

CENTRE NATIONAL DU MACHINISME
AGRICOLE DU GENIE RURAL,
DES EAUX ET FORETS

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
GRENOBLE I

Groupement : Aix-en-Provence
Division : Techniques forestières méditerranéennes

Laboratoire de Biologie alpine

THESE

présentée à l'Université Joseph FOURIER
pour obtenir le diplôme de DOCTORAT
spécialité : Biologie :
Ecosystèmes continentaux arides, méditerranéens et montagnards

RELATIONS MILIEU-PRODUCTION Application au *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales.

Françoise d'EPENOUX

Soutenance le 12 octobre 1992 devant :

Directeur de Thèse :	SOUCHIER B.	Président
Membres du jury :	DUPLAT P.	Examineur
	FRANC A.	Examineur
	HOULLIER F.	Examineur
	MILLIER C.	Rapporteur
	OSWALD H.	Rapporteur

Cette thèse a été financée et suivie par les divisions Forêts du Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts (groupements d'Aix-en-Provence et de Riom), par l'Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts et par le Professeur Souchier (Université J. Fourier. Grenoble I).

qu'ils trouvent ici tous mes remerciements.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I) APPROCHE SYNTHETIQUE	12
1) Notion et utilisation de la station pour le gestionnaire	12
2) Relations station-production	12
II) APPROCHE ANALYTIQUE	13
III) PROTOCOLE ET METHODES CHOISIES	15

PRESENTATION GENERALE

I) CHOIX DE L'ESSENCE : PIN NOIR D'AUTRICHE	18
1) Histoire du Pin noir d'Autriche dans les Alpes externes méridionales	18
2) Essence appropriée pour notre étude	19
II) PRESENTATION DU MILIEU PHYSIQUE DES ALPES EXTERNES MERIDIONALES	20
1) Climat	20
1.1) Précipitations	21
1.2) Températures	22
1.3) Indices climatiques	25
1.3.1) "n" : nombre de mois secs	25
1.3.2) "S" : indice de sécheresse estivale	26
1.3.3) "Q2" : quotient pluviothermique	27
1.3.4) "GAMS" : indice de continentalité	28
1.4) Etages de végétation	29
2) Faciès lithologiques (roches et formations superficielles)	31
2.1) Calcaires	32
2.2) Marno-calcaires	32
2.3) Marnes	33
2.4) Autres formations	34
3) Régionalisation	35
3.1) axe Ventoux-Lure	35
3.2) La fosse Vocontienne	36
3.3) Nappe de Digne et son auréole	36
4) Conclusion	36
III) STRATIFICATION EN UNITES GEO-PEDOLOGIQUES HOMOGENES	37
1) Substratum géologique	38
2) Formations superficielles	39
3) Unités géo-pédologiques	40

IV) DESCRIPTION DES UNITES GEO-PEDOLOGIQUES	43
V) CONCLUSION	86

DONNEES ET METHODES

I) DONNEES	88
1) Données préexistantes et protocoles correspondants	88
1.1) Protocole et données de l'I.F.N.	88
1.2) Protocole et données de l'I.N.R.A.	89
2) Données récoltées durant l'été 1990 et l'été 1991	90
2.1) Différents types de données du milieu	91
2.1.1) La réserve utile	91
2.1.2) Analyse du calcaire total et actif en laboratoire	93
3) Données météorologiques	93
4) Choix de l'indice de fertilité et récolte des données dendrométriques correspondantes .	94
II) CALCUL DE L'INDICE DE FERTILITE	95
1) Phase initiale : à partir des données pré-existantes	95
1.1) Indice de fertilité à partir des données de l'I.F.N.	95
1.2) Indice de fertilité à partir des données de l'I.N.R.A.	98
1.3) Comparaison des deux faisceaux des courbes I.F.N. et I.N.R.A.	98
2) Solution adoptée : modélisation J.-Ch. HERVÉ	100
2.1) Ajustement d'un modèle aux analyses de tiges de l'I.N.R.A.	100
2.2) Utilisation de ce modèle pour définir l'indice de fertilité	101
III) METHODES POUR ABORDER LES RELATIONS ENTRE LE MILIEU ET LA PRODUCTION	102
1) Test statistique : analyse de variance	102
1.1) Relations entre les entités du milieu et la production	102
1.2) Relations entre les unités géo-pédologiques et le calcaire actif	103
2) Analyse des données	103
2.1) Analyse des correspondances	103
2.2) Analyse en composantes principales sur les données pluviométriques	104
3) Régression linéaire multiple	105
3.1) Sur les descripteurs simples du milieu	105
3.2) Sur les axes factoriels combinaisons linéaires du milieu	106
4) Régression non linéaire	106

ECHELLE DU MASSIF FORESTIER

I) APPROCHE SYNTHETIQUE : RELATIONS UNITES GEO-PEDOLOGIQUES / PRODUCTION	110
1) Analyse de variance pour valider la liaison entre unité géo-pédologique et fertilité .	110

2) Moyenne de H80 pour chaque unité géo-pédologique	113
3) Illustration des unités géo-pédologiques par le calcaire actif	116
4) Conclusion	121
II) APPROCHE ANALYTIQUE : VERS UNE MODELISATION	122
1) Résultats de l'analyse des données	122
1.1) Expression de H80 à partir des axes factoriels issus de l'analyse des correspondances	122
1.2) L'ensemble des variables écologiques significatives pour décrire H80	124
2) Régressions linéaires multiples exprimant la productivité en fonction de variables du milieu	128
2.1) Les expressions milieu-production pour le Ventoux	128
2.2) Commentaires et interprétation écologique pour le Ventoux	132
2.3) Les expressions milieu-production pour Solaure	133
2.4) Commentaires et interprétation écologique pour Solaure	134
2.5) Les expressions milieu-production pour le Diois	136
2.6) Commentaires et interprétation écologique pour le Diois	137
3) Régressions non linéaires exprimant la fertilité en fonction de variables du milieu	139
4) Utilisation de la variable fonctionnelle : calcaire actif dans une régression linéaire multiple	143
III) CONCLUSION	145

ECHELLE INTERMEDIAIRE : PHASE D'EXTRAPOLATION

I) PROTOCOLE	148
II) REALISATION, QUELQUES RAPPELS DES METHODES	149
1) Calcul de H80 pour les relevés supplémentaires grâce aux modèles élaborés à grande échelle	149
2) Ajout de relevés supplémentaires aux relevés effectués à grande échelle	150
2.1) Approche synthétique : relations unité géo-pédologiques/production	150
2.2) Approche analytique : nouvelles expressions de la fertilité à l'échelle intermédiaire	150
III) RESULTATS	151
1) Calcul de H80 pour les relevés supplémentaires grâce aux modèles élaborés à grande échelle	151
2) Approche synthétique : relations unités géo-pédologiques/production	162
3) Approche analytique : expressions de la fertilité à l'échelle intermédiaire	167
4) Conclusion	173

ECHELLE DES ALPES EXTERNES MERIDIONALES

I) RELATIONS MILIEU-PRODUCTION : UTILISATION DE DONNEES PREEXISTANTES	175
1) Echantillon proposé par l'I.F.N.	175
1.1) Résultats de l'I.F.N.	175
1.2) Résultats de nos traitements	179
2) Echantillon proposé par l'I.N.R.A.	181
2.1) Résultats de nos traitements	181
2.2) Comparaison entre nos résultats et ceux issus de l'article de TIMBAL J., TURREL M. et DUCREY M., 1985	183
3) Conclusion	185
II) RELATIONS MILIEU-PRODUCTION : UTILISATION DE NOS DONNEES .	186
III) COMPARAISON ENTRE LES TROIS ECHANTILLONS DISPONIBLES (I.F.N., I.N.R.A. ET NOTRE ETUDE)	188
IV) CONCLUSION	190

DISCUSSION

I) DECOUPAGE EMBOITE, DIVERSES ECHELLES POUR REpondre A UN MEME SUJET	193
II) UNE METHODE POUR REpondre AU SUJET	194
1) Une méthode pour répondre au sujet, quelle que soit l'échelle	194
2) Une méthode pour répondre au sujet entre les échelles	196
3) Méthodes écartées bien qu'elles répondent au sujet	196
3.1) La segmentation	196
3.2) La régression non linéaire multiple	197
III) RESULTATS ET PRECISIONS DE CES RESULTATS EN FONCTION DE L'ECHELLE	197
1) Grande échelle et échelle intermédiaire	199
1.1) Résultats du tableau	199
1.2) Prédiction de H80 entre grande échelle et échelle intermédiaire	199
2) Petite échelle	200
IV) DES VARIABLES POUR EXPRIMER LA FERTILITE	200
1) Variables les plus significatives pour décrire H80	200
1.1) Signification générale des expressions milieu-production	200
1.2) Variables fonctionnelles	201
1.2.1) Réserve utile	201
1.2.2) Calcaire actif	202
1.2.3) Synthèse de la relation réserve utile, calcaire actif / production	204

2) Variables non retenues	204
2.1) Variables du recouvrement de la végétation	204
2.2) La flore	205
2.3) Compensation de variables du milieu	206

CONCLUSION



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

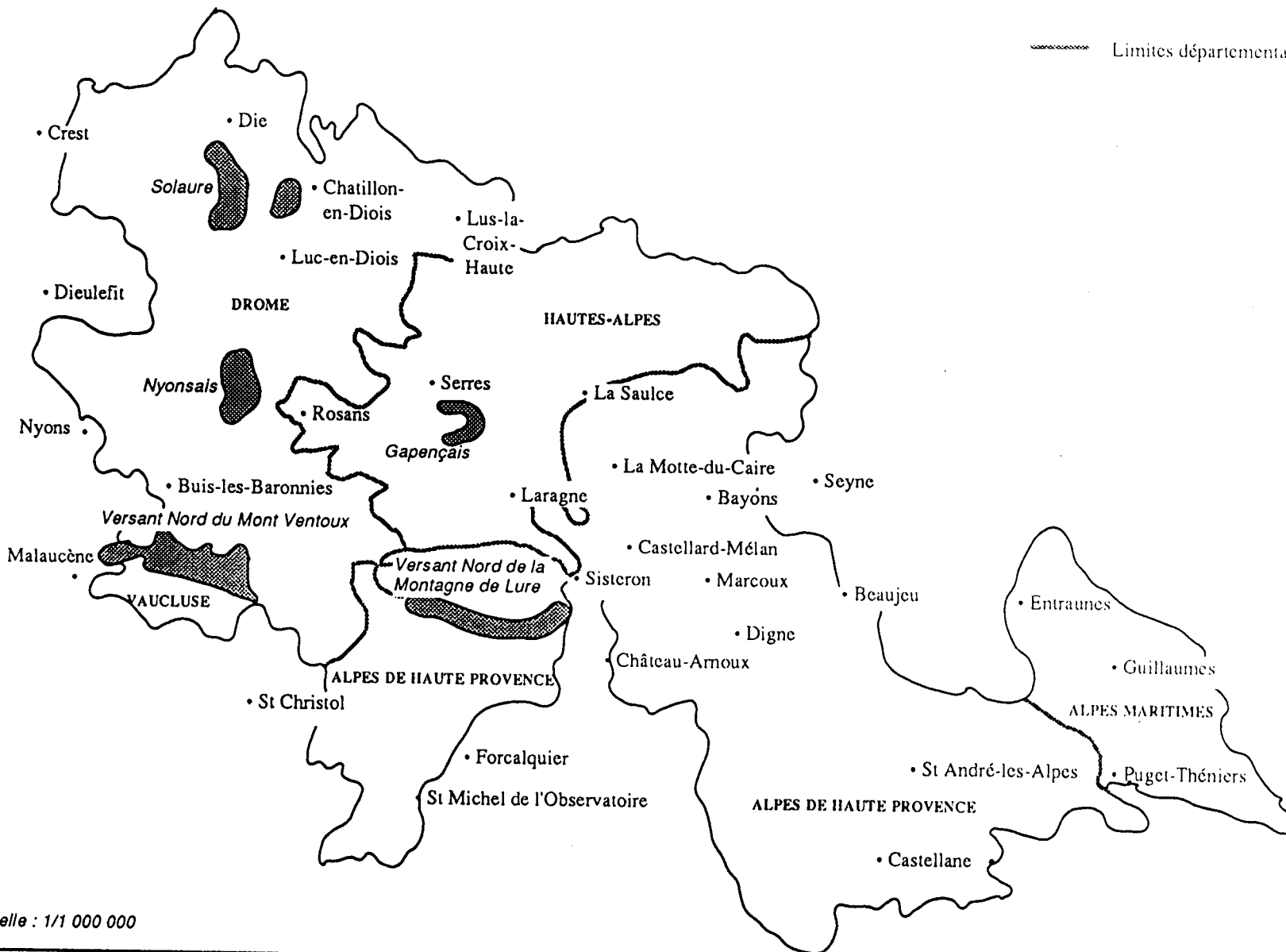
ANNEXES

FICHE DE RELEVÉ	217
CODIFICATION DES DONNÉES I.N.R.A.	224
INDEX PAR NOMS D'AUTEURS	225

INTRODUCTION

Localisation des massifs forestiers étudiés dans les Alpes externes méridionales

-  Massifs étudiés
-  Limites départementales



Introduction

Depuis longtemps, les forestiers ont cherché, d'une part à définir la production ligneuse et d'autre part, à analyser et à estimer les facteurs du milieu ayant une incidence sur cette production. La liaison entre cette production et le milieu a longtemps été exprimée de façon qualitative, à partir d'observations menées sur le terrain. A présent, ce type de problème demeure d'actualité, mais sollicite une étude plus quantitative. Afin d'estimer cette liaison entre la production et le milieu, deux approches complémentaires du milieu se sont développées. Elles répondent de toute façon aux deux objectifs suivants :

- * **expliquer la production ligneuse** des peuplements étudiés par le milieu ;
- * **prévoir la production ligneuse** d'un peuplement à partir de situations écologiques déjà observées.

Ces deux approches parallèles coexistent et elles permettent de définir le milieu. Elles peuvent être décrites de la façon suivante :

- * *une approche stationnelle ou approche synthétique* : conduisant à une étude des relations "station-production" ; il faut disposer d'une **typologie des stations**, pour établir ultérieurement les liens entre cette typologie des stations et la productivité d'une essence particulière ;
- * *une approche autécologique ou approche analytique* : liaison directe entre les descripteurs du milieu et la productivité.

Déterminer la production ligneuse grâce à des éléments du milieu s'inscrit dans les objectifs de recherche de la division "forêt méditerranéenne" du C.E.M.A.G.R.E.F.* d'Aix-en-Provence. Ce service s'est notamment préoccupé de l'**autécologie des essences forestières**, avec la réalisation de fiches écologiques concernant les différentes essences forestières méditerranéennes. Pour chaque essence, une correspondance entre les paramètres du milieu et les classes de production est établie grâce aux tables de production pré-existantes. De plus, ce service s'est attaché à mettre en forme des outils de compréhension du milieu : les **catalogues des stations**.

Par ailleurs, en ce qui concerne les "relations entre le milieu et la production", le C.E.M.A.G.R.E.F. d'Aix-en-Provence souhaite développer un **protocole** et une **méthode** pour répondre à ce sujet. Notre travail de recherche s'est organisé autour de quelques questions qui structurent la réflexion, parmi lesquelles :

- * **Quelle échelle de perception** doit-on choisir pour exprimer les relations entre le milieu et la production ?,
- * Pour une échelle de perception retenue, quelle est la **méthode** pour exprimer ces relations ?,
- * Changer d'échelle de perception consiste à aborder une **phase de prédiction**, qu'en est-il de la méthode ?,
- * Lorsqu'on balaie plusieurs échelles de perception, comment évolue la **précision** de l'estimation de la production par le milieu ?.

Ces questions sont aujourd'hui à l'ordre du jour pour le gestionnaire de terrain, qui doit choisir un mode de sylviculture à pratiquer et des essences de reboisement. Un organisme tel que le C.E.M.A.G.R.E.F., organisme de recherche appliquée, répond à cette attente. **Notre travail s'est inscrit dans cet orientation, à savoir réfléchir au protocole et aux méthodes en fonction de l'échelle**, tout en gardant bien en tête les besoins du terrain. A cet effet, nous avons choisi une essence forestière dans son aire de répartition qui pose actuellement de nombreux problèmes aux forestiers locaux.

Avant d'exposer nos objectifs et le plan de notre travail, nous voulons faire quelques rappels concernant les deux approches actuelles, qui permettent de définir le milieu.

* C.E.M.A.G.R.E.F. : Centre d'Etudes du Machinisme Agricole du Génie Rural et des Eaux et Forêts

I) APPROCHE SYNTHETIQUE

Cette approche repose sur les relations "station-production".

1) NOTION ET UTILISATION DE LA STATION POUR LE GESTIONNAIRE

Le concept de "station" correspond à une *unité intuitive*, liée à un certain niveau de perception et d'homogénéité. Cette notion synthétique résulte de l'intersection des facteurs écologiques et des organismes vivants. ROL R., 1954 a donné la définition suivante "la station est une étendue de terrain d'ailleurs très variable en superficie, de quelques dm² à plusieurs km², mais homogène quant aux conditions écologiques qui y régissent. Autrement dit la station est une unité topographique définie par un ensemble de facteurs climatiques, édaphiques et biotiques". L'auteur ajoute : "dans chaque station existe un groupement végétal qui la caractérise et qui résulte de l'action du milieu et des possibilités floristiques locales". BONNEAU M. et TIMBAL J., 1973 critiquent cette fourchette des surfaces, trop grande pour l'Europe.

Cette définition écologique de la station nécessite d'être complétée, lorsqu'il s'agit de caractériser la "station forestière". En effet, au concept d'homogénéité écologique, il faut ajouter l'idée d'homogénéité du peuplement et d'un concept de gestion de ce peuplement (BONNEAU M. et TIMBAL J., 1973) ; de telle sorte que pour une station donnée recouverte par un peuplement homogène, un même traitement sylvicole donnera une même production.

Finalement, DELPECH R., DUMÉ G. et GALMICHE P., 1985 ont formalisé la station de la façon suivante : "étendue de terrain de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques (mésoclimat, topographie, composition floristique, et structure de la végétation spontanée, sol)", avec comme extension au concept de station forestière ceci : "une station forestière justifie, pour une essence déterminée, une sylviculture précise, avec laquelle on peut espérer une productivité comprise entre des limites connues".

Désormais lorsque nous emploierons le terme "station", il faudra comprendre "station forestière". Une bonne connaissance des stations pour un gestionnaire de terrain se traduit par un choix optimal des essences en vue des plantations et au-delà une réussite de la plantation : réussite qualitative (bon choix de l'essence) et quantitative (productivité) (BECKER M. et LE GOFF N., 1988). Ces deux points suffisent à démontrer l'utilité des stations et donc de la **typologie des stations**.

2) RELATIONS STATION-PRODUCTION

En premier lieu ce type de démarche appelle un échantillonnage, qui s'effectue dans l'*unité de base* : le type de **station**. La station est reconnue grâce à une clé de détermination reposant sur des caractères abiotiques et sur la végétation. A un type de station correspond une valeur de la productivité de l'essence étudiée ; cette valeur se présente généralement sous la forme d'un indice, dans la mesure où l'allure de la courbe de croissance est constante dans un type de station donné, pour les différents relevés. L'échantillonnage doit être suffisant et doit rendre compte d'une certaine variabilité au sein de chaque station principalement d'ordre génétique ou sylvicole (BECKER M. et LE GOFF N., 1988).

Certains types de station d'un catalogue peuvent ne pas être échantillonnés ou très faiblement par rapport à d'autres ; à cela deux explications :

Introduction

- * *cette station est peu étendue* ; type marginal, dans ce cas l'indice de productivité peut présenter une variabilité plus forte que dans le cas de stations échantillonnées normalement ;
- * *cette station n'est pas peuplée de l'essence en question* ; on ne peut rien en conclure car de trois choses l'une, soit l'essence a disparu à cause de la sylviculture, soit la station offre un milieu trop extrême pour permettre le développement de cette essence, soit le milieu semble correct, mais l'essence n'est jamais apparue ou n'a jamais été plantée.

Ceci est un inconvénient de cette approche station-production : certaines stations sont non renseignées sur la production d'une essence, sans que l'on sache pourquoi. Par ailleurs, il n'est pas toujours aisé de reconnaître une station, malgré la clé de détermination.

Un autre inconvénient dépend du **cadre physique**, qui a été fixé pour élaborer une typologie des stations ; cet espace peut être très restreint par rapport à l'aire de répartition de l'essence choisie. A titre d'exemple, l'aire, du sud-est de la France pour le *Pin noir* d'Autriche, correspond à 14 régions forestières I.F.N.* ; dans bon nombre de cas, une région forestière I.F.N. coïncide avec une typologie des stations, d'où une difficulté assez courante de décalage entre l'aire de répartition de l'essence et l'étendue du catalogue disponible. Si on ne peut pas extrapoler un catalogue au-delà de ses limites initiales, certaines stations peuvent être éliminées à cause d'une impossibilité à établir leur relation station-production par manque d'effectif, alors qu'elles sont très répandues en périphérie du catalogue. Une autre difficulté peut être liée à l'existence de plusieurs catalogues sur l'aire de répartition de l'essence à analyser ; ainsi, une même station peut être décrite différemment dans plusieurs catalogues (voir NOUALS D. et BOISSEAU B., 1992).

L'avantage évident de cette méthode réside dans le fait que si un catalogue des stations existe pour une région où doit être réalisée l'étude, le travail est assez simplifié pour conclure sur les relations entre station et production. A partir de la clé de détermination des stations, il suffit de repérer la station, de l'échantillonner, afin de déterminer un indice de fertilité caractéristique, pour une ou plusieurs essences ; un bon exemple est l'étude des "potentialités des stations forestières des plateaux calcaires de Lorraine, pour l'érable sycomore et le merisier" LE GOFF N. et MADESCLAIRE A., 1986.

Dans le cas où aucun catalogue n'est disponible sur une région d'étude, est-il préférable de réaliser un catalogue des stations, puis d'établir les relations entre ces stations et la production ; ou bien vaut-il mieux entreprendre directement l'étude des relations entre les paramètres "bruts" du milieu et la production ? Le paragraphe suivant doit nous permettre de répondre à cette question.

II) APPROCHE ANALYTIQUE

Dans ce cas, aucune organisation préalable du milieu n'est nécessaire. Il s'agit d'utiliser une **méthode directe**, afin "de faire apparaître les facteurs du milieu, non pas uniquement d'une manière synthétique, mais en tant que tels, pour expliquer la production" GARBAYE J., LEROY Ph., LE TACON F. et LEVY G., 1970 ; leur article expose clairement les étapes nécessaires afin de mettre en place ce type d'étude "relations milieu-production" :

- * **sélection** des régions où la recherche s'avère prioritaire ;
- * **délimitation** dans ces régions des zones de travail (choix d'une échelle de perception) ;
- * choix d'un **plan d'échantillonnage** ;
- * détermination de la **nature des mesures** effectuées sur chaque point ;
- * choix d'une ou de plusieurs **méthodes d'interprétation**.

* I.F.N. : Inventaire Forestier National

Introduction

GARBAYE J., LEROY Ph., LE TACON F. et LEVY G., 1970 rappellent que ces méthodes se sont développées aux Etats-Unis, avant d'être reprises en France notamment par DECOURT N., GODRON M., ROMANE F. et TOMASSONE R., 1969, qui ont travaillé plus spécialement sur les relations entre le sol et la production. Puis, cette méthode s'est étendue au climat (OSWALD H., 1969) et au-delà à l'ensemble des paramètres écologiques, écophysiologiques, en fonction de l'échelle retenue ; en effet, "à partir de la zone de travail initiale : zone climatiquement homogène, on peut prévoir des regroupements de zones de proche en proche, ou de nouveaux découpages", ce qui correspond à des changements d'échelle.

Après le choix de l'espace de travail, vient l'échantillonnage de telle manière que, **l'échantillon doit couvrir à la fois l'amplitude complète de la production et la totalité des situations écologiques.** Pour chaque placette de cet échantillon, une *grandeur fertilité à expliquer* est récoltée, ainsi qu'un certain nombre de *caractéristiques du milieu : les variables explicatives*. Parmi les variables explicatives, on distingue deux types : les variables "simples" (lecture directe sur le terrain) et les variables "complexes" (issues d'analyses en laboratoire ou de combinaisons entre variables simples) ; ces dernières posent souvent des problèmes d'évaluation.

Un certain nombre de techniques mathématiques appropriées et d'outils informatiques sont utilisables pour aborder les "relations milieu-production", mais il reste à optimiser les choix en ce qui concerne les **méthodes** (MILLIER C., 1973).

Les résultats que l'on peut tirer de ces traitements sont les suivants :

- * détermination de facteurs du milieu qui agissent sur la croissance ;
- * estimation de la part du milieu dans l'explication de l'indice de fertilité ;
- * prévision de la production en fonction de facteurs du milieu sélectionnés ;
- * précision et évolution de ces résultats en fonction de l'échelle retenue.

Cette "approche analytique" du milieu présente comme avantage pour le gestionnaire de terrain de ne pas exiger une étude préalable du milieu, donnant lieu à un découpage en entités homogènes. Il s'agit donc d'exprimer directement les relations entre la fertilité et le milieu. L'inconvénient de ce type d'approche réside dans le caractère exclusif de cette relation, dans la mesure où les conclusions ne sont valables que pour la seule essence étudiée.

EN CONCLUSION

En conclusion, nous rappellerons simplement que :

- * la **typologie des stations** offre une connaissance fine du milieu et des informations plutôt qualitatives et peu précises concernant la production de toutes essences ;
- * alors que, **l'étude des relations entre le milieu et la production**, propose une correspondance directe entre quelques éléments du milieu et l'indice de production, cela pour une essence choisie, dans un espace bien délimité ; ces résultats obtenus ne sont nullement transposables à une autre essence et l'étude du milieu n'est que partielle dans cet espace.

