	617	<i>Bonjeania hirsuta</i>
4	4	981	<i>Leptanthes pectinata</i>
5	5	1154	<i>Cistus Pouzolzi</i>
5	6	1222	<i>Coronilla ebneri</i>
4	7	1374	<i>Cytisus semiliflorus</i>
5	8	1588	<i>Erica multiflora</i>
5	9	1641	<i>Eryngium campestre</i>
5	10	1742	<i>Fagus sylvatica</i>
5	11	2030	<i>Helianthemum (silicux)</i>
4	12	2066	<i>Hepatica triloba</i>
4	13	2590	<i>Lonicera peridymenum</i>
5	14	2923	<i>Odontites lutea</i>
4	15	3082	<i>Osyris alba</i>
4	16	3516	<i>Psoralea bituminosa</i>
4	17	3549	<i>Quercus semiliflora</i>
5	18	3550	<i>Quercus suber</i>
5	19	3613	<i>Rhamnus frangula</i>
5	20	3647	<i>Robinia pseudoacacia</i>
4	21	3773	<i>Salix caprea</i>
4	22	4217	<i>Sorbus domestica</i>
5	23	4817	<i>Potentilla (calceae)</i>

INFORMATION MUTUELLE

Fréquence d'apparition d'une espèce

On s'intéresse à la fréquence d'apparition de chaque espèce dans chacune des 5 "classes" de fertilité.

Fréquence brute - Nombre de présences effectivement observées.

La valeur de cette fréquence n'a pas la même signification selon le nombre de relevés effectués dans chaque classe et selon la fréquence totale de l'espèce.

$$\text{Fréquence relative} = \frac{\text{Nombre de présences observées dans chaque classe}}{\text{Nombre de relevés effectués dans chaque classe}}$$

On peut comparer les fréquences relatives à l'intérieur d'une même espèce.

$$\text{Fréquence corrigée} = \frac{\text{Fréquence relative}}{\text{Proportion de relevés avec la plante dans l'ensemble des relevés}}$$

⇒ ces fréquences peuvent faire l'objet de comparaisons entre différentes plantes.

INFORMATION MUTUELLE ENTRE UNE ESPECE ET UN PARAMETRE ECOLOGIQUE

La quantité d'information apportée par une espèce relativement à un paramètre écologique peut être estimée à partir des profils écologiques de la présence et de l'absence de l'espèce, elle est appelée information mutuelle entre une espèce et un descripteur (GODRON, 1966 ; 1968).

Pour une espèce E et un descripteur L, elle se note I (L;E) et se définit comme suit :

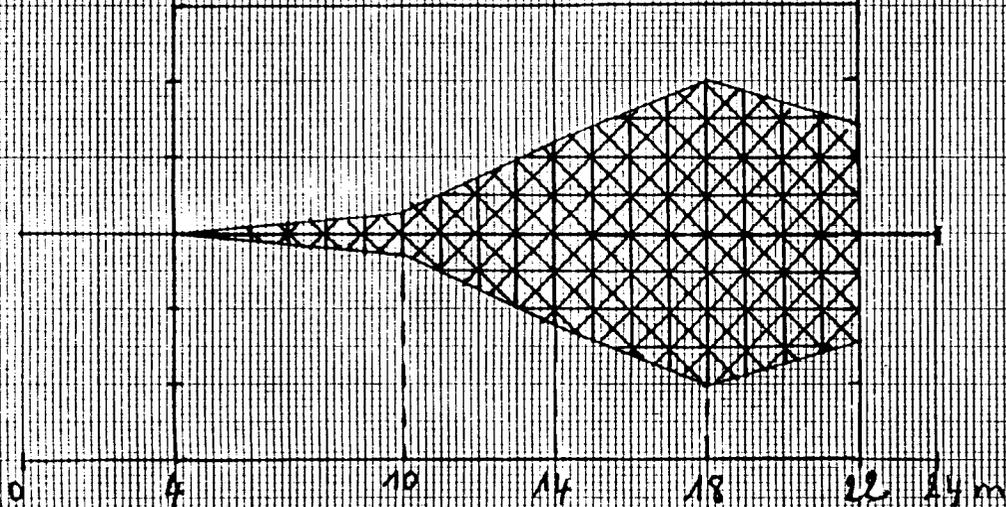
$$I(L;E) = \sum_1^{NK} \frac{UK}{NR} \log_2 \frac{U(k)}{R(k)} \cdot \frac{NR}{V(E)} + \sum_1^{NK} \frac{V(k)}{NR} \log_2 \frac{V(k)}{R(R)} \cdot \frac{NR}{V(E)}$$

avec NK = Nombre de classes de la variable écologique,
 NR = Nombre total de relevés effectués,
 U(K) = Nombre de relevés de la classe K où l'espèce E est présente,
 V(K) = Nombre de relevés de la classe K où l'espèce E est absente,
 R(K) = Nombre de relevés de la classe K,
 U(E) = Nombre total de relevés où l'espèce E est présente,
 V(E) = Nombre total de relevés où l'espèce E est absente.