Ces deux types d'étude présentent toutefois quelques inconvénients, à bien cerner afin d'y apporter une solution. Le principal danger dans ces études, qui visent à mettre en relation le milieu (sens large : stations ou descripteurs écologiques) et la production, est d'oublier la part des **aspects génétiques et sylvicoles**, dans l'explication de la production.

Introduction

De plus, concernant l'essence il est préférable de travailler sur des peuplements âgés ; en effet, de trop jeunes peuplements peuvent être sources d'erreurs pour la détermination des relations entre le milieu, au sens large et la production. Il est d'une part difficile de prévoir un indice de fertilité sur des peuplements jeunes, et d'autre part dans les premières années, la croissance des arbres peut être influencée par le mode de plantation, par la présence d'herbacées et par certains facteurs limitants du "milieu" (sécheresse, l'absence d'eau réduit la croissance plus fortement pour une plantule que pour un arbre).

Enfin, au regard de ces deux approches nous allons dans le paragraphe suivant exposer nos objectifs et les moyens que nous nous sommes donnés pour les atteindre.

III) PROTOCOLE ET METHODES CHOISIES

Les objectifs de cette thèse sont au nombre de deux :

- * Mettre en place une méthode exprimant les relations entre le milieu et la production, en fonction de l'échelle de perception retenue : **phase descriptive**.
- * Puis, entre chaque échelle de perception, prévoir une méthode afin de prédire la production grâce à des éléments du milieu : **phase prédictive**.

Afin de répondre à ces objectifs, nous avons choisi une essence : le *Pin noir d'Autriche*, dans une région : les *Alpes externes méridionales*, qui pose actuellement des problèmes aux gestionnaires locaux. Cette essence largement décrite dans la "partie I" présente l'avantage d'avoir été introduite sur un espace exceptionnellement vaste, offrant une grande diversité écologique et en conséquence une grande variabilité en terme de production. De plus, les aspects génétiques et sylvicoles étant réduits, il nous a paru intéressant de retenir cette essence pour répondre à ce sujet.

Notre travail s'est fixé premièrement sur le **choix d'échelles de perception**, puis sur les méthodes à sélectionner pour répondre au sujet. Qu'elles sont les échelles finalement retenues pour aborder ce sujet ?

- * L'aire de répartition du *Pin noir d'Autriche* coïncide avec les *Alpes externes méridionales*, cette échelle est donc l'échelle la plus petite.
- * Cet espace bien trop vaste a suscité un découpage en entités homogènes suivant des facteurs écologiques, ayant une action à cette échelle (climat et géologie). Ainsi stratifié en trois entités, nommées *régions climato-géologiques*, nous avons répondu au sujet à cette échelle de perception dite intermédiaire.
- * Enfin, pour caractériser chaque entité de l'échelle intermédiaire, sur les conseils des forestiers locaux, nous avons choisi des *massifs forestiers dits tests*, correspondant à l'échelle la plus grande dans cette étude.

Ces trois échelles coïncident avec trois espaces géographiques emboîtés, pour lesquels nous avons voulu exprimer la production en fonction du milieu. La **méthode** retenue est unique, quelle que soit l'échelle et offre des résultats, dont la précision diffère en fonction de l'échelle. Entre deux échelles, nous avons abordé une phase dite d'extrapolation, qui a nécessité une nouvelle méthode, valable quelle que soit le changement d'échelles.

Dans cette thèse, nous avons mené de front pour chaque échelle de perception, les deux approches évoquées précédemment : **approche analytique** et **approche synthétique**. Les résultats se décomposent de la façon suivante :

- * *pour les trois échelles* : l'approche analytique nous a permis d'exprimer la fertilité par quelques paramètres écologiques, puis de prédire la production lors d'un changement d'échelle ;

Introduction

- * *pour l'échelle la plus grande et l'échelle intermédiaire* : une approche synthétique du milieu sous la forme d'unités géo-pédologiques décrites ultérieurement, nous a permis également d'exprimer la production. Ces unités géo-pédologiques ne sont pas de véritables stations, car elles sont non homogènes du point de vue de la composition floristique.

Enfinement faisant suite à cette introduction, la première partie (PARTIE I) propose une "PRESENTATION GENERALE", suivie de l'exposé des "DONNEES ET METHODES" (PARTIE II). Une réponse est alors proposée pour chaque échelle de perception depuis l'échelle la plus grande (PARTIE III) vers l'échelle la plus petite (PARTIE V), en passant par l'échelle intermédiaire (PARTIE IV). Enfin une discussion vient clore notre travail (PARTIE VI). Nous avons choisi d'exposé cette **succession d'échelles de perception emboîtées**, en menant en parallèle l'**approche synthétique** et l'**approche analytique**. Enfin nos résultats descriptifs et prédictifs nous permettront de conclure sur la précision de la réponse au sujet et sur l'importance du milieu dans l'explication de la production. Ces conclusions devraient être intégrées aux travaux menés par les forestiers, afin de prévoir les choix ultérieurs à faire à propos de l'avenir du *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales.

PARTIE I

PRESENTATION GENERALE

Afin d'initier correctement notre thème de recherche, il est indispensable d'en fixer le cadre, à partir des moyens disponibles. A cet effet, nous proposons dans ce chapitre de :

- * préciser le **choix d'une essence forestière** pour répondre au sujet, (I) ;
- * caractériser l'aire de répartition de cette essence, qui correspond au **cadre physique** de notre étude. Cet espace géographique dispose de **particularités climatiques et géologiques** à inventorier, puis à utiliser pour prévoir un découpage de cet espace initial. Cette régionalisation est alors illustrée par des **massifs forestiers tests** (II) ;
- * stratification de chaque massif forestier test en entités homogènes d'un point de vue géo-pédologique, nommées **unités géo-pédologiques** (III) et description des ces unités géo-pédologiques (IV).

I) CHOIX DE L'ESSENCE : PIN NOIR D'AUTRICHE

1) HISTOIRE DU *PIN NOIR* D'AUTRICHE DANS LES ALPES EXTERNES MERIDIONALES

Cette essence est répertoriée sous le nom de *PINUS NIGRA* Arn. ssp. *NIGRICANS* Host. (var. *austriaca* (Höss) Novak) (DEBAZAC E.F., 1963).

Au cours des siècles précédents, les Alpes externes méridionales subissaient à chaque orage violent, des crues catastrophiques, sur les surfaces dépourvues de couvert végétal. Il fallut attendre 1860 pour voir apparaître les premières lois sur la restauration et la conservation des terrains de montagne (R.T.M.) (COMBES F. et BARTET J.-H., 1982).

Les forestiers à l'époque ont observé les qualités du *Pin noir* d'Autriche à partir des premiers essais dans les pépinières et les plantations (Grimone (dept. 26), col du Labouret et Seyne, (dept. 04)) ; ils ont retenu cette essence et l'ont utilisé massivement pour les reboisements de terrains à écologie difficile, c'est-à-dire les reliefs accidentés, les sols sensibles à l'érosion pluviale, les sols instables et pauvres, les substrats superficiels, les versants secs, etc.

En effet, le *Pin noir* d'Autriche présente comme première qualité d'être une **essence atypique**, qui peut réussir dans des milieux hostiles ou dépourvus de caractéristiques écologiques nettes, puisqu'il supporte d'être installé dans une zone à érosion intense et permet même au milieu de se révéler (COMBES F. et BARTET J.-H., 1982). Il a un comportement plastique et frugal ; il aime la pleine lumière dès 3 ou 4 ans, pour bénéficier d'un développement optimal. Dans le sud-est de la France, il prospère correctement et se régénère naturellement de 650 à 1200 m. Il a une faculté considérable à résister à la sécheresse, au froid et ses branches supportent sans casser la neige. Il développe un système racinaire pivotant, qui se transforme très vite en racines traçantes, lui permettant de s'accrocher dans les terrains difficiles, par exemple les "Terres noires". Il dispose d'une bonne résistance aux calcaires grâce à la présence de champignons mycorrhiziens. (COUHERT B., 1990 ; C.E.M.A.G.R.E.F., 1987).

L'ampleur et la réussite de l'implantation de cette essence dans les Alpes externes méridionales confirment le choix judicieux opéré par DEMONTZEY (DEMONTZEY P., 1882), qui dirigea ces grands travaux de reboisement dès 1868. Ces travaux se poursuivirent jusqu'en 1936 avec une interruption durant la première guerre mondiale.

Puisqu'il s'agissait de lutter contre l'érosion des terrains de montagne, ces forêts ont été implantées régulièrement sur de grandes surfaces, à très forte densité et bien souvent

Présentation générale

sans éclaircie ; elles sont généralement monospécifiques. Ces peuplements artificiels atteignent actuellement entre 80 et 120 ans ; sans connaître leur durée de vie, il faut noter que certains présentent aujourd'hui un aspect vieilli (apparition de gui et mortalité précoce) et ils nécessitent une intervention sylvicole urgente.

Ce renouvellement de première génération des peuplements pose de multiples problèmes aux gestionnaires, qui se heurtent au coût des travaux par rapport au faible intérêt économique que représente cette essence.

Pour certaines stations particulièrement mauvaises et inaccessibles à bien d'autres essences, exclure le *Pin noir*, qui fait merveille dans son rôle de protection, paraît difficile ; toutefois, sa régénération dans ces cas extrêmes serait très coûteuse parce qu'elle est quasi inexistante, il est donc peut-être préférable d'introduire une strate arbustive (Buis, Alisier blanc, Cystise, Genevrier), qui assurera un couvert du sol plus efficace.

Dans d'autres situations écologiquement plus favorables, on peut laisser faire la régénération naturelle après éclaircies et passer soit à une deuxième génération de *Pin noir*, soit le remplacer par de nouvelles essences de substitution (le Cèdre de l'Atlas, les sapins méditerranéens, le Mélèze d'Europe, les Erables sycomore ou plane, le Merisier, le Tilleul, etc.), adaptées au milieu que le *Pin noir* a préparé durant une génération. A ce niveau il faut rappeler que le *Pin noir* a une fructification tous les deux ans, puisque entre la floraison et la pollinisation (année N) et la dissémination des graines (année N+2) il s'écoule deux ans. Cette fructification est assez régulière et abondante, dès l'âge de 30 ans et jusqu'à 120 ans, mais la réussite des germinations dépend des conditions climatiques et plus tard de la pratique sylvicole. En effet, l'apparition et le développement initial des semis sont favorisés par une situation fraîche, sous l'influence d'un indice de luminosité modéré, d'une topographie favorable (bas de versant, mi-versant concave, etc.) et de pentes pas trop fortes (observations menées dans le Diois). Concernant la sylviculture, étant donné que cette essence pour se développer nécessite de la pleine lumière à partir de 3 ou 4 ans, il faut prévoir un enlèvement des semenciers au-delà de 5 ans (COUHERT B., DEMARCQ Ph., LECLERC D. et CHAUVIN Ch., 1990).

Enfin, le *Pin noir* d'Autriche peut jouer encore aujourd'hui un nouveau rôle R.T.M., pour l'ensemble des terrains autrefois cultivés, qui sont très dégradés, sans potentialités, offrant un sol stérile, et qui constituent dans ces régions du sud-est de la France un milieu favorable au départ des incendies.

2) ESSENCE APPROPRIÉE POUR NOTRE ÉTUDE

Il s'agit dans ce paragraphe de rappeler les quatre points essentiels, qui ont guidé notre choix vers le *Pin noir* d'Autriche, afin d'aborder correctement cette étude des relations entre le milieu et la production.

- * **Essence introduite de façon massive et sur une période courte** : Dans le sud-est de la France, à la fin du siècle dernier, les forestiers disposaient d'immenses surfaces en friche, dont certaines posaient de gros problèmes d'érosion. Le *Pin noir* d'Autriche a été choisi en vue des reboisements et il a été introduit de façon massive à partir de 1860 jusqu'en 1940, avec un maximum de plantations autour de 1900. L'introduction massive de cette essence a pour conséquence un étalement des peuplements dans une amplitude de situations écologiques très variées, correspondant à une gamme de productivité tout aussi étendue. De plus, ces peuplements ont aujourd'hui entre 80 et 120 ans, soit un âge suffisamment avancé pour que l'on puisse retracer correctement leur croissance, afin de définir un indice de fertilité valable. Nous avons choisi comme indice la hauteur à 80 ans, car cet âge correspond à l'âge d'exploitabilité, ce qui peut être une indication intéressante pour le gestionnaire.

Présentation générale

Il est préférable de vérifier les deux conditions suivantes avant d'entamer une étude des relations milieu-production, dans la mesure où l'on souhaite aborder uniquement la liaison entre le milieu et la production.

- * **Aspects génétiques** : Les arrivages de graines de *Pin noir* d'Autriche ont été peu nombreux ; ils provenaient des Alpes de Styrie et de Carinthie (MATHIEU A., 1865) ; les graines ont ensuite été installées dans de nombreuses pépinières locales, à cause des difficultés de transports. Par suite, le nombre des provenances étant réduit, on peut conclure sans trop de risques d'erreurs, que les aspects génétiques sont fixés ; ils n'ont donc pratiquement pas de poids sur l'explication de la production.
- * **Aspects sylvicoles** : Les Alpes du sud-est constituent un espace généralement accidenté et difficile d'accès. A l'époque des plantations la main d'oeuvre coûtant presque rien, il n'y avait pas de restrictions à entreprendre des travaux aussi amples. Depuis, les choses ont évolué et il est difficile et coûteux de prévoir de grands travaux sylvicoles d'éclaircie, d'élagage, de suppression de deux tiges sur trois (bien souvent les plantules étaient plantées par trois et les trois ont repris), dans la mesure où la rentabilité économique ne suit pas. Certains départements des Alpes externes méridionales ont entamé l'aménagement de ces peuplements depuis 1965-1970 (tournée "PIN NOIR" du 16 au 19 octobre 1989) ; ces aménagements sont en cours de réalisation.
Une sylviculture réduite ajoutée à une unique provenance génétique, fait que cette essence dans cette région constitue un matériel privilégié pour aborder les relations entre le milieu et la production, étant donné que la production dépend presque uniquement du milieu.
- * **Données pré-existantes** : Les Alpes externes méridionales étant un vaste espace, notre travail à cette échelle a été simplifié par l'existence de données, récoltées par l'I.F.N.* et l'I.N.R.A.**. Par ailleurs, l'I.N.R.A. s'était déjà penché sur ce problème des liaisons entre le milieu et la production (TIMBAL J. *et al.*, 1985).

Le *Pin noir* d'Autriche pour nos objectifs représente un matériel de choix. Il s'agit donc pour nous d'essayer de formaliser une méthode, afin d'établir les relations entre les facteurs du milieu et la fertilité signifiée par un indice, ceci en fonction de l'échelle de perception.

II) PRESENTATION DU MILIEU PHYSIQUE DES ALPES EXTERNES MERIDIONALES

Les Alpes externes méridionales représentent un espace accidenté et fortement érodé, qui au siècle dernier a nécessité des reboisements afin de retenir les sols. Cet espace, à la suite des plantations est devenu l'aire de répartition du *Pin noir* d'Autriche entre 600 et 1200 m dans le sud-est de la France. Il présente certaines caractéristiques physiques que nous nous proposons d'étudier à présent, afin de dégager les **influences climatiques** et les **modalités lithologiques**. Cette approche du milieu physique des Alpes externes méridionales, nous donnera pour la suite de notre travail les moyens d'entamer une stratification.

1) CLIMAT

Le climat des Alpes externes méridionales est caractérisé principalement par une remontée depuis le sud des **influences méditerranéennes** ; ainsi le paysage de cette région

*I.F.N. : Inventaire Forestier National

**I.N.R.A. : Institut National de la Recherche Agronomique

Présentation générale

est déterminé par une xéricité et une luminosité marquées, auxquelles se combine le paramètre altitudinal, qui joue un rôle important.

Comme toute étude climatique en zone de montagne, l'étude du climat des Alpes externes méridionales est compliquée pour de nombreuses raisons. Il faut s'interroger immédiatement sur la représentativité des postes météorologiques pratiquement toujours situés en fond de vallée, pour cause d'accès. De plus, les séries de données thermiques ou pluviométriques sont très souvent interrompues à la suite d'une suppression du poste météorologique, ou d'un déplacement, ou bien encore quelques données manquent sans trop d'explication. Par suite, il est assez difficile de trouver des séries complètes sur une longue durée ; bien que cela soit indispensable, si l'on veut réduire l'importance dans les résultats des valeurs exceptionnelles.

Les données utilisées, pour cette étude climatique, ont été fournies par la Météorologie Nationale ; elles provenaient de postes situés dans, ou en limite de la région d'étude. C'est ainsi que :

- * Pour les *précipitations*, l'étude a été effectuée sur des mesures mensuelles enregistrées pendant 30 ans (1951-1980). Au total 56 postes pluviométriques ont été retenus.
- * Pour les *températures*, la moyenne des températures minimales, maximales et moyennes a été retenue sur cette même période de 30 ans (1951-1980). Cette étude thermique est compliquée par l'insuffisance du nombre de postes disponibles ; par suite elle a été complétée par la lecture du fond thermique des cartes climatiques détaillées de la France au 1/250 000^e. Au total 23 postes thermiques sont disponibles.

1.1) Précipitations

Les précipitations dans cette étude ont été définies grâce à la lame d'eau annuelle, prise sur les 56 postes météorologiques retenus. Dans les Alpes externes méridionales, elle s'échelonne entre les valeurs 700 mm/an et 1 100 mm/an (voir tableau récapitulatif).

La répartition saisonnière des pluies, dans les Alpes externes méridionales, présente des variations assez importantes du fait de l'étendue de la région. Dans tous les postes météorologiques étudiés, au cours de l'année, les précipitations montrent un **maximum plus ou moins marqué au mois d'octobre, qui s'accroît en allant vers l'est.**

Le régime pluviométrique adopte en fait deux types de configuration :

- * "APHE" : dans ce cas les postes météorologiques concernés présentent un maximum secondaire des précipitations au printemps (mai ou juin).
- * "AHPE" : les trois mois d'hiver sont pluvieux sans maximum particulier.

Enfin, l'été reste la saison la plus sèche ; "juillet" est un minimum pour les précipitations.

D'après la représentation graphique des postes pluviométriques, il semble que l'orientation des vallées, la plus ou moins grande brutalité des pentes, jouent dans l'accroissement de la pluviosité un rôle plus éminent que l'altitude elle-même.

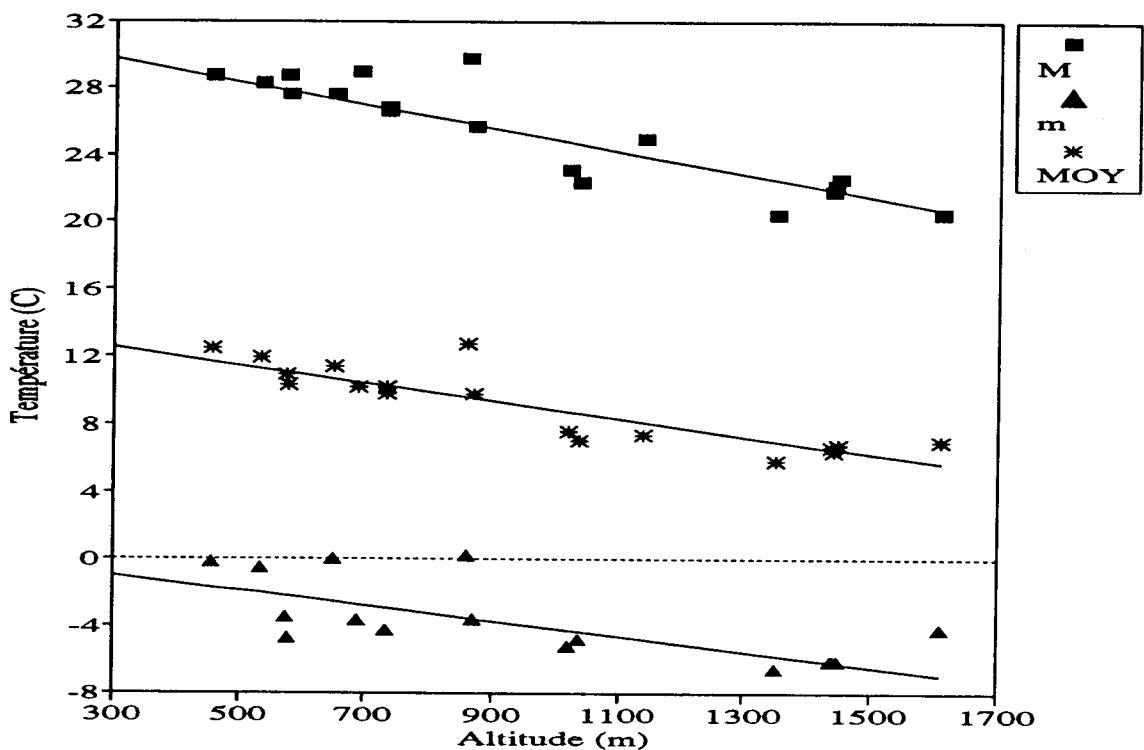
1.2) Températures

Dans les Alpes externes méridionales, 23 postes météorologiques seulement disposent de données thermiques, ce qui est difficilement utilisable dans le cadre d'une région aussi vaste. Pour chaque poste, trois valeurs sont disponibles, la température moyenne annuelle (MOY), les valeurs de la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m) et la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (M) (voir tableau récapitulatif).

S'agissant d'un territoire accidenté, il est normal que la température dépende avant tout de l'altitude et de l'exposition (OZENDA P., 1981). La représentation graphique des températures "MOY", "M", et "m" par rapport à l'altitude montre que la diminution de la température avec l'altitude est constante, dans le cas de "MOY", "M". Ainsi, le seul paramètre altitudinal explique presque totalement la température ; les changements thermiques sont donc sous la dépendance du relief et des courbes de niveau, dans les Alpes externes méridionales.

Les équations "Températures (°C) = a + b * Altitude (m)" ont été calculées à partir de 19 postes météorologiques sur les 23 postes thermiques disposant d'une altitude connue. Le graphique suivant représente la corrélation température-altitude pour :

- * les températures moyennes annuelles (MOY),
- * la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (M),
- * la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m).



LEGENDE : Equation Températures (°C) = a + b * Altitude (m)

"a" : ordonnée à l'origine

"σa" : écart-type sur l'ordonnée à l'origine

"b" : pente de la droite

"σb" : écart-type de la pente

"ρ" : coefficient de corrélation entre la température et l'altitude

Présentation générale

Températures	a	σ_a	b	σ_b	ρ
moyenne "MOY"	14,05	1,09	-5,19 E-3	6,5 E-4	0,888
maximum "M"	31,79	1,54	-6,91 E-3	9,2 E-4	0,876
minimum "m"	0,40	1,90	-4,58 E-3	1,13 E-3	0,699

La corrélation température moyenne annuelle et altitude est nette et significative (coeff. de corrélation = 0,89) ; il en est de même entre valeur de "M" et l'altitude (coeff. de corrélation = 0,87). Par contre, la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m) dispose d'une corrélation avec l'altitude moins nette (coeff. de corrélation = 0,70) ; Barcelonnette, dont l'altitude est de 1 140 m, a une valeur "m" = -8,6 °C plus froide que ce que laisse supposer son altitude ; et inversement Saint-Christol-de-Bourg a une valeur "m" = 0,2 °C, très élevée par rapport à son altitude (859 m).

Les cartes climatiques au 1/250 000^e proposent un fond thermique subdivisé en différentes classes de température moyenne annuelle "MOY", qui prend en compte le relief. Les auteurs de ces cartes climatiques mettent ensuite en relation ce découpage thermique avec les étages de végétation. Ils précisent cependant que la température moyenne annuelle n'est pas l'unique terme explicatif des étages de végétation et que ce découpage schématique doit être nuancé avant tout par l'exposition et la latitude.

Les Alpes externes méridionales, réparties de 300 à 1 300 m d'altitude, d'après cette classification comportent un étage méso-méditerranéen, un étage supra-méditerranéen, un étage montagnard et un étage sub-alpin (très localisé). Le paragraphe "1.4)" présentera les étages de végétation des Alpes externes méridionales.

Les températures et les précipitations interviennent dans le calcul d'indices climatiques, qui permettent de définir les grands types climatiques et leurs influences.