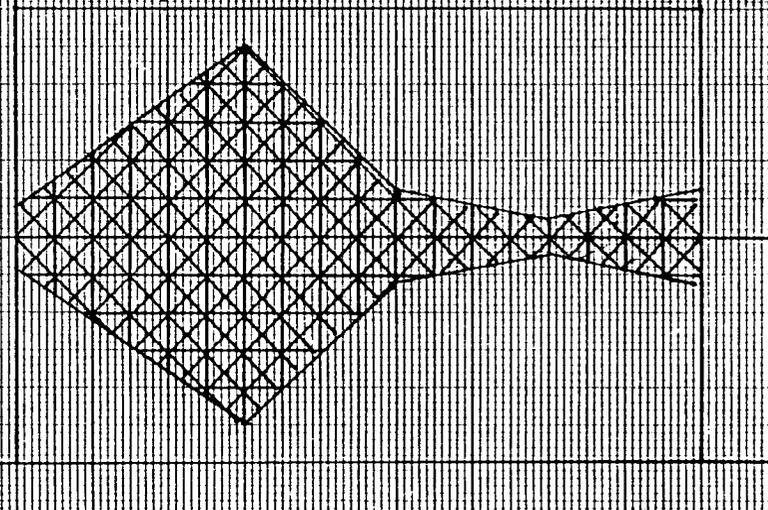
La valeur de l'information mutuelle entre une espèce et un paramètre écologique est d'autant plus grande que la présence de l'espèce est liée au paramètre écologique.

Représentation des fréquences corrigées de quelques espèces indicatrices

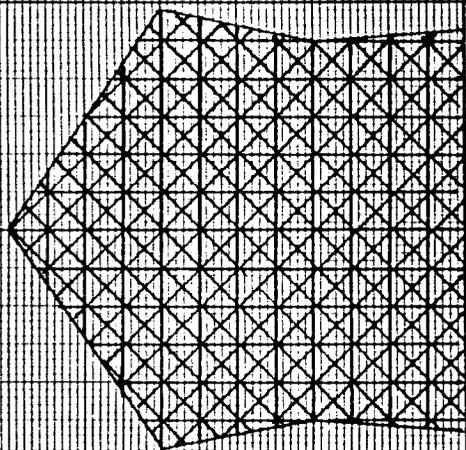
Crataegus monogyna



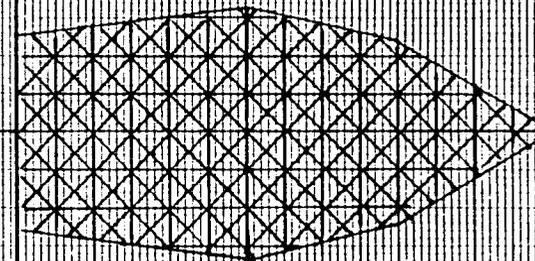
Brachypodium pinnatum



Fragaria vesca



Arbutus unedo



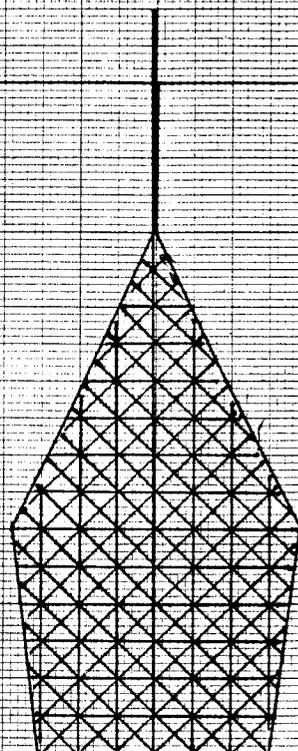
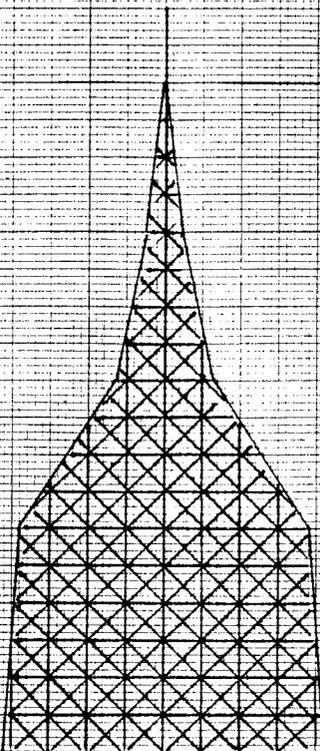
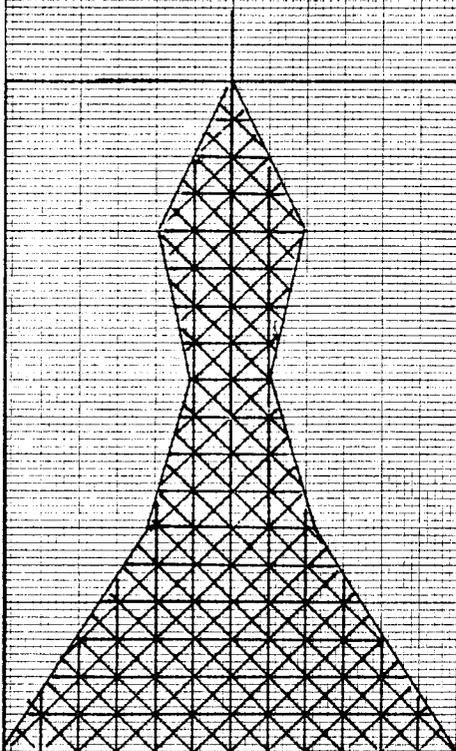
En abscisse : indices de fertilité en mètres.

En ordonnée (à partir de l'axe de symétrie) : fréquences corrigées à l'échelle 1/2.
(La hauteur totale en cm pour chaque indice d'une classe est égale à la fréquence corrigée de cette plante dans toute la classe)

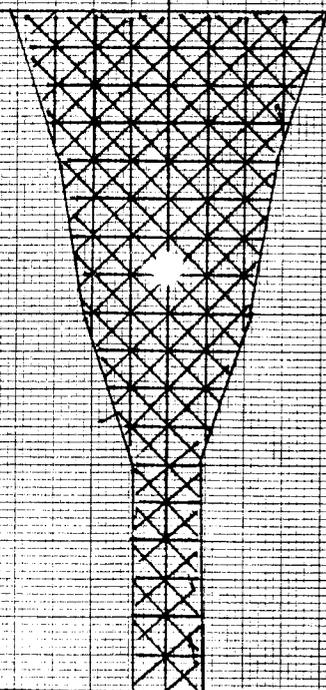
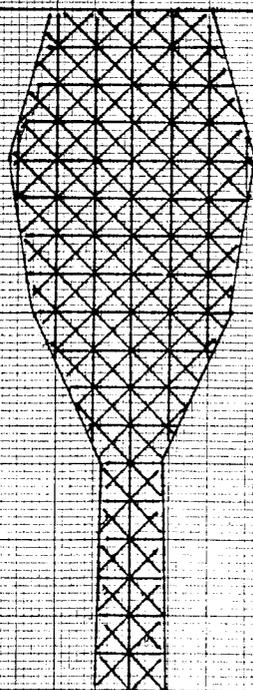
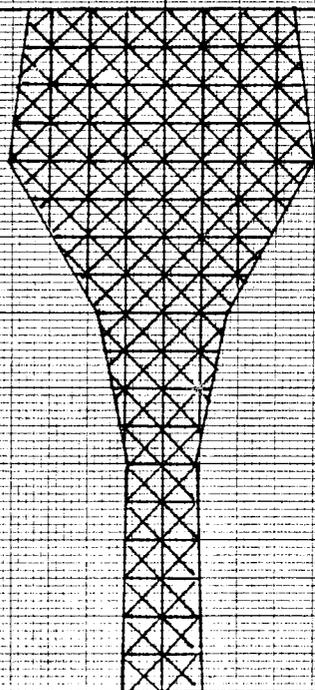
Cistus laurifolius

Lonicera implexa

Juniperus phoenicea



Indices de fertilité croissants →



Indices de fertilité croissants →

Sarcothamnus iso panicus

Castanea sativa

Pteridium aquilinum

ALTITUDES

-  de 0 à 100 m
-  de 100 à 500 m
-  de 500 à 1000 m
-  + de 1000 m.

- - - Limite des deux régions administratives

* 1 relevé

⑥ 6 relevés

Echelle 1:1.000.000e