Températures et Précipitations des postes météorologiques se situant dans les Alpes externes méridionales

Dept.	Postes	Altitude	Précipitations					Températures		
			DJF	MAM	JJA	SON	Total	M°C	m°C	MOY°C
04	Allos	1450	275	267	241	346	1129	22,5	-6,1	6,8
	Banon	765	265	243	169	297	974			
	Barcelonnette	1140	188	165	174	236	763	25	-8,6	7,4
	Beaujeu	1050	207	231	226	287	951			
	Castellane	735	239	228	187	295	949	26,6	-4,3	9,8
	Le Castellard Melan	1199	254	270	220	335	1079			
	Château-Arnoux	459	176	194	168	237	775	28,7	-0,2	12,4
	Condamine Châtelard	1325	141	162	175	218	696			
	Digne	595	182	204	172	246	804			
	Forcalquier	535	214	207	153	264	838	28,3	-0,5	11,9
	Lambruisse	112	243	251	208	287	989			
	Lauzet d'Ubaye	930	180	204	233	282	899			
	Marcoux	700	175	199	200	246	820			
	Mison	560	207	185	153	238	783			
	La Motte du Caire	690	170	199	171	234	774	28,9	-3,7	10,2
	St André les Alpes	890	217	218	201	269	905			
	St Michel l'Observatoire	650	230	223	149	267	869	27,6	0	11,4
Seyne les Alpes	1210	188	215	237	267	907				
Uvernet Fours	1660	180	230	232	332	974				

Présentation générale

Dept.	Postes	Altitude	Précipitations					Températures		
			DJF	MAM	JJA	SON	Total	M°C	m°C	MOY°C
05	Agnières en Dévoluy	1245	317	274	230	349	1170			
	Ancelle	1360	246	249	218	290	1003			
	Barcillonnette	850	274	255	201	317	1047			
	Embrun	871	181	155	176	205	717	25,7	-3,6	9,8
	Gap	735	168	214	191	271	904	26,8	-4,3	10,2
	Laragne-Monteglin	575	214	197	164	262	838	28,7	-3,5	10,9
	Motte en Champsaur	1094	298	260	196	308	1062			
	Orcières	1440	303	280	261	385	1229	21,8	-6,1	6,7
	Les Orres	1445	194	202	220	248	864	22,1	-6,1	6,4
	Réallon	1410	274	243	248	319	1084			
	Rosans	665	216	185	187	241	829			
	Rousset	684	168	177	174	217	736			
	St Bonnet	1020	300	260	206	347	1113	23,1	-5,2	7,6
	St Etienne en Dévoluy	1350	294	281	231	392	1198	20,4	-6,6	5,8
	St Julien en Bochaine	922	208	271	202	304	1084			
	La Saulce	580	184	181	158	238	761	27,6	-4,7	10,3
	Serres	672	214	206	177	261	858			
Veynes	815	229	216	191	262	898				
06	Entraunes	1250	307	313	209	336	1165			
	Guillaumes	785	273	259	203	296	1031			
	Isola	870	213	251	207	340	1011			
	Puget-Theniers	420	286	247	187	307	1027			
	St Etienne de Tinée	1610	259	282	225	350	1116	20,5	-4,2	7,0
26	Beaufort sur Gervanne		177	206	178	263	824			
	Bellegarde en Diois		212	228	201	269	910			
	Buis les Baronnie		174	196	171	264	805	28,6	-1,1	11,7
	Chatillon en Diois		186	227	216	240	869	26,7	-2,9	9,9
	Crest		183	226	194	278	881			
	Die		203	235	197	258	893			
	Dieulefit		205	236	203	307	951	27,8	-0,4	12,1
	Luc en Diois		207	219	183	249	858			
	Lus la Croix Haute	1037	269	271	218	309	1067	22,3	-4,8	7,1
	Montauban sur Ouveze		227	220	178	272	897			
Nyons		176	207	167	266	816	29,0	-0,3	12,6	
84	Malaucène	330	167	198	145	251	761			
	St Christol Bourg	859	291	246	179	300	1016	29,7	0,2	12,7
	Valreas	240	167	186	157	259	769	27,5	0,1	12,1

LEGENDE :

Précipitations

"DJF" : Décembre, Janvier, Février ;

"JJA" : Juin, Juillet, Août ;

"MAM" : Mars, Avril, Mai ;

"SON" : Septembre, Octobre, Novembre ;

"Total" : précipitations totales

Températures

"M" : la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud,

"m" : la moyenne des températures minimales du mois le plus froid,

"MOY" : températures moyennes annuelles.

1.3) Indices climatiques

Les Alpes externes méridionales sont soumises à deux types d'influences climatiques en opposition, qui sont tour à tour favorisées dans la zone de contact, et qui dépendent de l'orientation des vallées, des versants et du climat annuel. Afin d'appréhender les limites entre influences méditerranéennes et influences continentales, quatre indices climatiques ont été retenus :

- * "n" : nombre de mois secs calculé à partir du diagramme ombrothermique.
- * "S" : indice de sécheresse estivale.
- * "Q₂" : quotient pluviothermique.
- * "GAMS" : indice de continentalité.

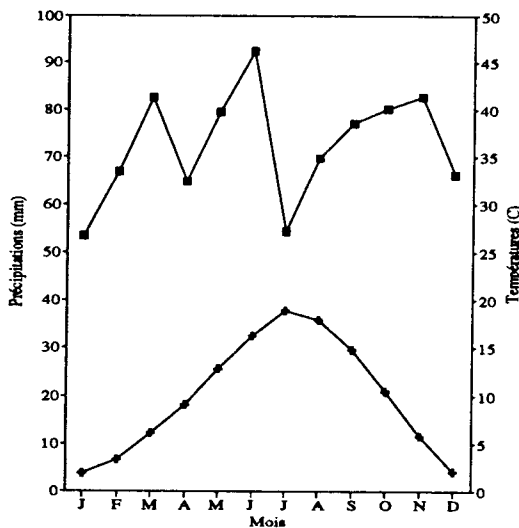
1.3.1) "n" : nombre de mois secs

Le seul examen visuel des diagrammes ombrothermiques (GAUSSEN H., 1938) permet de vérifier si l'inégalité $P \leq 2T$ est réalisée et d'en déduire le nombre de mois secs "n". Les diagrammes ombrothermiques sont constitués par la courbe des températures moyennes mensuelles et par celle des précipitations moyennes mensuelles ; l'échelle des précipitations (en mm) est deux fois plus petite que celle des températures (°C). L'intersection qui apparaît lorsque la courbe des précipitations passe au-dessous de celle des températures, correspond aux mois secs : "n".

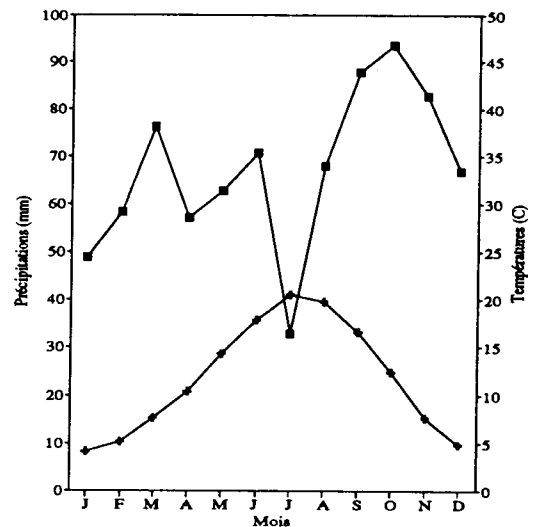
Diagrammes Ombrothermiques

- : Précipitations (mm)
- * : Températures (°C)

Chatillon-en-Diois (26)

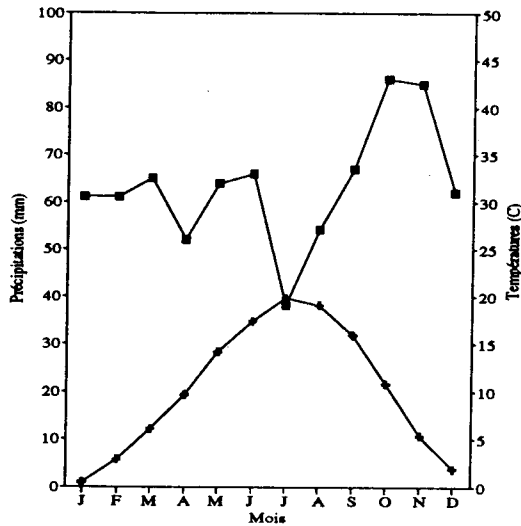


Buis-les-Baronnies (26)

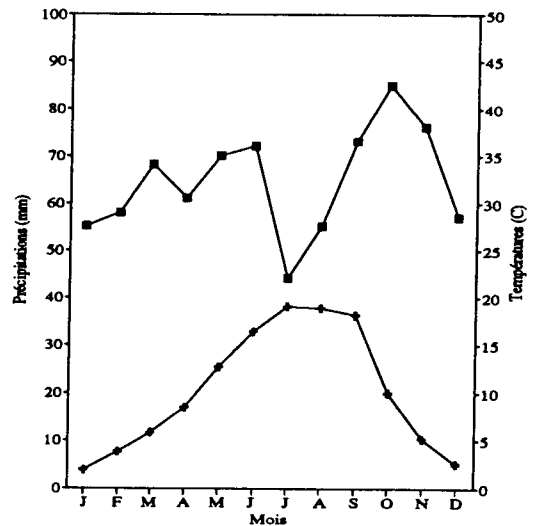


Présentation générale

La Saulce (05)



La Motte-du-Caire (04)



Sur les 23 postes météorologiques disposant à la fois des températures et des précipitations, il en est 10, qui présentent un **mois de sécheresse estivale**, en l'occurrence "**juillet**" (caractéristique du climat méditerranéen). Leur diagramme ombrothermique s'approche de celui de "Buis-les-Baronnies" proposé ci-dessus. Cette méditerranéité se retrouve dans la Drôme, le Vaucluse et les Alpes de Haute-Provence, soit la bordure sud-ouest de la région étudiée.

En limite de ce climat méditerranéen, on enregistre des remontées des influences méditerranéennes, qui s'infiltrent par les vallées, et notamment celle de la Durance. Ces postes offrent un diagramme ombrothermique limite du type de celui de "La Saulce" ; dans ce cas particulier, on observe également les postes de "Château-Arnoux", "Sisteron", "Laragne-Monteglin".

Enfin les postes de "Chatillon-en-Diois" et "La Motte-du-Caire" ne sont pas soumis à un climat méditerranéen classique, puisqu'ils ne disposent pas d'un mois sec. Il s'agit des 13 postes météorologiques restants, parmi les 23 que nous avons sélectionnés.

1.3.2) "S" : indice de sécheresse estivale

Cet **indice de sécheresse estivale "S"** a été défini par (EMBERGER L., 1932) comme étant le rapport :

$$S = Pe / M$$

- * **Pe** : précipitations des trois mois d'été (juin, juillet, août),
- * **M** : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud.

EMBERGER a proposé de limiter la région méditerranéenne française, aux zones où l'indice "S" est inférieur à 7 ; DAGET Ph., 1971 a préconisé ultérieurement une limite à 5, ce qui conduit à la distinction suivante :

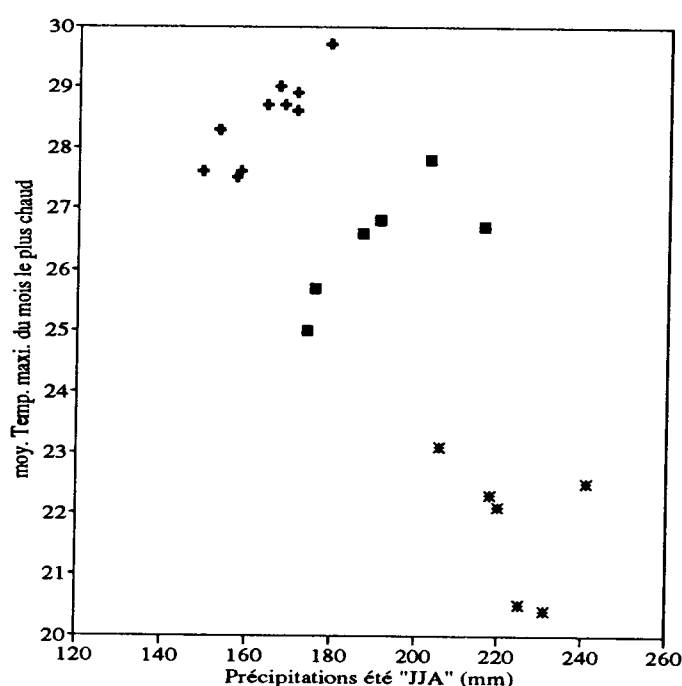
- * $S < 5$ région méditerranéenne au sens strict,
- * $5 < S < 7$ région méditerranéenne au sens large,
- * $S > 7$ région péri-méditerranéenne.

Présentation générale

Cet indice de sécheresse estivale "S" confirme le résultat de la valeur "n" (nombre de mois secs) et des diagrammes ombrothermiques ; la zone située au sud-ouest des Alpes externes méridionales ainsi que la remontée le long de la Durance, appartiennent à un climat méditerranéen au sens large : $5 < S < 7$. Au-delà de cette zone le climat devient péri-méditerranéen.

Il faut noter pour des altitudes élevées, supérieures à 800 m, l'existence d'un phénomène de sécheresse qui n'est plus de type méditerranéen mais intra-alpin ; c'est le cas de Barcelonnette qui sans présenter un mois de sécheresse en été, offre un indice de sécheresse estivale assez faible $S = 7$.

La représentation graphique suivante, proposant "M" en fonction de "Pe" répartit les 23 postes météorologiques disponibles en trois groupes, nettement distingués, depuis un climat méditerranéen au sens large ($5 < S < 7$), jusqu'à un climat non méditerranéen de type continental, en passant par une région péri-méditerranéenne.



Indice de sécheresse estivale

- + région méditerranéenne au sens large : $5 < S < 7$,
- région péri-méditerranéenne (infiltration des influences méditerranéennes),
- * région continentale.

1.3.3) "Q₂" : quotient pluviothermique

EMBERGER a défini dans la région méditerranéenne le concept d'étages bioclimatiques en s'appuyant sur le calcul du "quotient pluviothermique" (EMBERGER L., 1932 et EMBERGER L., 1952).

$$Q_2 = \frac{2\ 000 \times P}{M^2 - m^2} \quad \text{en } ^\circ\text{K} \quad (0^\circ\text{C} = 273,2^\circ\text{K})$$

- * P : précipitations annuelles,
- * M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud,
- * m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid.

Ainsi les Alpes externes méridionales sont classées dans les étages bioclimatiques : humide $100 < Q_2 < 170$ et sub-humide $70 < Q_2 < 100$. Dans chaque étage bioclimatique, d'après EMBERGER on peut distinguer des variantes, qui sont dans les Alpes

Présentation générale

externes méridionales soient froides : $-7^{\circ}\text{C} < m < -3^{\circ}\text{C}$, soient assez froides : $-3^{\circ}\text{C} < m < 0^{\circ}\text{C}$; exceptionnellement assez fraîches : $0^{\circ}\text{C} < m < 3^{\circ}\text{C}$ et très froide : $-10^{\circ}\text{C} < m < -7^{\circ}\text{C}$ (Barcelonnette "m" = $-8,6^{\circ}\text{C}$).

1.3.4) "GAMS" : indice de continentalité

Un article de synthèse de MICHALET R., 1991, nous a permis de rédiger ce paragraphe.

La continentalité d'un climat est décelable d'après la seule considération de l'amplitude thermique (M-m°C). Ainsi, Barcelonnette (1 140 m d'altitude) présente une forte amplitude thermique : M-m = $33,6^{\circ}\text{C}$, ce qui confirme l'idée d'une sécheresse intra-alpine et non méditerranéenne.

GAMS H., 1932 a défini un coefficient d'océanité hydrique qui est exprimé par l'angle dont la tangente a pour valeur P/A, et inversement un angle de continentalité hydrique dont la cotangente a pour valeur ce même rapport (OZENDA, P. 1981).

$$\cotg \alpha = \frac{P}{A}$$

- * P : pluviosité totale annuelle (mm),
- * A : altitude (m).

avec :

- ♦ $\alpha < 10^{\circ}$ région très humide et de basse altitude,
- ♦ $\alpha > 70^{\circ}$ vallées intra-alpines les plus sèches,
- ♦ $40^{\circ} < \alpha < 50^{\circ}$ zone intermédiaire, Alpes intermédiaires.

Les influences continentales se manifestent lorsque les précipitations diminuent alors que l'altitude augmente ; et lorsque l'altitude augmente et que les précipitations restent constantes.

Cependant, l'utilisation de cet indice demande quelques précautions : si les précipitations et l'altitude tendent vers une valeur faible, le rapport P/A perd son sens et des stations méditerranéennes de basse altitude peuvent, en dépit d'une pluviosité faible, apparaître comme des pôles d'humidité. L'indice de "GAMS" ne s'applique qu'à des stations à altitude supérieure à 800 m, c'est-à-dire les séries de l'étage montagnard.

C'est pourquoi MICHALET R., 1991 a proposé une formule modifiée :

$$\cotg \alpha = \frac{P}{A} \left(1 - \frac{900 - A}{1000} \right)$$

De plus et surtout, cet auteur a fait la distinction essentielle entre les indices saisonniers :

- * G_H (décembre à février) : indice de continentalité, qui augmente en effet quand l'hiver devient plus sec et plus froid ;
- * G_E (juin à août) : indice d'aridité estivale.

D'après la nomenclature des zones ainsi définies par les deux indices " G_H " et " G_E ", on observe que finalement, l'ensemble de la zone d'étude est peu différenciée. La majorité appartient aux domaines dits "subocéanique" ($G_H = 35$ à 45) et "subméditerranéen" ($G_E = 45$ à 55). Néanmoins, la continentalité augmente d'ouest en est dans cette zone d'étude,

Présentation générale

passant d'une continentalité faible dans les secteurs du Ventoux, du Diois à une continentalité plus nettement dans le Gapençais et les Préalpes de Digne. Au total, sauf effet d'abri marqué dans certaines vallées (Embrun, Barcelonnette), le climat régional et le mésoclimat varient peu dans l'ensemble, alors qu'au contraire les effets d'exposition et le microclimat peuvent être déterminants.

Tableau récapitulatif des indices climatiques calculés pour les postes pluviométriques et thermiques

Dept.	Postes	Altitude	n	S	M-m	Q2	GAMS
04	Allos	1450	0	10,7	28,6	140,3	52,1
	Barcelonnette	1140	0	7	33,6	80,7	56,2
	Castellane	735	0	7	30,9	108	37,8
	Château-Arnoux	459	1	5,9	28,9	93,3	30,6
	Forcalquier	535	1	5,4	28,8	101,4	32,5
	La Motte du Caire	690	0	5,9	32,6	83,1	41,7
	St Michel l'Observatoire	650	1	5,4	27,6	109,7	36,8
05	Embrun	871	0	6,8	29,3	86,1	50,5
	Gap	735	0	7,1	31,1	102,2	39,1
	Laragne-Monteglin	575	1	5,7	32,2	91,1	34,5
	Orcières	1440	0	11,9	27,9	156,7	49,5
	Les Orres	1445	0	9	28,2	108,9	59,5
	St Bonnet	1020	0	8,9	28,3	139,6	42,5
	St Etienne en Dévoluy	1350	0	11,3	27	158,4	48,4
	La Saulce	580	1	5,7	32,3	82,9	37,3
06	St Etienne de Tinée	1610	0	11	24,7	160,6	55,3
26	Buis les Baronnie		1	6	29,7	94,4	
	Chatillon en Diois		0	8	29,6	103	
	Dieulefit		1	7,3	28,2	117,5	
	Lus la Croix Haute	1037	0	9,8	27,1	139,6	44,2
	Nyons		1	5,7	29,3	96,7	
84	St Christol Bourg	859	1	6	29,5	119,5	40,2
	Valreas	240	1	5,7	27,4	97,8	17,3

1.4) Etages de végétation

(DAGET Ph., 1977, EMBERGER L., 1930, GODRON M., 1988 et OZENDA P., 1981)

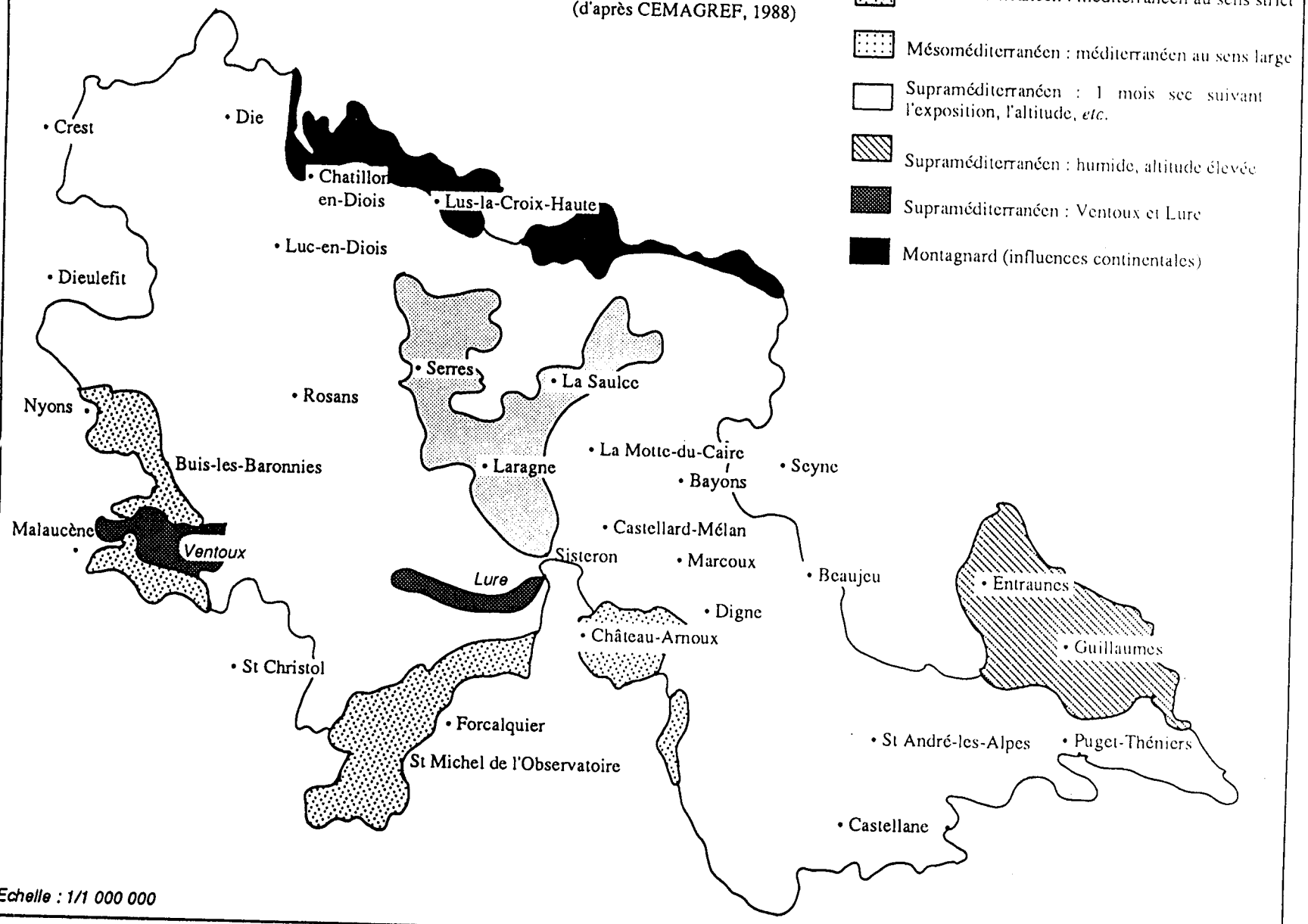
OZENDA P. est à l'origine de cette stratification essentiellement thermique d'entités phytogéographiques dans les Alpes. Il a proposé une nomenclature originale parce qu'elle est méditerranéenne. EMBERGER L. a donné à cette notion une autre dimension, celle "d'unité synthétique qui inclut à la fois la superposition altitudinale et la succession latitudinale, l'une compensant l'autre sur un territoire relativement restreint" (DAGET Ph., 1977).

Etage méso-méditerranéen (ou méditerranéen)

Le climat méditerranéen strict borde les Alpes externes méridionales sur leurs limites ouest et sud et les pénètre plus ou moins à la faveur des grandes vallées. Ces remontées amènent l'olivier jusqu'à Sisteron, mais aussi dans la vallée de la Durance, près de

Alpes Externes Méridionales : Découpage interrégional en secteurs écologiques

(d'après CEMAGREF, 1988)



Echelle : 1/1 000 000

Présentation générale

Digne, dans la vallée de la Bléone, à Châteaufort et dans la vallée de l'Asse. Dans cette zone pré-alpine cet étage est essentiellement l'étage du *Chêne vert*.

Etage supra-méditerranéen (ou collinéen)

L'étage supra-méditerranéen est fortement teinté de remontées méditerranéennes et il constitue une auréole au-dessus de l'étage méso-méditerranéen ; cet étage représente essentiellement le domaine du *Chêne pubescent* : série supra-méditerranéenne occidentale du *Chêne pubescent*. Dans cette série le *Pin sylvestre* joue un rôle important de forêt de substitution et il est associé au *Pin noir* d'Autriche, qui constitue l'essentiel des reboisements.

Etage montagnard

Les deux étages, supra-méditerranéen et montagnard, s'imbriquent profondément et déterminent une grande diversité de paysages. Dans l'étage montagnard alternent, suivant les expositions, les séries mésophiles du Hêtre et du Pin sylvestre.

Etage subalpin

L'altitude insuffisamment élevée ne permet l'apparition de l'étage subalpin que très localement. Quelques îlots de subalpin sont à signaler sur les crêtes du Ventoux et le sommet de la Montagne de Lure.

EN CONCLUSION

Le climat est un paramètre du milieu, qui opère à une échelle très petite, en tout cas plus petite que les Alpes externes méridionales. Par suite, les unités de synthèse que sont les étages de végétation stratifient les Alpes externes méridionales en quatre entités plus ou moins étendues. Or **les peuplements de *Pin noir* d'Autriche prospèrent principalement à l'étage supra-méditerranéen**, même si on trouve quelques peuplements dans l'étage méso-méditerranéen. Par suite, dans cette étude concernant le *Pin noir* d'Autriche, le climat à l'échelle des Alpes externes méridionales n'a pas donné lieu à un découpage spatial ; il offre simplement une limite à l'intérieur des Alpes externes méridionales.

En abordant dans le chapitre suivant les faciès lithologiques, nous effectuons un changement d'échelle de perception dans les Alpes externes méridionales. Cette étude des roches et des formations superficielles nous permettra de prévoir un découpage de ce vaste espace géographique.

2) FACIES LITHOLOGIQUES (ROCHES ET FORMATIONS SUPERFICIELLES)

La zone d'étude du *Pin noir* d'Autriche s'étend sur la marge ouest des Alpes du sud, entre le Vercors et le Ventoux c'est-à-dire Nyonsais, Baronnies, Diois, Dévoluy ; elle se prolonge ensuite en se compliquant dans la région de Digne et de Castellane ; et englobe enfin au sud-ouest l'axe Ventoux-Lure.

Le matériel est constitué de sédiments presque exclusivement marins déposés pendant toute l'ère Secondaire et parfois le début du Tertiaire sur une plate-forme peu accidentée, résultant de l'érosion presque complète de terrains anciens. Aujourd'hui, ces roches sédimentaires affleurent et elles présentent des niveaux de nature différente, donc de propriétés différentes.

Nous nous proposons ci-après d'effectuer un inventaire, correspondant à nos besoins ultérieurs, des différents faciès lithologiques, qui conditionneront le type et le

Présentation générale

développement de la végétation. Ce chapitre a été rédigé en s'appuyant sur des documents existants, parmi lesquels on peut citer : AUBOUIN J., BROUSSE R. et LEHMAN J.-P., 1978 ; B.R.G.M., 1984 ; DÉBELMAS J., 1974 ; GOUVERNET G., GUIEU G. et ROUSSET C., 1971 et JORDA M., 1980.

2.1) Calcaires

Barre Tithonique (Jurassique supérieur, Malm)

Le dernier étage du Jurassique supérieur (Malm) c'est-à-dire le Portlandien est représenté par des calcaires massifs à faciès tithonique formant la corniche inférieure du bord subalpin.

La puissance du Portlandien s'accroît du nord au sud, ainsi dans les Hautes-Alpes ce faciès atteint de 50 à 100 m d'épaisseur ; alors que la Montagne de Lure, située plus au sud, présente un falaise tithonique de 150 m, en versant nord.

Cette formation calcaire comporte des Ammonites, des Brachiopodes et des Calpionelles ; il s'agit de calcaires fins pélagiques.

Barre Urgonienne (Crétacé inférieur, Barrémien au Bédoulien)

Au Crétacé inférieur, (du Barrémien au Bédoulien) sur les bordures nord et sud de la fosse Vocontienne, c'est-à-dire entre le Vercors et l'axe Ventoux-Lure, se développe un faciès urgonien.

Cette formation est constituée de calcaires massifs à Rudistes d'une puissance d'environ 200 m. Ce niveau urgonien forme la deuxième corniche du bord subalpin au-dessus de la corniche tithonique.

Calcaires (Crétacé supérieur)

Le Crétacé supérieur présente une tendance générale à l'émersion ; ainsi les faciès Vocontiens sont moins nets et la sédimentation est cantonnée à quelques synclinaux.

Le *Cénomani* est d'une identification difficile, il se compose de marnes, de calcaires argileux et de grès.

Le *Turonien* présente un faciès de calcaires gris de plus en plus gréseux vers l'ouest et le sud, pouvant former une corniche dans le paysage (exemple synclinal de Saou, de Dieulefit, de La Charce).

Le *Sénonien*, à faciès calcaires crayeux et grès grossiers se retrouve au centre des synclinaux de Chauvac, Dieulefit, Saou, ainsi que sur la bordure du bassin de Nyons. Cet étage s'achève par un faciès de calcaires en dalles rappelant les lauzes de la chaîne subalpine septentrionale.

2.2) Marno-calcaires

Marno-calcaires (Lias)

Ces formations du Lias constituent une puissante série continue de faciès marno-calcaire pélagique à Ammonites.

Présentation générale

Ce faciès n'apparaît pratiquement nulle part dans les chaînes du Diois, Nyonsais, Baronnies ; malgré son épaisseur importante, ce faciès y est rarement affleurant. Par contre, il est assez largement représenté autour de la nappe de Digne.

Ce faciès, dans le domaine dauphinois, se compose de sédiments épais à tendance marneuse (marnes noires légèrement micacées).

Calcaires marneux (Bajocien, Dogger inférieur - Jurassique moyen)

Il s'agit de calcaires marneux à patine grise ou rousse alternant avec des marnes très noires. L'épaisseur de cette formation diminue vers le sud. Ce faciès forme une côte molle, donnant du relief dans le paysage.

alternance de calcaires et marnes (Malm moyen, Kimmeridgien - Jurassique supérieur)

Ce faciès pélagique du Kimmeridgien est constitué par l'alternance de calcaires gris, fins en bancs massifs et de lits marno-calcaires.

La proportion de calcaire devient plus importante vers le haut de l'étage, c'est-à-dire vers la zone de transition avec le Portlandien. Cette formation est intermédiaire entre le sommet des "Terres noires" et le Portlandien : "faciès tithonique".

série de type Vocontien (Crétacé inférieur)

Dans le Diois, les Baronnies, le Nyonsais se rencontrent les faciès Vocontiens surtout caractérisés au Crétacé inférieur par une puissante série de marno-calcaire blanc-jaunâtre à Ammonites, très monotone. Cette formation correspond à l'ensemble des étages allant du Valanginien au Bédoulien (Aptien inférieur) avec un maximum de calcaire au Barrémien, qui forme une crête molle dans le paysage (faciès de passage avec le faciès urgonien de l'axe Ventoux-Lure).

2.3) Marnes

Terres noires (Dogger, Jurassique moyen)

Le faciès "Terres noires" caractéristique des chaînes subalpines apparaît dans la zone dauphinoise, entre Ventoux et Vercors, où il constitue une puissante formation d'environ 2 000 m.

Il s'agit d'une subsidence rapide compensée par une importante sédimentation argileuse. Le Bathonien et le Callovien (Dogger supérieur) forment la base des "Terres noires" des Alpes, tandis que le sommet correspond à l'Oxfordien (Malm inférieur-Jurassique supérieur).

Le faciès "Terres noires" donne un paysage aux formes molles, ce sont des marnes noires tendres, très sensibles à l'érosion, elles se débitent en plaquettes emportées par le vent et l'eau.

Marnes de l'Argovien (Argovien)

Cette formation ne fait plus partie de l'ensemble des Terres noires, car la prédominance de la sédimentation argileuse y est moins marquée. Ce sont des marnes grises alternant avec des bancs calcaréo-marneux à patine brunâtre.

Ces formations marneuses se superposent aux Terres noires, en adoptant une forme plus nette grâce aux bancs calcaréo-marneux. Elles sont moins sensibles à l'érosion, mais offrent un milieu encore plus difficile au peuplement.

Molasses rouges (Oligocène, Tertiaire)

Les molasses rouges continentales caractérisent l'Oligocène dans la zone dauphinoise ; elles abondent dans les dépressions périalpines, par exemple dans le bassin de Digne. Par définition, les molasses proviennent de la destruction des chaînes nouvellement érigées. Dans les Alpes, elles se mettent en place après la phase d'émersion à la fin de l'Eocène.

Ces molasses se composent de conglomérats, de marnes rouges et de grès à éléments détritiques peu évolués pris dans un ciment calcaire. Cette formation peut atteindre 500 m d'épaisseur.

2.4) Autres formations

Gypse (Keuper, Trias supérieur)

Le gypse, sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), entre dans la composition des roches sédimentaires de type évaporite. Au Keuper (fin du Trias), la mer est en phase régressive et l'évaporation est intense, ce qui provoque le dépôt de gypse.

Ce faciès gypseux caractérise des milieux particulièrement pauvres, où la végétation est peu abondante et donc des terrains sensibles à l'érosion. Dans les Alpes externes, le niveau du Keuper repose sur le socle primaire et affleure rarement, il faut toutefois noter sa présence dans la déchirure de Suzette, à l'Auzière près de Propiac, en auréole autour de la nappe de Digne.

Cargneules (Muschelkalk, Trias moyen)

Calcaires présentant une érosion différentielle prenant l'aspect d'une roche "cariée" : cargneules vacuolaires ou dolomies cavernueuses.

Formation de Valensole (Mio-Pliocène, Tertiaire)

Puissant ensemble de conglomérats fluviaux passant à leur sommet à des marnes rouges ou ocres "Molasses jaunes". Il s'agit d'un complexe déritique d'âge Mio-Pliocène, accumulé dans un bassin subsident.

3) REGIONALISATION

Etudier le milieu physique des Alpes externes méridionales correspond dans notre thèse à deux objectifs, qui sont d'une part, d'améliorer nos connaissances sur les influences climatiques et les faciès lithologiques de cette région, pour d'autre part, pouvoir utiliser ces deux critères afin de réaliser une stratification de cet espace.

Les résultats du chapitre climat, nous ont montré que ce critère intervient à une échelle plus petite que celle des Alpes externes méridionales ; globalement le *Pin noir* d'Autriche, objet de notre étude, se répartit dans un unique étage de végétation : le supra-méditerranéen. Le climat n'a donc pas été pris en considération pour cette régionalisation.

Par contre, après avoir inventorié les différents faciès lithologiques dans l'espace des Alpes externes méridionales, il est possible de retenir cet outil afin de proposer une régionalisation. La région d'étude du *Pin noir* d'Autriche, incluse dans les Alpes externes méridionales peut être subdivisée en trois grands types de formations, d'après l'étude lithologique.

- * Au sud, l'axe Mont Ventoux - Montagne de Lure,
- * Au nord de cet axe, la fosse Vocontienne,
- * A l'est, l'auréole autour de la nappe de Digne.

(cartes géologiques au 1/250 000^e Valence et Gap)

Ce découpage se veut homogène suivant le climat, les peuplements de *Pin noir* d'Autriche sont principalement implantés à l'étage supra-méditerranéen ; et homogène suivant la géologie, la description des particularités de chaque entité est faite ci-dessous. **Homogénéité climatique et géologique**, nous appellerons désormais ces entités **régions climato-géologiques** ; elles sont au nombre de trois dans cet espace des Alpes externes méridionales.

3.1) axe Ventoux-Lure

D'orientation est-ouest, l'axe Ventoux-Lure s'étend depuis la moyenne Durance (Sisteron) jusqu'à la plaine rhodanienne, au nord de Carpentras. Le Mont Ventoux et la Montagne de Lure sont séparés par le fossé d'Aurel (Oligocène) composé de calcaires en plaquettes et de marnes blanches.

Ces deux massifs présentent un versant méridional assez calme et régulier, en pendage sud, qui se raccorde aux plateaux du Vaucluse. Le versant nord, par contre, rattrapant le Pays des Baronnies est davantage bousculé, plissé et faillé. Il est caractérisé par deux corniches de calcaires massifs :

- * un faciès tithonique (Portlandien, Jurassique supérieur) : surtout développé sur le versant nord de la Montagne de Lure où il atteint 150 m.
- * un faciès urgonien (Barrémien supérieur - Aptien inférieur, Crétacé inférieur) : calcaires massifs micrograveleux à Rudistes, 200 m.

Entre ces deux faciès récifaux s'intercalent des séries marno-calcaires caractéristiques d'un relief plus mou.

Ce versant nord accidenté était totalement déboisé au siècle dernier et il subissait une érosion intense. Reboisé totalement en *Pin noir* d'Autriche, pour le Ventoux et partiellement dans la Montagne de Lure, ce versant offre aujourd'hui un paysage neuf, qui nous a servi de terrain d'expérience.

3.2) La fosse Vocontienne

Les Baronnies, le Nyonsais, le Diois, le Dévoluy constituent au nord de l'axe Ventoux-Lure et au sud du Vercors, la fosse Vocontienne. Cet espace est caractérisé par une grande épaisseur des séries du Secondaire et par une lithologie assez monotone ou alternent calcaires et marnes en diverses proportions.

Le faciès de la fosse Vocontienne se met en place au Crétacé inférieur. Il s'agit d'un approfondissement transversal où se déposent des marno-calcaires à Ammonites. La morphologie est affectée, puisque les falaises urgoniennes, trait majeur du relief des chaînes subalpines septentrionales et méridionales, manquent.

La morphologie correspond à une succession de chaînons et de dépressions, on peut y voir dans la direction est-ouest de larges synclinaux souvent séparés par des anticlinaux plus ou moins aigus. Ce paysage est recoupé dans le sens méridien par des failles, des plis rompant la continuité, introduisant des chevauchements et des torsions.

Dans cette région, nous avons sélectionné quatre massifs forestiers, afin d'observer à partir des massifs forestiers tests situés dans le Diois (forêts domaniales de Solaure et de Glandasse) l'existence éventuelle de variations d'ordre climatique, lorsque l'on effectue une translation plus à l'est (Gapençais) ou plus au sud (Nyonsais).

3.3) Nappe de Digne et son auréole

La nappe de Digne, profondément encastrée dans les chaînes subalpines méridionales, présente une forte subsidence au cours du Miocène, commandée en partie par le jeu d'une faille profonde. La nappe de Digne est limitée, à l'ouest par cette faille à l'aplomb du cours de la Durance, à l'est par la couverture décollée et écaillée du massif de l'Argentera et du dôme du Barrot, et enfin au nord, par la série adhérente au socle du Pelvoux.

Au nord de la formation Mio-Pliocène de Valensole, apparaît un faciès de molasse rouge d'origine continentale formée par l'alternance de marnes rouges et de grès ; cette formation est caractéristique du Gapençais et provient de la destruction des chaînes nouvellement érigées. Entre ces faciès molassiques réapparaît la série de type Vocontien autochtone, qui semble plus vigoureuse. Aux "Terres noires" succèdent la corniche tithonique, constituant des clues (clue de Barles, clue de Verdaches), dominée par les calcaires du Crétacé.

En auréole autour de cet ensemble (Plateau de Valensole, Autochtone) émerge la série stratigraphique conforme depuis le Trias jusqu'au Jurassique. L'apparition des niveaux triasiques correspond à un décollement de matériaux et à une dysharmonie de niveaux. Ces calcaires constituent un relief vigoureux, marqué par une intense activité tectonique surtout sensible dans la période Domérien-Aalénien. Les séquences successives sont séparées par de nombreuses discontinuités, qui présentent des lacunes et des discordances.

Nous n'avons pas échantillonné cette région climato-géologique, qui dispose de nombreuses similitudes avec la fosse Vocontienne. Les résultats ont été étendus depuis la fosse Vocontienne vers la nappe de Digne.

4) CONCLUSION

Les Alpes externes méridionales sont stratifiées en trois régions climato-géologiques, homogènes d'un point de vue climat et géologie (tectonique et lithologie). Cette

Présentation générale

stratification de l'espace correspond à un changement d'échelle de perception, depuis *l'échelle la plus petite* de notre étude (les Alpes externes méridionales) vers *l'échelle dite intermédiaire* (trois régions climato-géologiques) ; pour la phase d'extrapolation, ce sont deux niveaux qui ont servi de cadre à notre étude des relations entre le milieu et la production.

Mais avant cette étape d'extrapolation, les deux régions climato-géologiques de "l'axe Ventoux-Lure" et de "la fosse Vocontienne" sont réduites aux seuls espaces peuplés en *Pin noir* d'Autriche et ont été caractérisées par un massif forestier test. Dans les deux cas, nous avons choisi un **massif forestier test**, représentatif d'un point de vue géologique, de la région climato-géologique en question, dans le sens où il présente la totalité des séries stratigraphiques, séries ordonnées dans la logique historique. Le massif forestier test constitue une nouvelle échelle de perception, *échelle la plus grande* de notre étude. A cette nouvelle échelle, nous avons encore effectué une stratification de l'espace, car ces massifs forestiers tests sont encore trop vastes (minimum 500 hectares). Cette stratification fait l'objet du paragraphe suivant.

III) STRATIFICATION EN UNITES GEO-PEDOLOGIQUES HOMOGENES

Nous avons considéré le **massif forestier test** comme **l'échelle ultime** pour notre approche du sujet, car il représente le niveau d'application du gestionnaire de terrain, avec qui nous avons étroitement collaboré pour réaliser cette étude. Dans cette thèse, le massif forestier est une futaie régulière de *Pin noir* d'Autriche, autour de 80 ans, étendue sur un minimum de 500 hectares. Après avoir sillonné les différents départements des Alpes externes méridionales et visité de nombreux massifs forestiers, tous proposés par des forestiers locaux, nous en avons retenu deux qualifiés de massifs forestiers tests :

- * l'un pour caractériser l'axe **Ventoux-Lure**, il s'agit des forêts domaniales de Brantes, Savoillans et Saint-Léger-du-Ventoux (Vaucluse), situées sur le **versant nord du Ventoux** ;
- * l'autre pour caractériser la **fosse Vocontienne**, il s'agit des forêts domaniales de Solaure et de Glandasse, situées dans le Diois (nommées Diois dans le texte).

Le choix définitif de ces deux massifs forestiers tests a été motivé par les critères suivants :

- * **Représentativité de la région géologique** arrêtée dans la pré-étude ; par exemple Solaure est un synclinal perché classique de la fosse Vocontienne, qui se retrouve dans les directions est ou sud de cette région climato-géologique ;
- * **Série géologique complète et ordonnée**, avec toute la diversité caractéristique de la région géologique.

Par ailleurs, il faut remarquer qu'en choisissant un espace restreint tel qu'un massif forestier, nous avons privilégié l'étude des relations entre les facteurs géo-pédologiques et la production, avec éventuellement en complément la présence de quelques descripteurs micro-climatiques ("climat local"), mais on écarte tout approche du climat régional ("macro-climat").

Dans une première approche du terrain, dirigée par le Professeur SOUCHIER, nous avons parcouru les massifs forestiers tests sélectionnés, afin d'en extraire une **logique écologique**, pour mettre en forme une nouvelle stratification du milieu, à grande échelle. Les observations effectuées sur le terrain dans les deux massifs retenus, nous ont permis de privilégier deux aspects du milieu, à savoir : la **géologie** et la **pédologie**.

Par un couplage des paramètres "géologie" et "pédologie", nous avons mis en forme les **unités géo-pédologiques**, qui offrent une stratification naturelle de l'espace. Cette

Présentation générale

stratification en unités homogènes, avait pour objectif de simplifier et de cerner plus étroitement le milieu afin d'exprimer les relations entre le milieu et la production. Chaque strate inventoriée, puis décrite a été repérée sur le terrain ; elle a été échantillonnée suivant un tirage au hasard de points, qui correspondent à des relevés. La forme de ces relevés est exposée dans le chapitre concernant les "DONNEES ET MEHODES" : "Données récoltées durant l'été 1990 et l'été 1991".

Cette stratification à l'échelle la plus grande, nous a fourni deux approches possibles pour définir les relations entre le milieu et la production :

- * **approche synthétique** : relations entre le milieu au sens des unités géo-pédologiques et la production ;
- * **approche analytique** : relations entre les descripteurs écologiques collectés sur chaque relevé et la production. Ces relevés caractérisent les différentes unités géo-pédologiques.

Les deux massifs forestiers tests, appartenant à deux régions climato-géologiques différentes, se distinguent par leur géologie et ils présentent des similitudes dans la diversité de leurs formations superficielles. La stratification réalisée, après enquête sur le terrain pour chaque massif, a été formalisée grâce à la bibliographie existante dans cette région. Elle passe par la mise en évidence du rôle fondamental de la structure physique, propre aux roches calcaires, dans le fonctionnement et les caractéristiques des sols dérivés ou superposés (BARTHES J.-P. et BORNAND M., 1987). Dans un premier temps, il est donc approprié de proposer quelques rappels concernant la géologie et les formations superficielles.

1) SUBSTRATUM GEOLOGIQUE

Dans ce paragraphe, nous avons voulu dégager de la présentation faite dans le chapitre "Présentation du milieu physique des Alpes externes méridionales", les quelques éléments simples de géologie, qui nous ont servi dans chaque massif forestier test.

VERSANT NORD DU VENTOUX

Le versant nord du Ventoux présente un système stratigraphique limité aux premières séries du Crétacé depuis le Berriasien jusqu'au Bédoulien. Ce système du Crétacé est largement dominé par le faciès calcaréo-marneux de l'Hauterivien (37 sur les 50 relevés effectués durant l'été 1990 sont sur un substratum calcaréo-marneux) ; on observe de plus la présence de faciès calcaires fissurés par gélifraction ou exceptionnellement de faciès marneux.

- * **faciès calcaire** :
 - calcaires à gros bancs (morphologiquement confondus avec la barre Tithonique) au Berriasien ;
 - gros bancs calcaires blancs au Bédoulien ;
- * **faciès calcaréo-marneux** :
 - alternance de bancs calcaréo-marneux et de lits marno-calcaires à l'Hauterivien ;
 - succession de calcaires à tendance argileuse évoluant vers des termes de plus en plus marneux au Barrémien ;
- * **faciès marneux** :
 - marnes jaunes-grises du Valanginien.

FORETS DOMANIALES DE SOLAURE ET DE GLANDASSE

Dans l'espace naturel choisi, c'est-à-dire l'espace où se développe le *Pin noir* d'Autriche, deux systèmes stratigraphiques s'individualisent :

- * **Le système Jurassique** : la base de ce système est un faciès marneux sur lequel repose un faciès calcaréo-marneux, qui se termine par une puissante falaise calcaire : le Tithonique. Cette falaise constitue le trait morphologique et structural majeur dans ce paysage.
- * **Le système du Crétacé** : il est réduit dans le cas que nous avons retenu au premier étage du Crétacé : le Berriasien, correspondant à une série de calcaires à gros bancs, comportant des intercalations marno-calcaires.

Le caractère lithologique des roches permet de distinguer les faciès suivants :

- * **faciès calcaire** : calcaires durs du Tithonique et du Berriasien ;
- * **faciès calcaréo-marneux** : calcaires marneux du Kimméridgien et du Rauracien (Oxfordien supérieur) ;
- * **faciès marno-calcaire** : marno-calcaires du Berriasien et du Kimméridgien (davantage de marne) ;
- * **faciès marneux** : marnes de Oxfordien moyen (Argovien) et Oxfordien inférieur et Callovien supérieur (Terres noires).

2) FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les formations superficielles, qui nappent le substratum géologique, sont prospectées par les racines du peuplement. Les situations pédologiques du versant nord du Ventoux (Vaucluse) et des forêts domaniales de Solaure et de Glandasse (Drôme) sont celles de versants plus ou moins abrupts, qui présentent trois grands types de formations superficielles, les colluvium, les éboulis et la grèze (**brèche**), (CAMPY M. et MACAIRE J.-J., 1989).

- * **Les colluvium** : ils se composent d'éléments grossiers arrachés au substratum et mélangés à une matrice plus ou moins abondante. Cette formation va couler le long du versant et elle s'accumule dans les zones à topographie favorable (forme concave) et pente faible ; par contre, lorsque la topographie est difficile (forme convexe, croupe) et la pente forte, le colluvium est assez mince.
- * **Les éboulis** : des éléments grossiers sous l'action de l'érosion (gel, dégel) sont en permanence arrachés aux falaises calcaires dominantes. Ces éléments de dimensions variables viennent s'accumuler dans des zones à forte pente et forment des pierriers plus ou moins denses, qui déterminent totalement le milieu.
- * En outre, une formation superficielle fossile : **la grèze**, sans doute héritée de phases climatiques plus humides et plus froides, correspond à un matériau hétérométrique à éléments anguleux et à ciment calcaire, généralement ordonné en épandage le long de la pente. Ces grèzes sont recouvertes d'un colluvium plus récent et plus ou moins important. Dans certain cas, elles affleurent et forment des arêtes bréchiques ou **brèches**.

EN CONCLUSION

En combinant le "substratum géologique" et les "formations superficielles", nous obtenons la mise en forme des unités géo-pédologiques, objet du chapitre suivant.

3) UNITES GEO-PEDOLOGIQUES

VERSANT NORD DU VENTOUX

Pour mettre en forme la stratification du versant nord du Ventoux, il faut nécessairement combiner les aspects géologiques et pédologiques décrits précédemment ; nous retiendrons :

- * *au niveau géologique* : la nature de la roche lorsque le matériau est peu épais ;
- * *au niveau pédologique* : l'épaisseur du matériau au-dessus du substratum.

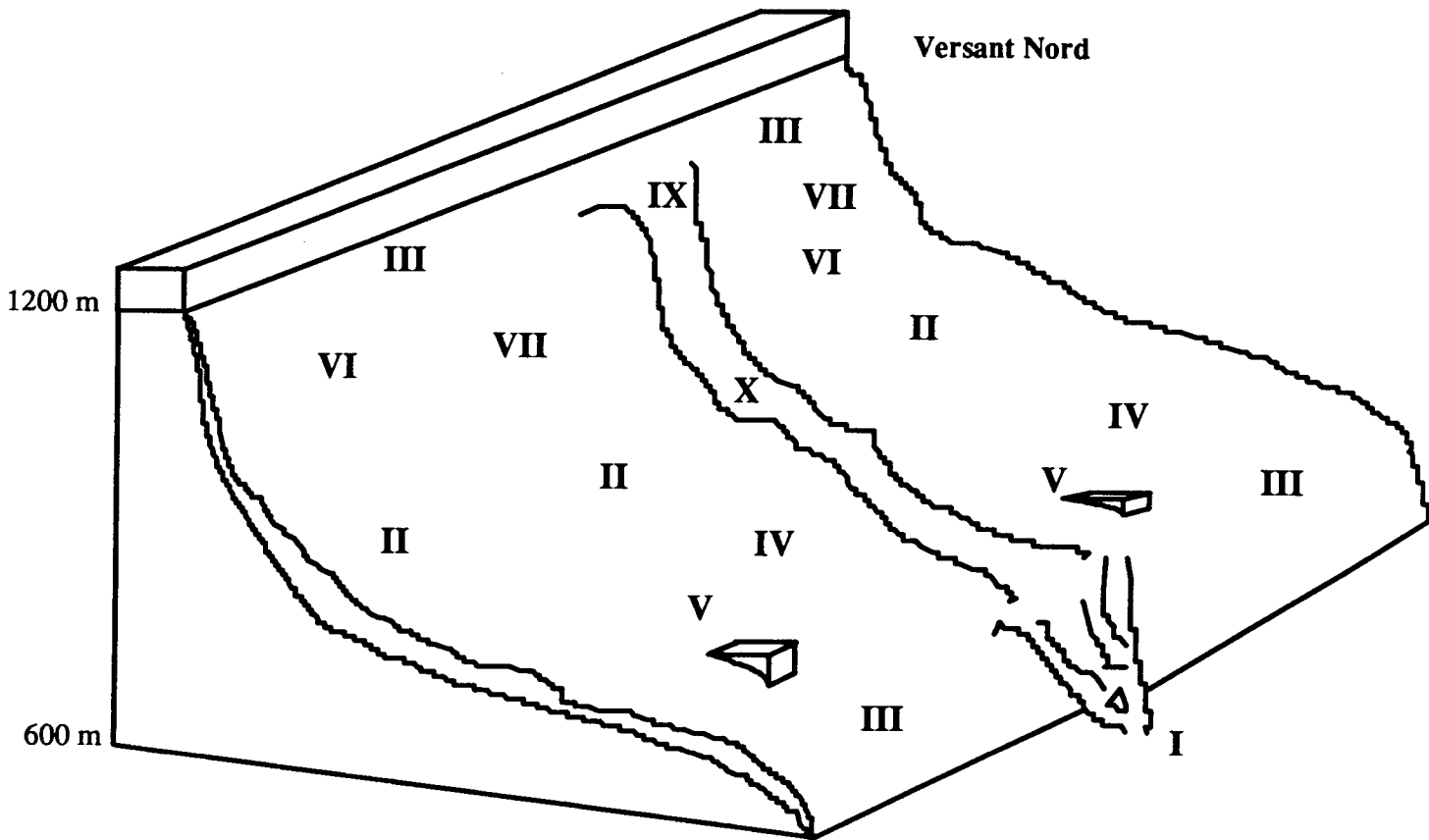
Unités géo-pédologiques du versant nord du Ventoux

Profondeur du profil pédologique	> 50 cm		< 50 cm							
	zone d'atterrissement	colluvium épais	colluvium mince					marnes altérées	éboulis vifs	Cônes torrentiels
Faciès			Calc. durs	Calc. gréseux	brèche	grèze	Calc. marneux	marnes		
unités géo-pédologiques	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII (*)	IX	X

- * Situation particulièrement favorable de bas de pente :
 - ◆ I ZONES D'ATTERRISSEMENTS,
- * Situation à topographie et pente douces permettant une accumulation de matériaux arrachés au sommet :
 - ◆ II COLLUVIUM EPAIS (> 50 cm),
- * Situation à faible accumulation de matériaux : COLLUVIUM MINCE (< 50 cm) sur différents substratum :
 - ◆ III CALCAIRES DURS,
 - ◆ IV CALCAIRES GRESEUX,
 - ◆ V BRECHE,
 - ◆ VI GREZE,
 - ◆ VII CALCAIRES MARNEUX,
- * Situation particulière et marginale :
 - ◆ VIII MARNES,
 (*) un unique relevé effectué, se rapprochant de situations observées dans le Diois (pas de fiche descriptive correspondante)
- * Situations particulières et extrêmes :
 - ◆ IX EBOULIS VIFS,
 - ◆ X CONES TORRENTIELS.

Ces unités géo-pédologiques s'organisent en une unité paysagère, qui s'étage de 500 à 1100 m. Sous la barre urgonienne, autour de 1000 m s'agencent des bancs calcaires

REPARTITION DES UNITES GEO-PEDOLOGIQUES DANS LE VERSANT NORD DU VENTOUX



- I : Zones d'atterrissements
- II : Colluvium épais (> 50 cm)
- III : Calcaires durs
- IV : Calcaires greseux
- V : Brèche
- VI : Grèze
- VII : Calcaires marneux
- IX : Eboulis vifs
- X : Cônes torrentiels

VIII : Marnes (non représentée)

Présentation générale

affleurants du Bédoulien (III), dominant les situations à forte accumulation de colluvium (II) qui prennent place autour de 900 m. Viennent ensuite, entre 850 et 600 m, l'ensemble des colluvium minces sur divers types de substratum (IV, VI, VII) ; le bas de versant s'achève autour de 500 m par des bancs de calcaires durs fissurés du Berriasien (III), par la présence de brèches affleurantes (V) et par quelques niveaux marneux assez exceptionnels (VIII). Les éboulis vifs (IX) et cônes torrentiels (X) trouvent leur place sur la totalité du versant pour des topographies généralement difficiles et des pentes fortes. Enfin quelques zones d'atterrissement jouxtent la plaine cultivée (I).

FORETS DOMANIALES DE SOLAURE ET DE GLANDASSE

Le massif des forêts domaniales de Solaure et Glandasse (Diois) a une structure géomorphologique de **synclinal perché**, structure classique dans cette région de la fosse Vocontienne. Comme pour le versant nord du Ventoux, une combinaison de la géologie et de la pédologie permet d'extraire l'ensemble des unités géo-pédologiques.

Ce massif forestier du Diois se décompose en deux grandes unités paysagères, qui rassemblent les différentes unités géo-pédologiques. Ces deux unités paysagères sont les suivantes :

Unités géo-pédologiques du Diois

Première unité paysagère

Deuxième unité paysagère

Etage géologique	Berriasien Tithonique	Séquanien, Kimméridgien et Oxfordien sup.			Oxfordien moy. et inf. Callovien		Séquanien, Kimmérid. Oxfordien sup.	
Faciès Roche	calcaire dur massif structurant	calcaréo-marneux ou marno-calcaire			marneux		calcaréo-marneux ou marno-calcaire	
	-	-	Grèze indurée		Marnes de l'Argovien	Terres Noires	-	
Matériau Sol	sol rouge, altération en place	colluvium réduit	colluvium > 50 cm	colluvium mince	Marnes altérées		Cône torrentiel éboulis	Cône torrentiel
unités géo-pédologiq.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII

Première unité paysagère

- * Situation tabulaire au-dessus de la falaise Tithonique :
 - ◆I **CALCAIRES DURS DU PLATEAU,**
- * Falaise Tithonique,
- * Pente calcaréo-marneuse :
 - ◆II **BANCS CALCAIRES DURS / COLLUVIUM REDUIT,**
 - ◆III **COLLUVIUM EPAIS SUR GREZE,**
 - ◆IV **COLLUVIUM MINCE SUR GREZE,**

Présentation générale

- * Marnes :
 - ◆ V MARNES DE L'ARGOVIEN,
 - ◆ VI TERRES NOIRES.

Deuxième unité paysagère

- * Falaise Tithonique,
- * Falaise calcaréo-marneuse,
- * Pente calcaréo-marneuse :
(accumulation au bas du versant d'éléments arrachés à la falaise)
 - ◆ VII CONE TORRENTIEL-BOULIS,
 - ◆ VIII CONE TORRENTIEL.

Parmi les situations géologiques énumérés précédemment, les "Falaises" (Tithonique ou calcaréo-marneuse) n'ont finalement pas été prises en compte, car ces strates dépourvues de végétation, n'abritent pas de *Pin noir* d'Autriche.

EN CONCLUSION

Après avoir exposé la stratification en unités géo-pédologiques de chaque massif forestier test, nous voulons à présent définir correctement chacune de ces entités. C'est l'objet du paragraphe suivant.

A ce niveau, il nous paraît intéressant de rappeler certaines observations de l'introduction. Ces unités géo-pédologiques sont-elles des stations ? La réponse est non, car elles ne répondent pas à la définition d'homogénéité de la station, telle qu'elle est donnée par DELPECH R. *et al.*, 1985 ; ces unités géo-pédologiques ont été construites sur une homogénéité écologique et non floristique. Si on fait référence au catalogue des "plateaux calcaires de Lorraine" (BECKER M., LE TACON F. et TIMBAL J., 1980), c'est la végétation qui permet la stratification des unités "stationnelles" ; les paramètres écologiques viennent compléter ce découpage. Même si la définition de la station est en pleine évolution et qu'il semble qu'elle reprenne son sens premier, à savoir celui de biotope, nous préférons conserver le terme "d'unité géo-pédologique".

IV) DESCRIPTION DES UNITES GEO-PEDOLOGIQUES

Pour chaque unité géo-pédologique un certain nombre de relevés ont été effectués. Cette campagne de terrain, nous a permis de décrire et de comprendre les mécanismes fonctionnels de ces diverses situations. A priori, le protocole prévoyait un minimum de cinq relevés par unités géo-pédologiques ; finalement cela n'a pas pu être réalisé dans chaque cas, car certaines unités se trouvaient être peu représentées dans la forêt choisie.

Pour chaque unité géo-pédologique, nous proposons :

- * une description de leur système "roche-matériau-sol" sous la forme d'une fiche descriptive,
- * des résultats d'analyses effectuées en laboratoire à propos du calcaire et de la fraction fine "argile+limon",
- * les descripteurs du milieu les plus significatifs pour exprimer l'indice de fertilité H_{80} ; les uns concernent la station proprement dite (altitude, pente, exposition, ..., topographie), les autres la roche et/ou les matériaux, puis certaines caractéristiques physiques du sol (épaisseur, pierrosité, ...), y compris une estimation de la réserve hydrique du sol.

Présentation générale

Cette présentation, au-delà d'une simple description des différents types de milieux rencontrés dans les deux massifs forestiers tests, propose quelques éléments de réponse, qui serviront ultérieurement pour exprimer les relations entre le milieu et la production.

Un certain nombre d'abréviations sont utilisées dans les fiches suivantes ; nous en rappelons ci-dessous les différentes correspondances.

* Les relevés :

- ◆ V1 : relevé n°1 versant nord du Ventoux - dept. 84,
- ◆ D1 : relevé n°1 de la forêt domaniale de Solaure (Diois) - dept. 26,
- ◆ M1 : relevé n°1 de la forêt domaniale de Glandasse (Diois, commune de Menglon) - dept. 26,

* Les paramètres "milieu" :

1) caractéristiques stationnelles,

- ◆ "alti" : altitude en m,
- ◆ "pente" : pente en %,
- ◆ Sud : exposition sud,
- ◆ "Vconc" : topographie du versant, versant concave,
- ◆ "Vrect" : topographie de versant, versant rectiligne,
- ◆ "Vconv" : topographie de versant, versant convexe,
- ◆ "P<A" : topographie stationnelle, pertes en eau inférieures aux apports,

2) roche, matériaux,

- ◆ "grèze" : grèze,
- ◆ "caldur" : calcaire dur fissuré,
- ◆ "calmar" : calcaire marneux,
- ◆ "éboulis" : éboulis vifs,

3) sol, caractéristiques physiques,

pierrosité (recueillies in situ)

- ◆ "caiBC" : pourcentage en éléments grossiers du profil pédologique, sauf horizon A1,
- ◆ "pier1" : pierrosité en surface de 10 %,
- ◆ "pier23" : pierrosité en surface de 20 à 30 %,

épaisseur (recueillies in situ puis estimée pour la réserve utile)

- ◆ "epai1" : épaisseur du profil inférieure à 50 cm.
- ◆ "RUP" : réserve utile du profil pédologique en mm,

calcaire (mesures en laboratoire)

ZONE D'ATTERVISSEMENT

Hauterivien

Situation particulièrement favorable, quoique exceptionnelle (2 relevés effectués), que l'on rencontre en bas de pente. Il s'agit d'un éboulis à peine stabilisé, qui constitue une zone d'accumulation à taux d'argile assez élevé et à bonne réserve hydrique.

SITUATION

- * Situation de bas de pente, généralement au pied du versant nord du Ventoux, vers 500-600 m.
- * La pente est presque nulle et la topographie, en forme de "cuvette", favorisent la réception et l'accumulation de l'eau et des éléments minéraux.

ROCHE

- * Lithologie: difficile à observer à cause de l'épaisseur du matériau, elle n'intervient pas dans la croissance du peuplement. Par lecture de la carte ou par observation au voisinage, le substratum correspond à des bancs de calcaires durs fissurés, du Berriasien.

MATÉRIAU - SOL

On ne peut pas parler de sol réellement stabilisé ("climacique") dans le cas particulier de zone d'atterrissement. Il s'agit davantage d'une accumulation d'éléments grossiers arrachés à la falaise et emportés dans la pente, qui viennent s'accumuler en bas de pente. Cette situation particulière est riche en matière organique et dispose d'un humus développé "L" (2 cm) et "F" (4 cm) ; elle peut s'apparenter à un **sol humo-calcaïque brunifié**.

- * Nature: sol constitué par des apports de matériaux arrachés dans le haut du versant ; il présente un taux élevé d'argile de décarbonatation.
- * Épaisseur: importante, plus d'1 m.
- * Texture et Pierrosité:
 - ◆ A1 : de texture argilo-limoneuse, cet horizon contient un fort taux d'humus qui emballe près de 80 % d'éléments grossiers. Le taux de calcaire actif dans le cas du relevé "V4" est très faible (moins de 1 %) ;
 - ◆ A1-C : horizon dominé par la présence des éléments grossiers (80 %), il dispose d'une structure grumeleuse et d'un taux élevé de matière organique. Comme dans l'horizon "A1", cet horizon "A1-C" est quasiment dépourvu de calcaire actif (moins de 1 %).
- * Origine: des éléments grossiers sont arrachés en haut de versant à la falaise urgonienne ; ils alimentent de très nombreux éboulis vifs, qui viennent ensuite s'accumuler en bas de versant et constituent ces situations particulières, à topographie favorable.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU PIN NOIR

1) Données

* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

Relevés	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	A1-C	A1	A1-C	A1	A1-C
V4 V37	0,21 -	0,81 -	0,13 -	0,44 -	61 -	55 -
F-ratio*	8,037	5,06	6,503	4,168		
moyenne écart-type	0,21 0	0,81 0	0,13 0	0,44 0		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	pente	RUP	caiBC	P<A	caldur	Texture	
						A1	A1-C
V4 V37	55 24	39,40 67,20	80 50	1 1	1 0	AL L	L L

2) Remarques

Cette unité géo-pédologique des "zones d'atterrissement" est représentée par deux placettes, car il s'agit d'une situation assez exceptionnelle au pied du versant nord du Ventoux, en conséquence il est difficile de généraliser cette description. La réserve utile y est sous-estimée, car l'épaisseur du matériau est mal appréhendée (toujours plus d'un mètre). Sur le terrain en effectuant la fosse pédologique, nous avons observé même en pleine période de sécheresse la présence d'humidité, provenant des pentes avoisinantes et conservée en réserve sur place. Concernant le **taux de calcaire actif**, bien que nous disposions d'une unique analyse pour le relevé "V4", on observe que ce taux est inférieur à 1 % ; on peut conclure à un **sol décarbonaté sans calcaire actif**. A cela s'ajoute, une **texture** des différents horizons pédologiques à tendance limoneuse et une **topographie stationnelle** à bilan hydrique positif ("P<A"), correspondant à une forme de "cuvette". Ces paramètres du milieu favorables se combinent à une réserve utile certainement meilleure que celle qui a été déterminée, pour donner lieu à une situation exceptionnellement favorable pour le *Pin noir* d'Autriche. Dans ces "zones d'atterrissement", les arbres très droits atteignent 25 m à 80 ans.

COLLUVIUM EPAIS

Hauterivien ou Barrémien-Bédoulien

Sous cette dénomination des "colluvium épais" sont rassemblés tous les relevés présentant une épaisseur de matériau supérieure à 50 cm et une roche sous-jacente difficilement observable, qui est sans influence sur le peuplement. Dans ce profil les racines peuvent s'insinuer dans la terre fine, qui s'accumule et englobe les éléments grossiers du colluvium meuble.

SITUATION

- * Situation généralement d'altitude sous la barre urgonienne entre 800 et 1000 m.
- * La pente présente une grande variabilité dans ces situations. Aux pentes fortes (jusqu'à 60 %) correspond une topographie favorable de type "concave", permettant l'accumulation de matériau ; alors que les pentes plus douces (20 %) sont associées à une plus grande variété de topographies.

ROCHE (non observée)

MATÉRIAU - SOL

Ces sols sont caractérisés par un mélange plus ou moins intime d'éléments grossiers calcaires de toute dimension et de terre fine enrichie en matière organique. Le premier horizon pédologique est généralement humifère surmonté d'un "L" d'environ 2 cm et d'un "F" de 3 cm. Ces sols évoluent de forme **rendzinique colluviale** à des **sols colluviaux en cours de brunification**.

- * Nature: un colluvium de pente correspond à un brassage mécanique et biologique entre des éléments calcaires, de la matière organique, des éléments silicatés. Ces profils disposent dans tous les cas d'argile de décarbonatation et d'un faible taux de calcaire actif.
- * Épaisseur : importante approchant le mètre.
- * Texture et Pierrosité :
 - ◆ A1 : de texture limoneuse ou limono-sableuse, on observe un fort taux d'humus, qui se mêle à près de 50 % d'éléments grossiers et dont la structure est grumeleuse. Le taux de calcaire actif est faible (autour de 1 %) ;
 - ◆ A3 : apparition d'un horizon d'accumulation à texture limono-argileuse nette et structure grumeleuse. On note encore la présence de matière organique dans cet horizon accompagné par 40 % d'éléments grossiers ;
 - ◆ C : de texture limono-argileuse avec toutefois davantage d'argile que dans l'horizon précédent, cet horizon n'est pas toujours accessible car il se situe au-delà de 60 cm de profondeur. Il dispose de près de 50 % d'éléments grossiers.
- * Origine : des éléments grossiers sont arrachés en haut de versant à la falaise urgonienne ; ils glissent ensuite dans la pente, où ils se mélangent à la terre fine et viennent combler sélectivement l'espace en fonction de la topographie.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*1) Données

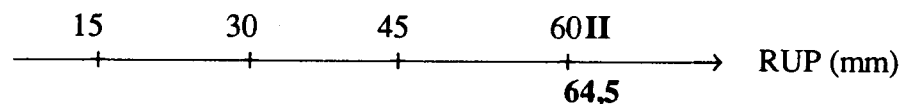
* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

Relevés	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3
V1	-	-	-	-	-	-
V2	2,39	34,62	0,96	20,11	40	58
V8	4,62	7,08	2,73	4,39	59	62
V10	0,40	2,02	0,27	1,49	68	74
V12	3,93	3,20	2,12	2,18	54	68
V15	1,19	0,39	0,81	0,31	68	80
V20	0,27	0,79	0,20	0,60	73	75
V21	1,20	8,43	0,64	5,87	53	73
V22	2,17	0,80	1,17	0,60	54	74
V28	2,31	7,73	1,34	4,48	58	58
V30	1,95	2,03	1,05	1,50	54	74
V32	1,10	0,73	0,62	0,67	56	92
V34	0,81	5,3	0,36	3,76	45	70
V35	3,40	2,12	1,97	1,14	58	54
V36	0,35	0,42	0,21	0,33	59	78
V42	0,40	10,54	0,18	8,22	45	78
V43	3,58	-	2,51	-	70	-
V46	1,46	8,95	0,95	5,91	65	66
F-ratio*	8,037	5,06	6,503	4,168		
moyenne	1,854	5,951	1,064	3,848		
écart-type	0,329	2,099	0,198	1,241		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	pente	RUP	caiBC	P<A	caldur	Texture	
						A1	C
V1	54	63,1	30	0	1	L	LA
V2	45	61,6	30	0	1	L	LS
V8	42	52,7	50	0	0	LS	LS
V10	35	52,1	50	0	0	LS	L
V12	42	98,4	50	0	0	L	LA
V15	51	54,4	60	0	0	L	LA
V20	14	54,6	50	0	0	L	L
V21	41	53,4	50	0	0	L	LS
V22	41	54,0	50	0	0	LA	LAS
V28	21	48,3	40	0	0	L	L
V30	32	65,7	40	0	0	L	LA
V32	56	101,4	50	1	0	L	LA
V34	37	50,4	50	0	0	L	L
V35	61	59,4	30	1	0	L	LAS
V36	46	81,3	20	0	0	LS	LA
V42	39	66,0	60	0	0	LS	LAS
V43	58	62,0	60	0	0	LA	LA
V46	43	81,6	50	0	0	LA	LA

2) Remarques

La réserve utile calculée dans cette unité géo-pédologique des "colluvium épais" est la plus importante réserve utile enregistrée dans ce massif du Ventoux. Cependant, il faut signaler que cette grandeur dépend notamment de la profondeur du sol, qui est généralement sous-estimée, puisque la roche n'est pas toujours atteinte. On peut donc penser que ce profil pédologique est beaucoup mieux pourvu en eau, que ce qui a été calculé. Par ailleurs, le **taux de calcaire actif** enregistré dans cette unité géo-pédologique est faible, autour de 1 %, si on considère l'horizon "A1" ou 4 à 6 % pour l'horizon "A3"; et la **texture** des différents horizons est fine, avec un fort taux d'argile et de limon de décarbonatation. Ces trois critères expliquent aisément la fertilité d'un tel paysage; la hauteur moyenne de ces peuplements de *Pin noir* d'Autriche atteint 20,09 m ($\sigma = 0,40$ m), à 80 ans.

CALCAIRES DURS

Barrémien et Bédoulien

Ces situations sur le versant nord du Ventoux ont été observées principalement dans la partie sommitale, sous la falaise urgonienne (Barrémien-Bédoulien) ; le *Pin noir* d'Autriche est peu représenté dans de tels milieux, car il laisse à ces altitudes la place au *Hêtre* et au *Pin à crochets*. D'autre part, il faut noter l'existence de quelques stations comparables sur le plan pédologique à basse altitude, vers 600 m (Berriasien).

SITUATION

- * Généralement, situation d'altitude autour de 1000 m, exceptionnellement à basse altitude, 600 m.
- * Les pentes associées à ces situations sont moyennes ou fortes ; elles correspondent à des bilans hydriques négatifs (pertes en eau supérieures ou dans le meilleur des cas égales aux apports).

ROCHE

- * Lithologie : bancs de calcaire dur, assez facilement observable du fait de la faible épaisseur de sol.
- * Altération et Fissuration : les bancs de calcaire dur sont fissurés et altérés par une double action mécanique et chimique. De l'eau pénètre les fentes et par gel, dégel provoque la fragmentation de la roche. L'altération intervient ensuite dans ces fentes et le calcaire est fragmenté en blocs. Ces fentes sont comblées par de la terre, accessible au système racinaire ; mais elles ne sont pas prises en compte dans la description du profil en terme de réserve disponible pour la végétation.

MATÉRIAU - SOL

Profil pédologique superficiel de type "AC" ; on parle dans ce cas de **rendzine colluviale légèrement brunifiée**, ou bien de **lithosol** dans le cas extrême d'une roche affleurante. Dans ces stations la pédogénèse est lente, d'où la présence des sous-horizons "L" et "F", assez développés (environ 3-4 cm).

- * Nature : colluvium mince recouvrant les bancs de calcaire dur en cours d'altération. Taux élevé d'argile de décarbonatation pour enrayer le taux de calcaire actif.
- * Épaisseur : réduite environ 30 cm.
- * Texture et Pierrosité :
 - ♦ A1 : de texture limono-argileuse, on observe un fort taux de matière organique. La structure comporte de gros grumeaux irréguliers, parfois anguleux. Des traces d'une grande activité biologique et de passages de vers de terre sont repérables. Le taux de calcaire actif demeure globalement faible ;
 - ♦ C : de texture limono-argileuse voire argilo-limoneuse, cet horizon peut-être confondu avec la roche elle-même, dans la mesure où la densité en blocs est parfois très élevée (80-90 %). Sur le plan chimique, on note une teneur élevée en calcaire actif, ce qui affecte à la croissance du peuplement.

- * Origine : ce type de sol colluvial présente deux origines complémentaires :
- ◆ *apports* : des éléments grossiers arrachés à la falaise et mélangés à de la terre fine sont emportés dans la pente et nappent les bancs calcaires sur une faible épaisseur ;
 - ◆ *altération* : l'altération sur place de la roche sous-jacente vient compléter ce sol.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*

1) Données

* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

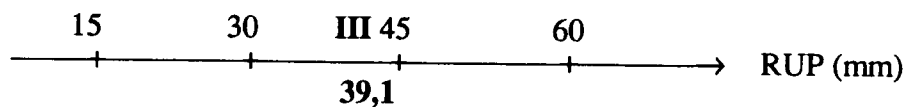
Relevés	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	A1	C
V16	1,21	37,74	0,92	27,17	76	72
V18	0,41	0,40	0,62	0,29	40	72
V26	7,96	7,27	5,57	5,60	70	77
V31	1,20	28,58	0,66	15,43	55	54
V41	-	31,73	-	27,29	-	86
V45	4,50	-	2,92	-	65	-
V48	0,99	-	0,79	-	80	-
V49	-	-	-	-	-	-
V50	27,61	-	16,29	-	59	-
F-ratio*	8,037	5,06	6,503	4,168		
moyenne	6,268	21,144	3,901	15,156		
écart-type	3,699	7,299	2,183	5,495		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	pente	RUP	caiBC	P<A	caldur	epai1	Texture	
							A1	C
V16	68	35,2	50	0	1	1	LAS	LA
V18	71	29,4	70	0	1	1	LS	LS
V26	54	57,4	30	0	1	1	LA	LA
V31	33	39,2	30	0	1	1	L	LA
V41	72	43,2	60	0	1	1	LA	L
V45	48	34,9	40	0	1	1	LAS	LA
V48	47	42,0	80	0	1	1	LA	AL
V49	58	42,0	90	0	1	1	LA	LA
V50	68	28,5	80	1	1	1	AL	AL

2) Remarques



La réserve utile pour des "calcaires durs" est sans doute très sous-estimée car le système racinaire du peuplement forestier profite de fissures profondes dans les bancs calcaires, non prises en compte dans les calculs de R.U. Par suite, ces stations sont caractérisées par une R.U. assez faible, qui ne correspond pas à la réalité du terrain. Le **taux de calcaire actif**, qui affecte la croissance des arbres en inhibant leur capacité d'absorption, est assez conséquent dans cette unité géo-pédologique (présence de 15 % de calcaire actif). L'effet du calcaire actif, néfaste pour le peuplement, est ici neutralisé par une **texture**, à dominante argileuse. L'argile, l'humus et la présence de fer permettent la mise en place d'un **sol brunifié**, plus favorable au peuplement forestier qu'une simple rendzine. La réserve utile étant améliorée par la présence de fissures dans le calcaire et par le caractère colluvial du profil pédologique, on observe dans ces conditions un peuplement qui atteint 19,80 m ($\sigma = 0,38$ m), à 80 ans.

CALCAIRES GRESEUX

Les "calcaires gréseux" constituent une nouvelle unité géo-pédologique, peu représentée sur ce versant nord du Ventoux. Ces calcaires sont recouverts par un colluvium toujours mince (< 50 cm), qui se compose d'apports provenant du haut du versant et se comporte comme une craie grossière.

SITUATION

- * Situation de basse altitude, autour de 600 m.
- * Pente généralement moyenne ou bien forte.

ROCHE

- * Lithologie : la roche sous-jacente est un calcaire gréseux visible dans la mesure où la pente forte favorise une érosion permanente du profil pédologique, ce qui induit un colluvium de faible épaisseur.
- * Altération et Fissuration : ces deux mécanismes se produisent sur place et aboutissent à la formation d'éléments sableux provenant de l'altération du ciment, qui participent à l'élaboration du matériau et l'enrichissent en sable.

MATÉRIAU - SOL

Le sol de cette unité géo-pédologique est une **rendzine colluviale** superficielle, riche en matière organique et peu compacte. Des apports en éléments grossiers provenant du haut du versant complètent le profil. Les niveaux humifères "L" et "F" sont bien représentés, environ 2 ou 3 cm.

- * Nature : rendzine colluviale riche en matière organique.
- * Épaisseur : inférieure à 50 cm.
- * Texture et Pierrosité :
 - ◆ A1 : de texture limono-sableuse, cet horizon est riche en turricules et présente des traces visibles de calcaire actif ; il possède près de 40 % d'éléments grossiers ;
 - ◆ C : horizon d'altération de la roche, à texture sablo-limoneuse, qui se compose de 40 % d'éléments grossiers et d'un taux de calcaire actif moyen (9,38 %).
- * Origine : ce matériau est formé à partir d'éléments grossiers arrachés dans le haut du versant, qui se mêlent à de la terre fine, et glissent dans la pente pour constituer un colluvium mince au-dessus du calcaire gréseux.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU PIN NOIR

1) Données

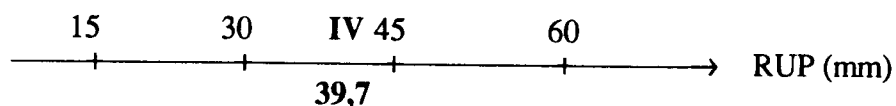
* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

Relevés	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	A1	C
V7	13,47	14,65	7,41	9,96	55	68
V23	8,87	10,40	3,90	5,62	44	54
V47	2,01	16,75	1,02	12,56	51	75
F-ratio*	8,037	5,06	6,503	4,168		
moyenne	8,116	13,933	4,110	9,380		
écart-type	3,329	1,867	1,8476	2,024		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	pente	RUP	caiBC	epai1	Texture	
					A1	C
V7	43	53,5	30	1	L	LS
V23	10	36,7	30	1	LS	SL
V47	61	29,0	50	1	LS	SL

2) Remarques

La réserve utile est faible pour cette unité géo-pédologique des "calcaires gréseux" qui présente un profil pédologique peu épais (< 50 cm) ; à cela s'ajoute une texture filtrante de type sableuse et une quantité non négligeable d'éléments grossiers (40 à 50 %). Le taux de calcaire actif montre une teneur assez faible, environ 10 % de calcaire actif dans l'horizon "C", ce qui est favorable à la croissance du peuplement et empêche l'apparition de phénomènes de chlorose. Ainsi, l'indice de fertilité paraît conditionné en premier lieu par le taux de calcaire actif et secondairement par la réserve utile, dans l'hypothèse où un minimum de réserve utile est disponible pour le peuplement. Pour exemple, les relevés "V7" et "V23", à réserve utile et taux de calcaire actif en "C" faibles, correspondent à des peuplements, qui à 80 ans atteignent respectivement 19,33 m et 20,57 m de hauteur. Par contre, le relevé "V47", à réserve utile extrêmement faible (29 mm) en-dessous du minimum indispensable et à taux de calcaire actif pour "C" égal à 12,56 %, offre un indice de fertilité faible 15,34 m.

BRECHE ET GREZE

Nous présentons dans un unique paragraphe ces deux unités géo-pédologiques dans la mesure où ces deux formations présentent une évolution commune au niveau de la roche, mais plus ou moins achevée. Dans les deux cas, la roche (grèze ou brèche) est surmontée d'un même matériau à savoir une rendzine colluviale mince à tendance à la brunification.

SITUATION

- * Situation de moyenne altitude autour de 700 m.
- * La pente prend des valeurs qui commencent à influencer la croissance des arbres ; la situation est associée à une topographie plutôt défavorable, soit rectiligne, soit convexe, en conséquence le bilan hydrique est soit nul, soit négatif.

ROCHE

- * Lithologie : la **grèze** décrite dans les formations superficielles va subir avec le temps les phénomènes d'érosion, or certaines parties ne pourront être attaquées et au contraire se consolideront davantage, pour constituer la **brèche**. Les brèches forment dans le paysage des sortes d'arêtes parfois légèrement affleurantes, mais toujours infranchissables par les racines.
- * Altération et Fissuration :
 - ◆ la **grèze** peut subir une altération d'origine chimique et mécanique. Ainsi il n'est pas rare d'observer dans la zone de contact entre le matériau colluvial et la grèze une dégradation du ciment, qui entoure les éléments grossiers de la grèze. Ces éléments grossiers sont libérés et ils sont repris dans le colluvium ; de même, les résidus calcaires du ciment sont réintroduits dans le profil pédologique ;
 - ◆ par contre, la **brèche** se comporte comme une roche dure, qui ne donne pas lieu à une désagrégation ; les parties les moins résistantes ayant déjà été emportées.

MATÉRIAU - SOL

Le sol est une **rendzine colluviale** qui peut présenter une tendance à la brunification. Dans tous les cas, ce matériau est peu développé et il est régulièrement rajeuni, car emporté dans la pente. Les sous-horizons "L" et "F" sont assez conséquents, soit environ 2 à 3 cm. Dans quelques cas, l'horizon "A1" a été subdivisé en deux sous-niveaux "A11" et "A12".

- * Nature : colluvium mince, riche en éléments grossiers reposant sur la grèze ou la brèche.
- * Épaisseur : inférieure à 50 cm.
- * Texture et Pierrosité :
 - ◆ A1 : de 10 à 20 cm d'épaisseur, cet horizon présente une texture plus grossière pour les grèzes (limoneuse à limono-sableuse) que pour les brèches (limoneuse). De structure grumeleuse, les grumeaux peuvent parfois être anguleux. Cet horizon comporte environ 40 % d'éléments grossiers. Le pourcentage en calcaire actif des brèches reste faible (2 %), ce qui est

favorable au peuplement ; par contre, pour les stations sur grèze la teneur en calcaire actif devient significative (8 %) ;

◆ C : cet horizon d'altération correspond soit à la grèze altérée, soit à un niveau intermédiaire avant la brèche. La texture est très différente suivant la roche ; dans la cas de la grèze, "C" est limono-sableux, alors qu'il est limono-argileux pour la brèche. Cet horizon comprend davantage d'éléments grossiers 60 % ; et un taux de calcaire actif plus élevé dans les grèzes (16 %) que dans les brèches (11 %).

* Origine : le colluvium est constitué par des éléments grossiers arrachés plus haut et emportés dans la pente en étant mélangés à de la terre fine. Dans la mesure où la topographie est peu favorable et que les pentes ne sont plus négligeables, le colluvium s'accumule faiblement dans ces situations de "colluvium mince". Il faut noter dans le cas des grèzes que ce colluvium est complété par des apports provenant de l'altération de la grèze sous-jacente.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU PIN NOIR

1) Données

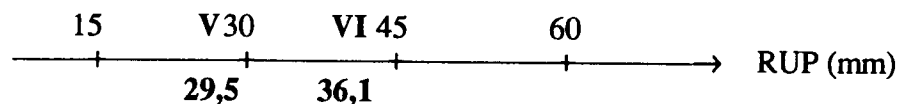
* **Calcaire et texture** (analyses en laboratoire)

Relevés	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	A1	C
Grèze						
V5	3,96	11,54	2,81	7,30	71	63
V17	1,49	0,78	1,19	0,73	80	94
V29	41,05	51,58	17,24	22,70	42	44
V40	22,85	41,62	10,05	31,63	44	76
Brèche						
V6	8,36	12,72	4,01	8,14	48	64
V33	-	30,24	-	23,28	-	77
V39	0,37	0,23	0,20	0,18	53	79
F-ratio*	8,037	5,06	6,503	4,168		
Grèze moyenne écart-type	17,34 9,23	26,38 12,05	7,82 3,68	15,59 7,06		
Brèche moyenne écart-type	4,37 4,00	14,40 8,70	2,11 1,91	10,53 6,77		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	pente	RUP	caiBC	P<A	epail	Texture	
						A1	C
Grèze							
V5	36	26,6	60	0	1	L	L
V17	42	44,1	60	0	1	L	LAS
V29	38	32,3	60	0	1	SL	SL
V40	47	41,5	50	0	1	LS	SL
Brèche							
V6	34	40,1	50	1	1	L	LS
V33	38	29,4	40	0	1	L	LA
V39	22	19,1	60	0	1	LA	AL

2) Remarques

La réserve utile de ces rendzines colluviales, qui présentent un début de brunification, est faible et du même ordre de grandeur pour les deux unités géo-pédologiques étudiées. De plus, le calcaire actif de la fraction "argile+limon" dans l'horizon "C" représente environ 10 % dans l'unité géo-pédologique des "brèches" (V) et 15 % pour les "grèzes" (VI), soit des pourcentages qui doivent commencer à affecter la croissance du peuplement. Ce pourcentage plus élevé dans le cas de la grèze s'explique par les phénomènes d'altération de la grèze, qui réintroduisent dans le sol des éléments carbonatés provenant du ciment, d'où un indice de fertilité moindre : $H_{80} = 15,18 \text{ m}$ ($\sigma = 1,06 \text{ m}$). Par contre, les peuplements de *Pin noir* d'Autriche sont significativement plus hauts sur la brèche ($H_{80} = 18,13 \text{ m}$ $\sigma = 0,55 \text{ m}$) que sur la grèze, mais le pourcentage en calcaire actif ne peut pas être le seul élément de réponse à une telle différence. En effet, la brèche, qui peut certes affleurer par endroit, reste toujours très localisée par rapport à une placette de relevé, telle que nous l'avons définie. La fosse pédologique a été effectuée sur la brèche, où poussent quelques pins, qui ne sont pas les plus gros, et donc non retenus pour définir H_{80} . En conséquence, il n'y a pas véritablement de correspondance entre l'indice de fertilité du peuplement forestier et la description du milieu très hétérogène, dans le cas de la brèche.

En conclusion, pour le gestionnaire forestier, l'unité géo-pédologique de la brèche a mal été appréhendée par le protocole que nous avons retenu pour étudier les liaisons entre le milieu et la production ; mais dans tout les cas, cette unité très réduite ne peut être prise en considération en tant que telle, lors d'un aménagement.

CALCAIRES MARNEUX

Hauterivien

Sous cette dénomination sont désignés "des calcaires possédant de l'argile ou interstratifiés avec de la marne" (DELPECH R., DUMÉ G. et GALMICHE P., 1985) ; ils se situent sur le versant nord du Ventoux à toutes les altitudes et correspondent principalement à l'étage de l'Hauterivien (4 relevés sur les 5 effectués).

SITUATION

- * Cette unité géo-pédologique se retrouve depuis 600 m d'altitude jusqu'à 1000 m, et correspond aux alternances de bancs calcaires et de lits marneux.
- * Les pentes moyennes ou fortes sont sensibles à l'érosion, ce qui explique l'affleurement de la roche.

ROCHE

- * Lithologie : depuis le Berriasien jusqu'à l'Hauterivien, des séries de calcaire marneux sont identifiées ; il s'agit d'intercalations marneuses ou marno-calcaires plus ou moins régulières et épaisses dans des bancs calcaires. La composition de ces "niveaux marneux" évolue suivant leur faune et leur association avec le calcaire.
- * Altération et Fissuration : cette formation des calcaires marneux subit une altération et une fissuration différente, si on considère les lits marneux ou les bancs calcaires.
 - ♦ les lits marneux perdent sous l'altération leur structure en plaquette et sur place fournissent au profil de l'argile et des limons ;
 - ♦ les bancs calcaires sont soumis à la fissuration et à l'altération, in situ.

MATÉRIAU - SOL

Le matériau qui surmonte ces calcaires marneux est une **rendzine colluviale mince**, assez compacte, à tendance argileuse. Les horizons humifères sont épais, ce qui indique une pédogénèse ralentie.

- * Nature : colluvium mince au-dessus de la roche, assez comparable dans son origine à celui des "calcaires gréseux".
- * Épaisseur : inférieure à 50 cm.
- * Texture et Pierrosité :
 - ♦ A1 : de texture limoneuse à limono-argileuse, cet horizon est assez carbonaté ; le calcaire actif atteint 7,08 %, et les éléments grossiers représentent 30 % ;
 - ♦ C : horizon calcaire altéré sur place présentant de fins lits marneux. Il surmonte la roche proprement dite, qui est parfois visible.
- * Origine : le colluvium de ces calcaires marneux présente la même origine que les autres colluvium minces déjà décrits ; il s'agit d'éléments grossiers mélangés à des éléments fins, emportés dans la pente, qui glisseront et s'accumuleront diversement en fonction de la topographie.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*1) Données

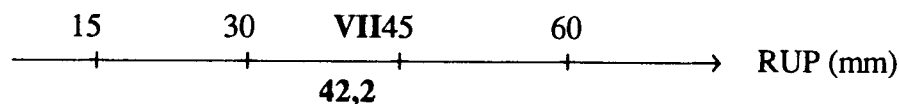
* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

Relevés	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	A1	C
V3	18,32	32,00	8,06	18,24	44	57
V9	6,39	5,84	3,32	4,55	52	78
V14	18,79	13,73	7,73	10,71	62	78
V24	29,50	33,53	14,75	23,81	50	71
V38	2,36	29,98	1,56	23,38	66	78
F-ratio*	8,037	5,06	6,503	4,168		
moyenne écart-type	15,07 4,85	23,02 5,57	7,08 2,29	16,14 3,74		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	pente	RUP	caiBC	calmar	epai1	Texture	
						A1	C
V3	63	34,0	50	1	1	LA	SL
V9	55	51,6	30	1	1	L	AL
V14	41	37,6	30	1	1	L	LS
V24	50	48,7	20	1	1	AL	LS
V38	64	39,3	30	1	1	LSA	LS

2) Remarques

Dans ces "calcaires marneux" du versant nord du Ventoux comme pour l'ensemble des unités géo-pédologiques sur colluvium mince, la **réserve utile** demeure faible, puisqu'elle est fonction de la **profondeur du profil pédologique** (< 50 cm), des **éléments grossiers** (30 à 40 %) et de la **texture** à tendance limono-sableuse. Ce milieu sec est encore appauvri par un **taux de calcaire actif** assez conséquent dans les horizons "A1" et "C", qui totalisent respectivement 7 % et 16 % ; soit un taux de calcaire actif légèrement supérieur à ceux observés dans les unités géo-pédologiques précédentes, qualifiées de "colluvium mince < 50 cm" et une texture un peu moins fine. Ces deux paramètres "réserve utile" et "calcaire actif" permettent à eux seuls ou presque, d'expliquer la hauteur des peuplements à 80 ans, qui n'excèdent pas 14,46 m ($\sigma = 1,07$ m). Cependant, après observation du profil pédologique, on constate qu'il peut y avoir ultérieurement une amélioration de ce milieu avec la poursuite de la pédogénèse ; le sol deviendra alors moins carbonaté et plus argileux.

EBOULIS VIFS ET CONES TORRENTIELS

Le versant nord du Ventoux, il y a un siècle était entièrement déboisé, offrant des versants abrupts largement ouverts à l'érosion lors des orages du printemps et de l'automne. Des éléments grossiers arrachés au sommet étaient emportés dans la pente ; ils venaient s'accumuler dans certaines zones à topographie favorable ou bien ils étaient emportés plus avant.

Les "éboulis vifs" et "cônes torrentiels" constituent deux types de situation d'accumulation pour les éléments grossiers. Ils se différencient suivant la pente, qui est plus forte (70 %) pour les éboulis vifs que pour les cônes torrentiels (20 %).

SITUATION

- * Les "éboulis" se trouvent préférentiellement vers le sommet du versant nord du Ventoux et ils profitent de situations topographiques favorables à l'accumulation d'éléments grossiers. Alors que le "cône torrentiel" correspond au lit du torrent et à des situations moins accidentées.
- * Les pentes sont très importantes pour les éboulis vifs ; alors qu'elles sont réduites pour les cônes torrentiels.

ROCHE

- * Lithologie : non visible dans les relevés effectués ; il doit s'agir de calcaires-marneux de l'Hauterivien, qui sont sans relation avec le matériau du dessus.

MATÉRIAU - SOL

Il est difficile de parler de sol pour ces unités géo-pédologiques, qui sont en cours de pédogénèse, sans avoir atteint un véritable sol. Dans tous les cas, on observe un premier niveau constitué exclusivement d'éléments grossiers, qui surmonte des horizons sableux à forte pierrosité.

- * Nature : ce sol peut être qualifié de lithosol.
- * Épaisseur : assez important, moins d'un mètre.
- * Texture et Pierrosité :
 - ◆ Eboulis : 15 à 20 cm d'éléments grossiers : le pierrier proprement dit (apport récent) ;
 - ◆ A1 : de texture sableuse à sablo-limoneuse, cet horizon d'environ 15 cm, présente une structure particulière avec cependant quelques grumeaux ;
 - ◆ C : de texture sableuse et d'épaisseur assez conséquente, cet horizon a une structure particulière.
- * Origine : des éléments grossiers sont régulièrement arrachés à la falaise urgonienne et viennent s'accumuler dans certain talweg à forte pente, peu boisé.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*1) Données

* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

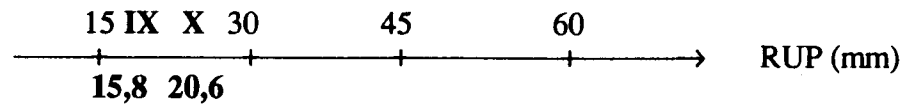
Relevés	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	A1	C
Eboulis						
V11	51,83	55,27	21,77	21,00	42	38
V13	-	40,78	-	25,28	-	62
V27	-	40,44	-	20,22	-	50
V44	-	-	-	-	-	-
Cône torrentiel						
V19	41,91	45,68	19,28	23,75	73	75
F-ratio*	8,04	5,06	6,50	4,17		
Eboulis moyenne écart-type	51,83 0	45,50 4,89	21,77 0	22,17 1,57		
Cône torrentiel moyenne écart-type	41,91 0	45,68 0	19,28 0	23,75 0		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	pente	RUP	caiBC	P<A	eboulis	epail	Texture	
							A1	C
V11	72	8,1	30	0	1	1	S	S
V13	65	14,6	40	0	1	1	SL	S
V27	75	11,9	50	0	1	1	S	S
V44	68	28,4	50	0	1	1	LS	SL
V19	14	20,6	70	1	1	1	LS	SL

2) Remarques



La réserve utile de ces situations est particulièrement mauvaise à cause de la texture sableuse, très filtrante qui ne permet pas la rétention de l'eau, à cause de la quantité trop élevée en éléments grossiers (100 % en surface, puis 60 % au niveau de "A1" et "C") et à cause de la pente particulièrement forte, qui participe au rajeunissement continu du versant et retarde la pédogénèse. Le taux de calcaire actif est très élevé dans ces situations (23 %) ; ce qui inhibe l'absorption notamment du fer et du manganèse, et provoque sur les arbres des chloroses. Une teneur en calcaire actif élevée, ajoutée à une réserve utile très faible, font que l'on ne peut pas parler d'un véritable peuplement, mais plutôt d'arbres plantés afin de retenir l'éboulis et maîtriser le milieu, lors des orages violents d'automne et de printemps. A 80 ans, le *Pin noir* d'Autriche atteint 9 à 10 m, dans cette unité géo-pédologique des "éboulis" très défavorisée ; alors que sur le "cône torrentiel", on peut espérer jusqu'à 15 m, grâce à une pente plus réduite, le drainage étant amélioré et la réserve utile aussi.

CALCAIRES DURS DU PLATEAU

Jurassique supérieur Portlandien

La barre Tithonique constitue le trait morphologique et structural dominant dans le paysage. La falaise atteint dans le massif étudié 50 à 80 m.

SITUATION

- * Situation de plateau au-dessus de la barre Tithonique, autour de 1100 m d'altitude.
- * Les pentes sont faibles, généralement inférieures à 20 %. La topographie stationnelle est généralement favorable, on peut en déduire un bilan hydrique soit positif, soit équilibré.
- * L'exposition varie du nord au nord-est.

ROCHE

- * Lithologie : bancs de calcaires durs, bréchiformes massifs et épais ; il s'agit de calcaires fins pélagiques, composés d'Ammonites, de Calpionnelles et de Brachiopodes.
- * Altération et Fissuration : les bancs calcaires durs sont cassés, fragmentés et gélifractés ; dans un premier temps la fissuration, d'origine mécanique et chimique, s'opère sur ces bancs calcaires, ensuite l'altération du calcaire s'exerce préférentiellement dans les fissures. Sur ce type de station, dit "karst couvert", la fissuration du calcaire n'est pas prise en considération en terme de réserve utile ; bien qu'elle mobilise d'importantes quantités de sol, qui sont toujours prospectées par les racines, et qui profitent aux peuplements forestiers.

MATÉRIAU - SOL

Sol de type **humocalcaire brunifié** (effervescence) ou **humocalcique brunifié** (très faible effervescence). De teinte chocolat, il renferme un taux très élevé en matière organique. L'humus assez développé comporte un "L", un "F" (4 cm environ), et un "H" réduit et éparé. Ce type d'humus est un **moder calcique ou calcaire**.

- * Nature : sol constitué sur place, il présente un fort taux d'argile de décarbonatation.
- * Épaisseur : réduite inférieure à 50 cm.
- * Texture et Pierrosité :
 - ♦ A_{1h} : de texture limono-argileuse, la présence de cet argile de décarbonatation est favorable au *Pin noir*, puisque il annule l'effet nocif du calcaire actif pour la croissance des arbres. De plus, il faut noter un taux de calcaire actif peu élevé dans ces situations (environ 17,1 % de calcaire total et 6,1 % de calcaire actif) ; où les éléments grossiers y sont abondants environ 50 % ;
 - ♦ C : horizon dominé par la présence des éléments grossiers annonçant la roche (80 %). La terre fine entre les bocs, présente un taux élevé d'argile ; ainsi, la fraction "argile+limon" dans le relevé "D31" représente 68,5 %, ce pourcentage montre que l'horizon est peu marqué par le calcaire actif.

- * Origine : l'altération sur place de la roche et l'accumulation irrégulière dans le karst de la portion silicatée conduit à ce type de sol composé d'argile de décarbonatation et pauvre en calcaire actif.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU PIN NOIR

1) Données

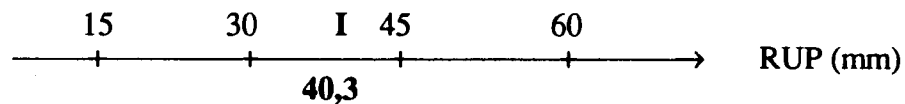
* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

Relevés	Pourcentage en calcaire total		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	Al _h	C	Al _h	C	C	Al _h	C
D14	-	-	-	-	-	-	-
D15	32,6	-	17,72	-	-	58	-
D16	10,89	-	2,67	-	-	70	-
D17	14,59	-	3,50	-	-	76	-
D31	10,27	13,15	0,39	3,55	68,45	67	72
F-ratio*	5,79	10,80	6,19	5,22	6,06		
moyenne	17,11	13,15	6,07	3,55	68,45		
écart-type	5,03	0	3,94	0	0		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	alti	RUP	P<A	pier1	pier23	Vconc	Vrect	caldur	Texture	
									Al _h	C
D14	1160	45,0	0	0	0	0	0	1	LA	-
D15	1160	30,0	0	1	0	0	0	1	LA	-
D16	1140	34,2	1	1	0	1	0	1	AL	-
D17	1140	34,2	0	0	0	0	1	1	AL	-
D31	1130	36,8	0	1	0	0	1	0	LA	AL
M8	1000	30	0	1	0	0	1	1	L	-
M9	1000	72	0	0	1	0	1	1	La	La

2) Remarques

La réserve utile est faible, or la hauteur du peuplement est élevée ; on peut en conclure que la R.U., où plus précisément la profondeur du sol gérable par les racines, est mal estimée dans ces "calcaires durs du plateau" fissurés. Les arbres exploitent les fissures et donc une profondeur de sol supérieure, à celle prise en compte dans le calcul de la R.U.. Comme nous le verrons dans le chapitre des résultats, cet écart nécessite une correction dans le modèle de croissance exprimant H_{80} , en fonction de quelques éléments simples du milieu ; ainsi, le facteur "calcaire dur" intervient dans cette expression accompagné d'un coefficient correcteur positif de l'ordre du mètre. Par ailleurs, on observe que le calcaire actif y est peu abondant, sauf pour le relevé "D5". L'analyse de la texture des différents horizons pédologiques, prouve l'abondance du limon et de l'argile de décarbonatation, qui permettent au *Pin noir* d'Autriche d'être plus tolérant au calcaire actif et de supporter un degré de saturation élevé en ion calcium. L'effet toxique du calcaire actif dans ces sols n'affecte pas l'absorption en fer ou en manganèse, de cette essence. En conséquence, l'indice de fertilité appartient aux classes de fertilité les meilleures, soit une valeur moyenne de 21 m pour H_{80} ($\sigma = 0,95$ m), dans cette unité des "calcaires durs du plateau".

BANCS DE CALCAIRES DURS ALTERNANT AVEC DES LITS MARNEUX TRES ETROITS

Etage du Séquanien et Kimméridgien supérieur

Situés en-dessous du Tithonique, ces bancs calcaires durs alternent avec de minces lits marneux, de moins en moins développés lorsque l'on atteint le Tithonique. Ce faciès forme la base de la falaise Tithonique. Dans le cas particulier de la forêt domaniale de Solaure, ce faciès est très localisé et peu étendu.

SITUATION

- * Situation de haut de versant à la base de la falaise Tithonique, altitude proche de 1000 m.
- * Les pentes avoisinent les 50 %.
- * L'exposition est celle du versant de la forêt domaniale de Solaure, sud, sud-est.

ROCHE

- * Lithologie: calcaires fins, gris en bancs massifs alternant avec quelques lits marno-calcaires. Pendage inverse.
- * Altération et Fissuration: bancs calcaires fracturés sous l'action conjuguée de l'altération et de la fissuration. Comme pour l'unité géo-pédologique précédemment décrite, les fissures profitent aux peuplements de *Pin noir*, mais ce volume de sol n'est pas pris en considération dans la description du profil pédologique et donc dans le calcul de la R.U.

MATÉRIAU - SOL

Le sol est une **rendzine colluviale un peu brunifiée** comportant un humus mince et simplifié: "L" (aiguilles mélangées à la pelouse) et "F" épars, limité et interrompu. Ce type d'humus est un **mull**.

- * Nature: colluvium mince recouvrant des bancs de calcaires durs, en cours d'altération, qui alternent avec de fins lits marneux.
- * Épaisseur: réduite inférieure à 50 cm.
- * Texture et Pierrosité:
 - ◆ A1 : de texture à dominante limoneuse, les agrégats arrondis sont assez gros et se mélangent à 50 % d'éléments grossiers ; le taux de calcaire actif est moyen ou plutôt assez faible ;
 - ◆ C : niveau d'altération de la roche, constitué par des blocs de calcaires (50 % voire 80 %) enrobés par de la terre fine. Cet horizon présente une texture limono-argileuse. La structure grumeleuse se compose d'agrégats plus petits que dans l'horizon précédent.
- * Origine: colluvium constitué d'éléments calcaires arrachés à la falaise Tithonique et mélangés à de la terre fine, ayant coulé de long du versant. A cause des pentes assez fortes ce colluvium est entraîné plus bas dans la pente, il est donc d'épaisseur réduite sur cette unité géo-pédologique.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU PIN NOIR

1) Données

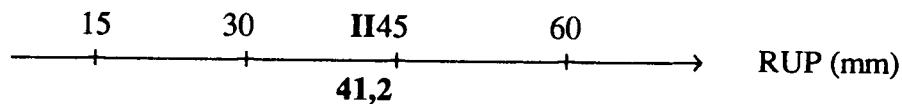
* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

Relevés	Pourcentage en calcaire total		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C		A1	C
D29	17,67	-	3,56	-	-	46	-
D30	17,65	33,29	7,43	10,22	62,78	38	73
D33	28,15	36,16	7,75	17,01	45,99	77	63
F-ratio*	5,79	10,80	6,19	5,22	6,06		
moyenne	21,16	34,73	6,25	13,62	54,4		
écart-type	3,50	1,44	1,35	3,40	8,4		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	alti	RUP	Sud	pier23	Vrect	Vconv	caldur	Texture	
								A1	C
D29	1110	36,0	0	0	1	0	0	La	AL
D30	1120	47,9	1	0	0	1	0	L	AL
D33	930	55,8	1	0	0	0	1	LS	La
M6	950	25	0	1	1	0	1	La	-

2) Remarques

La réserve utile reste aussi faible pour ces "bancs calcaire durs" que pour les "calcaires durs du plateau". De plus, dans cette unité géo-pédologique la pente est plus marquée et la topographie stationnelle est défavorable (pertes en eau supérieures aux apports). Enfin, le calcaire actif présente un taux plus conséquent (14 % de calcaire actif dans l'horizon "C") et la texture devient limoneuse (limono-argileuse ou limono-sableuse). Par suite, l'ensemble de ces causes entraîne une diminution de la hauteur des arbres d'environ 3 m par rapport aux "calcaires durs du plateau". L'indice de fertilité H_{80} prend une valeur moyenne de 17 m pour un écart-type : $\sigma = 0,43$ m.

COLLUVIUM EPAIS SUR GREZE

Etage du Séquanien, Kimméridgien et Oxfordien supérieur

SITUATION

- * Situation de versant, étagé entre 700 et 1000 m d'altitude.
- * Les pentes mesurées sont assez diversifiées de 15 à 60 % ; mais on note que dans le cas des pentes les plus fortes, la topographie est plutôt favorable : versant concave, accompagné de pertes en eau inférieures aux apports. Alors que pour les pentes faibles l'éventail des topographies rencontrées est plus large.
- * L'exposition est celle de la forêt domaniale de Solaure, sud à sud-est.

ROCHE II (non visible)

- * Lithologie : calcaire marneux : ce niveau n'a pu être observé sur aucune des stations retenues, puisque la grèze est le véritable obstacle à la pénétration de racines et que ces niveaux "calcaires marneux" lui sont sous-jacents. Les calcaires marneux n'interviennent pas dans la pédogénèse ; la roche ou plutôt la formation superficielle participant à la pédogénèse est donc la grèze (Roche I).

ROCHE I (Pas toujours identifiée dans le cas présent)

- * Lithologie : la grèze, si l'on considère que ce niveau cimenté est un obstacle à la pénétration des racines ; il s'agit d'un ancien matériau induré.
- * Altération et Fissuration : altération sous l'action de l'eau (action chimique) et sous l'action des grosses racines (action mécanique), dans la partie supérieure de la grèze. Ainsi, le ciment se désagrège et les éléments grossiers devenus détachables sont repris dans le colluvium.

MATÉRIAU - SOL

Le sol est un **sol brun calcaire** colluvial (très caillouteux). L'humus est un mull composé d'un "L" irrégulier et d'un "F" interrompu voir mélangé au A1.

- * Nature : colluvium épais : mélange d'éléments grossiers et de terre fine, sur grèze compactée pas toujours visible, à cause de la profondeur du profil pédologique.
- * Épaisseur : relativement profond, autour de 80 cm.
- * Texture et Pierrosité :
 - ◆ A1 : environ 15 cm d'épaisseur, de texture limoneuse à tendance limono-argileuse, cet horizon est marqué par la présence d'argile de décarbonatation pour réguler le calcaire actif, qui est très peu abondant dans cet horizon. L'horizon dispose de 30 % d'éléments grossiers ;
 - ◆ A3 : de texture limono-argileuse à tendance argilo-limoneuse, cet horizon est encore chargé en matière organique, ce qui justifie son appartenance aux horizons "A" ; c'est en fait un horizon de transition qui contient un taux élevé d'éléments grossiers autour de 45 %, peu de calcaire actif et de l'argile de décarbonatation ;
 - ◆ C : correspond au niveau de la grèze en cours d'altération et n'est pas toujours visible.

- * Origine : coulée récente le long de la pente, alimentée par des éléments grossiers arrachés à la falaise calcaire ou bien provenant des niveaux calcaréo-marneux sous-jacents. Ce colluvium s'est accumulé à la faveur d'une topographie favorable : talweg, versant concave, qui explique les épaisseurs importantes de colluvium dans cette unité géo-pédologique.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU PIN NOIR

1) Données

* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

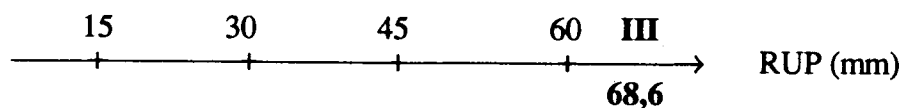
Relevés	Pourcentage en calcaire total		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	A3	A1	A3	A3	A1	A3
D6	5,34	10,68	0,36	1,15	45,85	26	47
D9	8,63	9,04	1,52	1,52	84,48	64	86
D10	10,48	15,82	2,63	3,20	74,80	64	78
D12	5,34	13,97	0,85	3,43	76,57	52	80
D28	3,08	9,04	0,27	2,49	81,51	36	84
D32	8,01	22,81	2,30	5,17	56,83	54	62
D38	3,16	5,13	1,62	3,66	43,34	36	47
F-ratio*	5,79	10,80	6,19	5,22	6,06		
moyenne	6,29	12,36	1,36	2,95	66,20		
écart-type	1,07	2,19	0,35	0,52	6,5		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	alti	RUP	Sud	pier1	pier23	Vconc	Vrect	Vconv	P<A	grèze	Texture	
											A1	C
D6	710	74,4	0	1	0	0	1	0	0	1	LA	LA
D9	780	65,4	1	0	0	0	0	1	0	0	L	AL
D10	830	95,1	1	1	0	0	0	1	0	1	LA	AL
D12	820	79	1	1	0	1	0	0	1	1	L	AL
D28	1030	70,3	0	1	0	1	0	0	0	1	LA	AL
D32	960	69,4	1	0	0	1	0	0	0	1	L	LA
D38	810	62,3	0	1	0	1	0	0	1	1	AL	AL
M1	1030	52,9	0	0	1	0	1	0	0	0	SL	SL
M2	980	48,8	0	0	1	0	0	1	0	0	LS	LS

2) Remarques



La **réserve utile** n'est que moyenne, si on considère la classification proposée par FRANC A., 1989, alors qu'elle est la meilleure rencontrée sur l'ensemble des unités géo-pédologiques du Diois. La réserve utile repose sur une grande incertitude en ce qui concerne la profondeur du profil, qui dans la plupart des cas a été estimée et non mesurée (le maximum envisagé pour l'épaisseur du colluvium étant 80 cm). Par ailleurs, le **taux de calcaire actif** de cette unité géo-pédologique est le plus faible taux enregistré dans la forêt domaniale de Solaure. Les huit relevés, qui illustrent cette unité des "**colluvium épais sur grèze**", présentent des valeurs en calcaire actif du même ordre de grandeur. Enfin, il faut noter la présence d'un fort taux d'argile dans les différents horizons. Cette texture fine (argileuse et argilo-limoneuse) permet une meilleure rétention de l'eau et masque tout effet du calcaire actif. Ces éléments favorables contribuent à une production en hauteur correcte du *Pin noir* d'Autriche de l'ordre de 19,2 m ($\sigma = 0,42$ m).

COLLUVIUM MINCE SUR GREZE

Etage du Séquanien, Kimméridgien et Oxfordien supérieur

SITUATION

- * Situation de versant, étagé entre 700 et 1000 m d'altitude.
- * Les pentes sont plutôt fortes, elles avoisinent les 40 % ; ce caractère défavorable est complété par une topographie difficile (forme convexe, croupe, sommet arrondi) ou peu favorable (forme rectiligne), qui engendre un bilan hydrique négatif.
- * L'exposition des ces situations écologiques est à tendance sud.

ROCHE II

- * Lithologie : calcaire marneux (identique à la ROCHE II observée dans l'unité géo-pédologique III).

ROCHE I

- * Lithologie : grèze (identique à la ROCHE I observée dans l'unité géo-pédologique III).

MATÉRIAU - SOL

Le sol est une **rendzine colluviale**, qui peut présenter un début de brunification, dont l'épaisseur est toujours réduite. Pour cette rendzine colluviale, où l'on a fait une distinction dans l'horizon "A1" entre deux sous-horizons "A11" et "A12", les niveaux "L" et "F" sont toujours présents, mais assez irréguliers.

- * Nature : colluvium mince riche en éléments grossiers, reposant sur la grèze.
- * Épaisseur : inférieure à 50 cm, par suite la grèze sous-jacente a été observée dans les différents relevés.
- * Texture et Pierrosité :
 - ♦ A1 : environ 20 cm, cet horizon se décompose en deux sous-horizons "A11" et "A12". La texture limoneuse de "A11" devient limono-argileuse dans "A12", il s'agit d'argile de décarbonatation favorable au *Pin noir*, qui régule un taux de calcaire actif élevé (23 % de calcaire total, pour 13 % de calcaire actif). La pierrosité élevée varie de 30 à 50 % ;
 - ♦ C : niveau d'altération de la grèze, sous l'action mécanique des racines et l'action chimique de l'eau ; la terre de cet horizon comprend de l'argile de décarbonatation, qui permet de réguler la teneur élevée en calcaire actif (14 %). Cet horizon présente une bonne proportion d'éléments grossiers 50 %.
- * Origine : d'origine identique, les colluvium minces ou épais se composent de coulées récentes ayant glissé dans la pente, composées des éléments grossiers arrachés à la roche en place, emballés dans la terre fine. Cette coulée est plutôt de faible épaisseur car les pentes fortes combinées à une topographie peu favorable (versant convexe, croupe, sommet arrondi) ne permettent pas une accumulation du colluvium.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*1) Données

* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

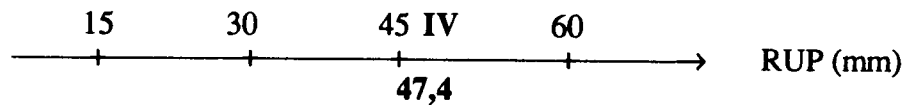
Relevés	Pourcentage en calcaire total		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	C	A1	C
D7	20,96	26,71	6,27	9,64	52,36	74	62
D8	19,52	20,14	7,65	8,68	57,32	64	66
D11	30,40	24,08	18,55	3,80	42,20	48	46
D13	16,23	19,32	4,12	6,80	61,20	50	68
D24	21,31	30,79	20,30	20,08	29,92	50	50
D25	33,45	49,31	23,96	28,15	31,85	56	60
D26	24,66	32,88	8,40	14,24	47,76	44	62
D27	18,31	42,33	14,78	19,53	44,47	52	64
F-ratio*	5,79	10,80	6,19	5,22	6,06		
moyenne	23,11	30,70	13	13,87	45,88		
écart-type	2,13	3,75	2,61	2,90	3,96		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	alti	RUP	Sud	pier1	pier23	Vconc	Vrect	Vconv	P<A	grèze	Texture	
											A1	C
D7	760	51,6	1	0	0	1	0	0	1	1	SL	La
D8	750	50,4	0	0	1	0	0	0	0	0	La	La
D11	890	38,0	0	0	0	0	0	0	0	1	LS	LS
D13	850	50,8	0	0	0	0	1	0	0	1	L	AL
D24	880	49,8	0	0	0	0	1	0	0	1	La	La
D25	880	59,8	1	0	0	0	0	1	0	1	La	La
D26	890	26,4	1	1	0	0	1	0	0	1	L	Eq.
D27	940	52,4	1	1	0	0	0	0	0	1	La	La

2) Remarques



La **réserve utile** reste faible. Elle reflète le manque de profondeur de ces sols, limitée à 50 cm ; au-delà la grèze constitue un véritable obstacle à la pénétration des racines. Cette réserve utile est assez comparable à celle calculée dans l'unité des calcaires durs alternant avec les lits marneux étroits. Le **calcaire actif** dans ces "colluvium minces sur grèze" est important. Pour ces colluvium peu épais il semble que, l'altération des parties supérieures de la grèze, réintroduise dans le profil pédologique du calcaire actif, qui était inclus dans le ciment situé entre les éléments grossiers. Si on ajoute à cela un pourcentage en **éléments grossiers** assez fort de l'ordre de 30 à 50 %, une **texture** à dominante limoneuse et une **profondeur de profil pédologique** toujours réduite (≈ 50 cm), l'indice de fertilité s'en trouve affecté, de telle sorte que $H_{80} = 14,62$ m ($\sigma = 0,37$ m).

MARNES DE L'ARGOVIEN

Etage de l'Oxfordien moyen

Ce faciès marneux apparaît à la base du faciès marno-calcaire du Berriasien et du Kimméridgien, il constitue le prolongement de ces marno-calcaires sous la forme d'une lithologie particulière : il s'agit de **marnes grises** (forme douce), qui alternent régulièrement avec des **bancs calcaréo-marneux** (forme plus marquée) à patine brunâtre, dont le nombre et l'épaisseur augmente vers le haut de la série. Au total, cette série atteint de 100 à 150 m d'épaisseur.

SITUATION

- * Situation principalement de bas de versant à la charnière entre le Jurassique supérieur calcaire et les Terres noires. Cette série peut se retrouver à des altitudes assez variables à cause d'un accident tectonique, ainsi généralement ces situations se rencontrent vers 800 m, mais à Chatillon-en-Diois elles correspondent à des altitudes autour 1000 m.
- * Les pentes sont assez fortes dans l'ensemble. Elles sont plus marquées dans la partie supérieure de cet étage géologique, qui correspond à une dominante bancs calcaréo-marneux, que dans la partie inférieure de l'étage, qui correspond aux marnes.
- * Exposition variable.

ROCHE

- * Lithologie : marnes grises de l'Argovien, alternant avec des bancs calcaréo-marneux à patine brunâtre.
- * Altération et Fissuration : marnes pouvant s'altérer grâce à la présence de la végétation et du *Pin noir*, par une action mécanique mais surtout chimique et biologique (action de l'eau et de la microfaune du sol). Fissuration et altération des bancs calcaréo-marneux, production d'éléments grossiers repris dans le profil.

MATÉRIAU - SOL

Le sol est un sol initialement **régosolique** qui peut évoluer vers une **rendzine grise** ; il se caractérise par la marne grise présentant une forte tendance calcaire, qui dissimule la couleur du peu de matière organique présente, dans ce type de sol. La pédogénèse y est très lente et résulte du bilan érosion - végétation.

- * Nature : marne grise en place subissant une altération plus ou moins importante et profonde ; présence de plaquettes de marnes et d'éléments grossiers calcaires brunâtres provenant des bancs calcaires de l'Argovien.
- * Epaisseur : 20 à 25 cm d'altération, au total moins de 50 cm de sol disponible pour les racines avant d'atteindre 100 % de plaquettes de marnes ou les bancs calcaréo-marneux.
- * Texture et Pierrosité :
 - ♦ A1 : (parfois cet horizon repose directement sur la roche), de texture limono-sableuse, cet horizon comporte des agrégats arrondis de taille variable, il comporte peu d'éléments grossiers (moins de 10 %) et présente un fort taux de calcaire actif (31,5 % calcaire total, 24,6 % calcaire actif) ;

- ♦ C : ce niveau d'altération de la marne n'est pas toujours présent, il se compose d'agrégats, de plaquettes de marnes plus ou moins altérées et bien souvent d'éléments grossiers calcaires provenant des bancs calcaires de l'Argovien (20 à 30 %). Comme l'horizon précédent ce niveau est marqué par la présence d'un fort taux de calcaire actif (58 % de calcaire total, 39 % de calcaire actif).
- * Origine : avant l'introduction du peuplement forestier, ces pentes fortes (autour de 60 %) étaient régulièrement rajeunies par une érosion intense ; par suite, aucun sol ne pouvait se développer. L'introduction du *Pin noir* d'Autriche a permis d'assurer une certaine protection du sol contre l'érosion et elle a contribué, avec l'apparition d'une strate herbacée et arbustive, à l'altération et à l'élaboration sur place d'un sol assez réduit. De plus, des éléments grossiers, provenant de l'altération des bancs calcaréo-marneux sous-jacents, sont repris dans le profil pédologique.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*

1) Données

* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

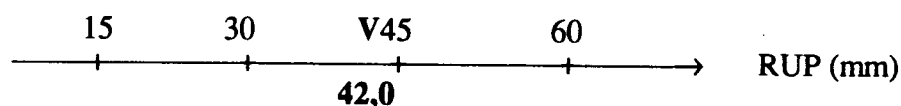
Relevés	Pourcentage en calcaire total		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	C	A1	C
D35	26,05	-	17,73	-	-	40	-
D39	34,86	52,19	18,20	34,0	39,99	42	74
D40	33,7	64,11	38,02	43,57	28,43	64	72
F-ratio*	5,79	10,80	6,19	5,22	6,06		
moyenne	31,54	58,15	24,65	38,79	34,21		
écart-type	2,76	5,96	6,69	4,79	5,79		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	alti	RUP	Sud	Vconv	Texture	
					A1	C
D35	730	31,0	1	0	LS	-
D39	800	65,9	0	0	LS	LS
D40	810	59,2	0	1	LS	LS
M4	1200	34,7	0	0	Ls	L
M5	1040	28,1	0	0	L	LS
M7	1020	33,3	0	0	LS	LS

2) Remarques



La réserve utile faible dépend de la progression en profondeur de l'altération de la marne ; cette altération est liée principalement à l'âge du peuplement forestier et à la densité de la végétation. La réserve utile des ces "marnes des l'Argovien" s'explique principalement par la texture : limono-sableuse, peu cohérente et instable et par la profondeur de sol : trop réduite. Le calcaire actif de cette unité géo-pédologique présente le taux le plus élevé, si on considère l'ensemble des unités géo-pédologiques du Diois. Cet excès de calcaire actif caractérise ces types de rendzines grises. Il s'en suit que cette unité des "marnes de l'Argovien" correspond aux fertilités les plus faibles. Le cas extrême étant le relevé "D35", qui présente un taux de calcaire actif fort en "A1", doublé d'une texture filtrante, d'une profondeur de sol très faible (20 cm), en conséquence le peuplement atteint 7,43 m à 80 ans, et il est marqué par des signes de chlorose. Plus généralement, cette pédologie défavorable affecte l'indice de fertilité, ainsi $H_{80} = 12,70 \text{ m}$ ($\sigma = 1,2 \text{ m}$).

TERRES NOIRES

Oxfordien inférieur, Callovien supérieur

Le faciès des "Terres noires", qui s'étend sur l'ensemble de la fosse Vocontienne entre Ventoux et Vercors, correspond à une subsidence rapide compensée par une importante sédimentation argileuse. Cette puissante formation, dont l'épaisseur peut varier de 1500 m jusqu'à 12 Km à l'est de Die, se compose uniquement de marnes, soit argileuses et fines, soit plus ou moins schisteuses, soit encore accompagnées par quelques modules de calcaires. Vers le haut de l'étage, le faciès "Terres noires" peut aller jusqu'à englober la base de l'Argovien.

SITUATION

- * Situation de bas de versant ; ces "Terres noires" sont très caractéristiques de la région de par leur étendue spatiale et leur topographie particulière dite en "dos d'éléphant". Cette appellation illustre le fait que l'érosion permanente, due aux eaux de ruissellement, creuse ces marnes de ravins. En situation particulière, ces "Terres noires" constituent des "collines autonomes" marneuses, qui auront une évolution différente des marnes situées à la base d'un versant.
- * Les pentes sont dans l'ensemble assez fortes (50 % et plus). Le critère de pente, qui accompagne une topographie particulière et un certain état de la pédogénèse, est dans cette unité géo-pédologique un facteur écologique majeur pour déterminer l'indice de fertilité. Ainsi, les situations exceptionnelles de faible pente (20 à 30 %), relevés "D2", "G2", se rapportent à des hauteurs à 80 ans de 18 à 19 m ; à l'inverse, pour une pente de 80 %, relevé "G1", $H_{80} = 12,5$ m.
- * Exposition variable.

ROCHE

- * Lithologie : marnes noires dites "Terres noires" Oxfordien inférieur et Callovien supérieur sont friables, ou plus ou moins schisteuses localement.
- * Altération et Fissuration : désagrégation physique et structuration bio-pédologique apparaissent et progressent sous la végétation ; leur effet sous un vieux peuplement de *Pin noir* se fait sentir jusque vers 50 cm.

MATÉRIAU - SOL

Le sol est une **rendzine grise** à tendance noire. L'humus sur ces sols est généralement réduit à une couche de litière "L" (1 à 2 cm) et un niveau "F" peu marqué (1 cm et moins). La pédogénèse dans ce type de matériau est lente.

- * Nature : altération de la marne en place grâce au peuplement et à la végétation implantés depuis un siècle.
- * Epaisseur : réalisation d'un sol inférieur à 50 cm pour cette première génération de *Pin noir* d'Autriche ; il se décompose en 15 à 30 cm de marnes altérées et un horizon intermédiaire avant les plaquettes de marnes non modifiées.
- * Texture et Pierrosité :
 - ♦ A1 : texture limoneuse à tendance parfois sableuse. Apparition de quelques agrégats dans cet horizon, c'est le signe de la présence d'une faune et d'une pédogénèse en cours. L'altération de la marne a fonctionné sur 15 à 30 cm depuis l'installation du peuplement et cet horizon n'est pas trop affecté par la présence de calcaire actif ; en effet, les teneurs en calcaire actif sont

moyennes (autour de 5 %). Présence de 10 à 20 % d'éléments grossiers, qui sont des plaquettes de marnes ;

- ◆ C : horizon pas toujours représenté dans ces profils pédologiques ; de texture limoneuse, cet horizon est marqué par l'existence d'une quantité plus importante de plaquettes de marnes non altérées (30 à 70 %). Le taux de calcaire actif augmente par rapport à celui de l'horizon "A1" (15 %).

* Origine : comme pour les "marnes de l'Argovien", le sol est inexistant en l'absence de végétation, l'érosion par ruissellement de l'eau dans les ravins étant permanente. L'introduction du *Pin noir* d'Autriche, accompagné d'essences arbustives (type Cytise, Alisier blanc, Erable à feuille d'Obier, etc.) a contribué à l'élaboration du sol sur place à partir des marnes noires en place. Cette origine des sols est identique à celle des "marnes de l'Argovien".

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*

1) Données

* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

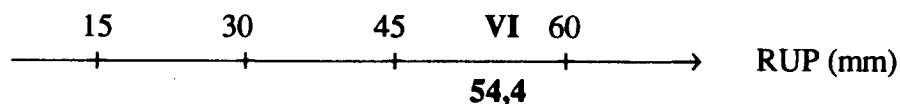
Relevés	Pourcentage en calcaire total		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	C	A1	C
D1	21,99	30,41	6,22	18,44	53,56	48	72
D2	13,15	17,26	5,19	12,47	56,52	43	69
D34	18,49	-	5,68	-	-	43	-
F-ratio*	5,79	10,80	6,19	5,22	6,06		
moyenne	17,88	23,84	5,70	15,45	55,04		
écart-type	2,57	6,58	0,3	2,99	1,48		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	alti	RUP	Sud	Vrect	Vconv	P<A	Texture	
							A1	C
D1	740	65,5	0	1	0	0	L	L
D2	720	63,6	0	0	0	1	L	L
D34	750	70,0	1	0	1	0	La	-
M3	1100	18,6	0	0	1	0	LS	LS

2) Remarques



La réserve utile de ces "Terres noires" est moyenne, soit plus favorable que celle enregistrée pour les relevés des "marnes de l'Argovien", ce qui s'explique notamment par une texture plus limoneuse, par des pentes plus réduites et par un taux de calcaire actif 2 à 3 fois plus faible. Cet ensemble de facteurs, une fois combinés, conduit à un indice de fertilité très variable de 12,5 à 19 m, à cette première génération de *Pin noir* d'Autriche. On peut supposer que la première génération a contribué à améliorer le milieu et que la génération suivante, même si elle doit être plantée, sera encore meilleure du point de vue de la croissance en hauteur des arbres, profitant d'un sol enfin constitué.

CONE TORRENTIEL-ÉBOULIS

Etage du Séquanien, Kimméridgien et Oxfordien supérieur

Ces milieux de bas de pente constituent les situations écologiques les plus difficiles en ce qui concerne la croissance du *Pin noir* d'Autriche ou de tout autre essence ; ils doivent être considérés comme les milieux les plus pauvres de l'ensemble du Diois. Il s'agit de situations extrêmes soit d'éboulis, soit de sols très compactés et "poussiéreux", affectés d'un fort taux de calcaire actif. La roche sous-jacente ne semble pas participer à l'élaboration de ce type pédologique, par contre les blocs et les pierres, qui se décrochent continuellement de la falaise, dominant ces situations, viennent s'accumuler sur les bas de pente et affectent ces milieux. Ces situations particulières sont donc très influencées par la pierrosité en surface, par le taux de calcaire actif, par la texture filtrante, par le pH à tendance basique, par la réserve utile faible, par la topographie bien souvent défavorable, etc.

SITUATION

- * Situation de bas de pente continuellement alimentée en éléments grossiers (blocs et pierres) arrachés à la falaise dominante ; altitude toujours faible 600 à 700 m.
- * Les pentes sont moyennes voire faibles et n'influencent pas défavorablement ces milieux.

ROCHE

- * Lithologie : calcaire marneux sous-jacent, qui n'a pas été observé dans ces situations de "Cône torrentiel-Eboulis", il ne semble pas qu'il participe au devenir de la station. Cette roche peut être considérée comme un socle recouvert par des apports ayant glissés dans la pente, apports qui viennent régulièrement s'y accumuler et doivent être constitués par des épaisseurs de matériaux assez conséquentes.

MATÉRIAU - SOL

Le sol est une **rendzine colluviale** marquée par des nuances de gris en fonction des profils et des horizons ("A1" ou "C") observés, (code Munsell : 10YR 6/). Les couches "L" et "F" sont bien représentés et paraissent subir une évolution fort lente, d'où une pédogénèse ralentie.

- * Nature : sorte de colluvium très mince, constitué d'éléments grossiers emballés dans une fraction fine filtrante et très chargée en calcaire actif. Des apports permanents en éléments grossiers provenant de la falaise, qui domine ces situations, complètent la fraction grossière du colluvium.
- * Épaisseur : réduite, autour de 30 cm voire moins.
- * Texture et Pierrosité :
 - ♦ A1 : toujours inférieur à 10 cm, constitué de 20 % d'éléments grossiers ; les agrégats y sont arrondis, plutôt petits et peu nombreux ; il s'agit d'un horizon limono-sableux ou sablo-limoneux, donc filtrant et marqué par un fort taux de calcaire actif (30 % de calcaire total et 20 % de calcaire actif). Par suite, la fraction "argile+limon" sans calcaire actif est faible de l'ordre de 25 % seulement ;

- ♦ **C** : la structure de cet horizon à tendance à disparaître pour laisser la place à une structure particulière ; il faut noter la présence de 30 à 50 % d'éléments grossiers mélangés à une fraction fine sableuse, très riche, en calcaire total (57 %) et en calcaire actif (30 %) ; cet horizon est filtrant et ne permet pas la constitution de réserves hydriques satisfaisantes. Il donne l'impression d'une "bouillie calcaire" de teinte gris clair, assez "poussièreuse".
- * **Origine** : il s'agit d'une coulée boueuse à éléments grossiers (blocs et pierres) arrachés à la falaise lors des violents orages du printemps ou de l'automne en région méditerranéenne. Ces formations glissent le long des versants et viennent s'accumuler sur les bas de pente en fonction d'une granulométrie décroissante. L'essentiel des éléments fins sont emportés et évacués par les cours d'eau, restent les éléments grossiers. A la faveur de chaque orage les sols sont arasés et réalimentés en éléments grossiers, d'où des milieux particulièrement pauvres ayant du mal à se constituer et à se stabiliser. Le sol de ces situations est généralement nappé par un "champ" de blocs et de pierres, qui couvrent près de 60 % de la surface de ces milieux ; cependant dans quelques cas, le taux de pierrosité chute autour de 30 % à cause d'une topographie favorable, qui sera évitée lors du passage du torrent de boue, d'où une situation meilleure.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*

1) *Données*

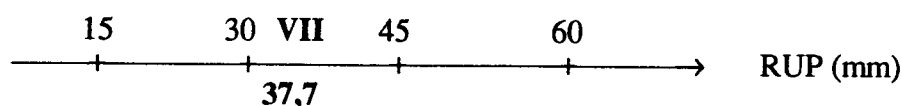
* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

Relevés	Pourcentage en calcaire total		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C		A1	C
D3	38,42	53,84	16,60	12,41	18,59	40	31
D4	27,63	-	28,50	-	-	57	-
D19	-	64,93	-	47,16	24,84	-	72
D20	-	53,84	-	24,70	26,30	-	51
D23	28,03	53,84	12,72	28,67	27,33	37	56
F-ratio*	5,79	10,80	6,19	5,22	6,06		
moyenne	31,36	56,61	19,27	28,34	24,26		
écart-type	3,53	2,77	4,75	7,2	1,96		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	alti	RUP	Sud	pier23	Vconv	P<A	Texture	
							A1	C
D3	725	47,6	0	0	0	0	L	L
D4	720	47,6	1	1	0	0	SL	L
D19	670	26,5	0	0	0	0	SL	SL
D20	680	29,5	0	0	0	1	LS	SL
D23	610	37,2	0	0	1	0	LS	SL

2) Remarques

La réserve utile est faible principalement à cause d'une **texture** filtrante où le sable devient l'élément dominant, mais aussi à cause d'une **profondeur** réduite des horizons (30 cm ou moins). Le calcul simple de la réserve utile pratiqué dans cette étude, a surestimé cette grandeur, car nous n'avons pas pris en compte le **calcaire actif**, qui correspond au taux le plus élevé du Diois. Ce sont des situations défavorables, voire très défavorables pour le *Pin noir* d'Autriche. L'indice de fertilité de ce peuplement à 80 ans est de 11,60 m pour un écart-type : $\sigma = 1,03$ m. Les cas les plus défavorables sont à associer à une **topographie** extrême (croupe, convexité du versant...), qui accentue l'effet négatif causé par le sol sur la croissance des arbres ; pour exemple : relevé "D19", "cône torrentiel-éboulis" avec près de 70 % de blocs et pierres en surface, situation de croupe, horizon "A1" réduit (5 cm), horizon "C" particulière, R.U. = 26,5 mm, $H_{80} = 7,96$ m.

CONE TORRENTIEL

Etage du Séquanien, Kimméridgien et Oxfordien supérieur

Ces situations en deçà de la falaise calcaire ou calcaréo-marneuse sont des situations d'exception plutôt favorables à la croissance du *Pin noir* d'Autriche. Il s'agit d'anciens "Cônes torrentiels" désormais évités par les torrents de boues provoqués lors des orages violents du printemps et de l'automne.

SITUATION

- * Situation de bas de versant à topographie plutôt favorable (versant concave) ou peu défavorable (versant rectiligne), entre 600 et 800 m d'altitude.
- * Les pentes n'excèdent pas les 30 % ; c'est-à-dire de faibles pentes non défavorables à la fertilité du milieu.
- * L'exposition dominante observée dans la forêt domaniale de Solaure est "est" ; cette caractéristique est propre à la forêt choisie.

ROCHE

- * Lithologie : calcaire-marneux qui ne semble pas influencer les niveaux supérieurs du profil pédologique. Aucune observation de la roche n'a été réalisée sur les seuls relevés de notre échantillon, la croissance des arbres ne dépend que des différents niveaux de dépôts dans le cône torrentiel.

MATÉRIAU - SOL

Le sol est une **rendzine colluviale** faiblement brunifiée, à tendance grise (code Munsell : 10YR 5/.), ce qui correspond à des nuances de gris moins nettes que dans le cas des "Cônes torrentiels-Eboulis". La pierrosité en surface est un facteur important pour la reconnaissance de ce type de sol, elle avoisine les 10 à 30 %. Les couches "L" et "F" de ces sols sont épaisses (3 cm au moins) et traduisent une pédogénèse lente.

- * Nature : colluvium assez mince, constitué d'un sol très chargé en calcaire actif ; le pourcentage de la fraction "argile+limon" fait partie des plus faible (32 %).
- * Épaisseur : réduite, autour de 30 cm.
- * Texture et Pierrosité :
 - ◆ A1 : 10 cm ou un peu plus, cet horizon comporte 20 % d'éléments grossiers ; de texture limono-sableuse, il est un peu moins filtrant que son homologue des "Cônes torrentiels-Eboulis". Le taux de calcaire actif des ces situations est très fort, par suite ces milieux semblent être les plus défavorables pour le *Pin noir* ;
 - ◆ C : la structure observée dans l'horizon "A1" disparaît pour cet horizon "C", qui se compose de 40 % d'éléments grossiers mélangés à du sol de texture limono-sableuse pouvant parfois devenir sablo-limoneuse. Le taux de calcaire actif reste élevé : 49 % de calcaire total et 27 % de calcaire actif.
- * Origine : ce colluvium provient de coulées anciennes de boue accumulées sur une base calcaréo-marneuse non visible, constituées lors des orages de printemps ou d'automne. Les éléments grossiers de ces sols furent arrachés à la falaise, emportés et enrobés dans des boues fortement calcaires, qui venaient s'accumuler

ensuite au bas du versant. Aujourd'hui, ces situations se sont stabilisées et elles ne sont plus rajeunies et complétées par de nouveaux apports ; de même le taux de pierrosité de surface est désormais non modifié par des apports, ce qui favorise la végétation et son développement.

CRITÈRES DU MILIEU ET LA FERTILITE DU *PIN NOIR*

1) Données

* Calcaire et texture (analyses en laboratoire)

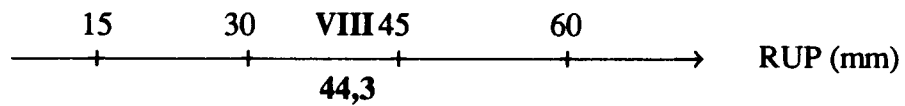
Relevés	Pourcentage en calcaire total		Teneur en calcaire actif en % du sol total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	% de la fraction < 50 µm en % de sol	
	A1	C	A1	C	C	A1	C
D5	31,97	39,04	16,95	13,26	23,74	31	37
D18	22,5	57,12	15,98	24,89	29,11	46	54
D21	77,38	58,77	35,81	42,43	25,57	59	68
D22	-	-	-	-	-	-	-
D36	31,64	22,60	9,51	9,35	56,65	68	66
D37	34,34	67,40	28,61	45,92	26,08	48	72
F-ratio*	5,79	10,80	6,19	5,22	6,06		
moyenne écart-type	39,57 9,67	48,99 8,05	21,37 4,74	27,17 7,42	32,23 6,17		

F-ratio* : test d'analyse de variance entre le taux de calcaire actif et le découpage en unités géo-pédologiques.

* Données issues du terrain

Relevés	alti	RUP	pier1	pier23	Vconc	Vrect	Vconv	P<A	Texture	
									A1	C
D5	830	44,6	1	0	0	0	1	0	LS	L
D18	660	39,5	1	0	1	0	0	1	LS	SL
D21	650	32,4	0	1	0	0	0	1	LS	SL
D22	610	51,8	0	1	0	1	0	0	LS	L
D36	610	59,2	0	1	0	0	1	0	L	La
D37	750	46,8	0	1	0	0	1	0	L	LS
M10	980	35,6	0	1	0	0	1	0	LS	LS

2) Remarques



La réserve utile de ces situations de "Cône torrentiel" est réduite, même si elle est légèrement plus forte que celle obtenue dans les "Cônes torrentiels-Eboulis", ceci s'explique par une texture un peu plus favorable, dominée par des limons, par un sol élaboré sur une plus grande profondeur de profil pédologique. L'indice de fertilité est assez bon $H_{80} = 17,6 \text{ m}$ ($\sigma = 0,86 \text{ m}$), malgré un taux de calcaire actif élevé et une réserve utile moyenne ou faible. Les éléments du milieu favorisant la croissance des arbres sont : une texture à tendance limoneuse, une profondeur de sol modifiée non négligeable, un sol désormais stabilisé, en cours d'élaboration et une topographie globalement favorable.

V) CONCLUSION

Cette première partie de notre travail correspond à une présentation à la fois de l'essence *Pin noir* d'Autriche et du cadre physique où elle prospère, dans le sud-est de la France. Après avoir réalisé pour le milieu, l'inventaire et la description des trois échelles de perception, qui sont :

- * Alpes externes méridionales, échelle la plus petite,
- * régions climato-géologiques, échelle intermédiaire,
- * massifs forestiers tests, échelle la plus grande.

Nous allons proposer dans le chapitre suivant un exposé des données disponibles sur ces trois espaces géographiques, suivi d'une approche des méthodes sélectionnées pour répondre à la question des relations entre le milieu et la production.

PARTIE II

DONNEES ET METHODES

Ce chapitre correspond à l'exposé des différents types de données, puis des méthodes choisies pour aborder notre sujet. Les données préexistantes nous ont permis d'amorcer notre étude ; les résultats, qui en découlent, ont orienté les choix ultérieurs et la sélection de notre propre jeu de données.

I) DONNEES

1) DONNEES PREEXISTANTES ET PROTOCOLES CORRESPONDANTS

Les deux jeux de données I.F.N. et I.N.R.A. correspondent à deux protocoles distincts, car les objectifs de ces deux organismes ne sont pas les mêmes.

- * Pour l'I.F.N., l'objectif premier reste l'estimation quantitative de toutes formations boisées ou non, dans le contexte de l'aménagement du territoire ; pour les seules formations boisées, il s'agit d'en évaluer les volumes sur pied, les accroissements, c'est-à-dire connaître les ressources existantes et le potentiel de production. Ces objectifs constituent un schéma directeur valable à l'échelon national.
- * Pour l'I.N.R.A. d'Avignon (Laboratoire de Recherches Forestières Méditerranéennes), deux objectifs sont à atteindre la construction des tables de production, d'une part et l'étude des liaisons "station-production", d'autre part.

Les objectifs étant différents, les protocoles sont différents :

1.1) Protocole et données de l'I.F.N.

Le protocole de l'I.F.N. étant largement décrit dans "But et Méthodes de l'Inventaire Forestier National, 1985", nous rapporterons ici seulement les grandes lignes sans entrer dans le détail. **La méthode I.F.N. fonctionne sur un sondage statistique avec stratification.**

L'étude préalable à l'inventaire d'un département est la reconnaissance et la délimitation de grandes unités naturelles : **les régions forestières I.F.N.** Pour l'ensemble d'un département et sur ce découpage naturel fonction du milieu, s'organisent les trois phases suivantes, d'échantillonnages emboîtés :

- * **Première phase : échantillonnage systématique sur photographies aériennes, ayant pour but d'analyser les formations à inventorier.** La délimitation des différents types de peuplements sur photographies aériennes conduit aux tracés de contours ; ces limites sont numérisées et elles constituent les fichiers cartographiques (fichiers numérisés), qui servent ensuite au calcul des surfaces pour chaque formation.
- * **Deuxième phase : Mise en place d'un échantillonnage suite à la première phase, qui permet d'affiner l'estimation des surfaces précédemment calculées, car les surfaces inférieures à 4 hectares sont éliminées lors de la numérisation automatique. Ce nouvel échantillonnage au hasard de contrôle au sol sert à actualiser, compléter et rectifier les résultats de l'interprétation photographique et de la numérisation automatique.**
- * **Troisième phase : échantillonnage au hasard au sol pour mesurer sur les placettes à l'intérieur d'une stratification, les différentes caractéristiques dendrométriques, écologiques et floristiques.**

La troisième phase peut être utilisée pour une étude des relations entre le milieu et la production. Nous rappellerons qu'un tirage au hasard de points à lever, est effectué dans

chaque strate de sondage, définie par la combinaison de trois critères : la région forestière, le mode de propriété et le type de peuplement ; ces points à lever sont *non homogènes* à cause du mode de sondage au hasard, qui peut placer un point en limite de peuplement, dans une trouée ou en lisière.

Nous plaçant dans le cadre des "gros bois vifs" qui concerne le *Pin noir* d'Autriche, la placette de relevé correspondante, a une surface de 7,07 ares (15 m de rayon). Sur cette placette, de nombreuses caractéristiques dendrométriques sont récoltées et mesurées ; nous nous limiterons à utiliser les mesures concernant l'essence dominante, en l'occurrence le *Pin noir* d'Autriche.

Au total, 548 placettes de l'I.F.N. ont été analysées pour cette étude ; elles ont été sélectionnées sur deux critères :

- * essence prépondérante (> 50 % du couvert) : *Pin noir* d'Autriche,
- * structure forestière : futaie régulière.

Sur les 548 placettes de l'I.F.N., chaque arbre appartenant à l'essence prépondérante, est mesuré suivant son diamètre à 1,30 m. Cette évaluation permet de retenir les 7 arbres dominants, pour lesquels un certain nombre de grandeurs dendrométriques seront mesurées. Dans le cadre de notre étude "liaison milieu-production", ces valeurs dendrométriques serviront à déterminer un indice de fertilité, appréhendé par l'intermédiaire de courbes hauteur/âge provenant d'un autre jeu de données, situé dans le même domaine d'étude. Sur le terrain les équipes de l'I.F.N. collectent des **mesures dendrométriques moyennes** (sur les 7 arbres les plus gros), qui sont notées dans la fiche écologique. Il s'agit de :

- * la hauteur dominante H : moyenne de la hauteur totale des 7 plus gros arbres sur la placette de 7 ares (correspondant approximativement aux 100 plus gros arbres à l'hectare) de l'essence prépondérante sur la placette ;
- * l'accroissement en hauteur dominante L₅ : accroissement de ces arbres dominants durant les cinq années précédant le passage des équipes de l'Inventaire ;
- * l'âge dominant A : moyenne des âges des arbres dominants.

De plus, l'échelon de Montpellier propose sur chaque placette quelques renseignements écologiques et floristiques nous autorisant à entamer une étude des relations entre le milieu et la production. Il faut noter que la liste floristique proposée n'est pas exhaustive et correspond aux espèces reconnaissables en toute saison. De plus la liste des variables écologiques sélectionnées par l'I.F.N. a évolué d'un département à l'autre, ce qui nous a obligé à éliminer certains paramètres du milieu, car ils étaient non renseignés dans plusieurs départements.

1.2) Protocole et données de l'I.N.R.A.

Le protocole I.N.R.A. est établi sur des **placettes de production semi-permanentes**, dont le repérage précis doit permettre d'y effectuer plusieurs séries de mesures à quelques années d'intervalle : d'où le nom de "semi-permanentes". Les placettes choisies sur le terrain doivent être représentatives du peuplement et homogènes d'un point de vue écologique. Elles ont une surface minimum de 10 ares et présentent un nombre de tiges entre 100 et 200 (DECOURT N., 1973). Dans chaque placette d'expérience, quatre tiges de *Pin noir* d'Autriche ont été abattues : 1 dominée, 1 moyenne et 2 dominantes, ces dernières représentent la moyenne des 100 dominants/ha (100 plus gros arbres/ha) et ont été utilisées dans cette étude. L'**analyse de tiges** permet d'avoir autant de couples (âge-hauteur) que le nombre de billons obtenus, depuis la souche jusqu'à la cime de la tige, ces données se suivent et permettent de reconstituer la courbe de croissance (TOTH J. et TURREL M., 1983).

Par ailleurs, sur chaque placette, une fiche écologique et floristique a été remplie ; concernant les aspects floristiques, il faut noter qu'ils ont été limités "aux seules espèces ligneuses et aux principales espèces herbacées, ce qui est évidemment critiquable et a amené un biais" (TIMBAL J., TURREL M. et DUCREY M., 1985).

Au total, 102 placettes *Pin noir* d'Autriche de production semi-permanentes ont été installées par l'I.N.R.A. d'Avignon ; elles se répartissent dans cinq départements des Alpes externes méridionales de la façon suivante :

- * Alpes de Haute-Provence : 53 placettes
- * Hautes Alpes : 11 placettes
- * Alpes maritimes : 6 placettes
- * Drôme : 26 placettes
- * Vaucluse : 6 placettes

2) DONNEES RECOLTEES DURANT L'ETE 1990 ET L'ETE 1991

Afin d'exprimer les "relations entre le milieu et la production" pour le *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales, nous avons mis en place un protocole s'inspirant à la fois de celui de l'I.N.R.A. et de l'I.F.N.. La première difficulté pour aborder un tel sujet dépend de l'espace retenu et donc de l'échelle. *A petite échelle : aire de répartition du Pin noir d'Autriche dans le sud-est de la France*, l'espace est bien trop vaste pour être parcouru dans son intégralité, comme cela a été effectué par l'I.F.N..

Face à l'ampleur de cet espace, il nous a semblé préférable d'aborder le sujet en réalisant tout d'abord un inventaire des situations écologiquement homogènes et comparables. A cet effet, en combinant le climat et la géologie, nous avons découpé les Alpes externes méridionales en **trois régions homogènes d'un point de vue climato-géologique : échelle intermédiaire**. A titre de rappel :

- * le **chaînon Ventoux-Lure**, sud des Alpes externes méridionales,
- * la **fosse Vocontienne**, depuis le Vercors jusqu'à l'axe Ventoux-Lure,
- * la **nappe de Digne**, est des Alpes externes méridionales.

Notre étude s'est bornée aux deux premières régions climato-géologiques ; chacune d'elles a été caractérisée par une entité stable. Ainsi, la fosse Vocontienne est constituée de **synclinaux perchés**, présentant des couches géologiques du Jurassique au début du Crétacé, qui se répètent d'est en ouest ; alors que le chaînon Ventoux-Lure, orienté d'ouest en est, offre un **versant nord** entièrement Crétacé, peuplé en *Pin noir*. Pour ces deux régions climato-géologiques, nous avons choisi une entité homogène peuplée en futaie régulière de *Pin noir* d'Autriche, soit un **massif forestier test**, qui représente *l'échelle la plus grande* dans cette thèse.

A cette échelle du massif forestier, qui correspond soit à un synclinal de la fosse Vocontienne, soit à un versant nord du Crétacé dans le chaînon Ventoux-Lure, une **stratification naturelle** s'est imposée en fonction principalement de critères géologiques et pédologiques. Elle a abouti à l'élaboration d'**unités géo-pédologiques**, qui ont été décrites précédemment (IV) Description des unités géo-pédologiques) et qui constituent des entités "milieu" pouvant représenter une *variable "synthétique"*.

A ce stade de la rédaction, il est indispensable de rappeler quelques définitions. BARTHES J.-P. et BORNAND M., 1987 évoquent la notion de systèmes géo-pédologiques, associée avec celle d'unités paysagères. Pour eux les **systèmes géo-pédologiques** correspondent à la nécessité de replacer le sol dans son environnement global et surtout au sein d'un contexte géologique à l'intérieur duquel il se développe et s'intègre. Ce découpage est parfois insuffisant pour répondre à la grande diversité des situations, d'où la notion d'**unités paysagères**, qui subdivise les systèmes géo-pédologiques en fonction de caractères

géomorphologiques et altitudinaux. Dans notre cas, nous avons choisi d'appeler **unités géo-pédologiques** une stratification basée sur la combinaison entre le sol et le substratum, qui l'a constitué, auxquels s'ajoutent des paramètres traduisant le climat local. Une telle définition peut amener à penser aux **stations forestières**, mais nous préférons appeler ce découpage ainsi, car il s'agit d'entités hétérogènes quant à leur composition floristique.

Les différentes unités géo-pédologiques de cette stratification sont alors échantillonnées, suivant un minimum de cinq relevés répartis au hasard. Chaque relevé est une placette circulaire de 6 ares, située dans un espace homogène d'un point de vue écologique, où prospère une futaie régulière de *Pin noir* d'Autriche. Dans cet espace ont été recueillis les paramètres écologiques et dendrométriques. Ces relevés correspondent à la phase de terrain de l'été 1990 et se répartissent de la façon suivante.

- * 50 relevés sur le versant nord du Ventoux, pour le chaînon Ventoux-Lure,
- * 40 relevés dans la forêt domaniale de Solaure et 10 relevés dans la forêt domaniale de Glandasse, soit au total 50 relevés Diois, correspondant à un synclinal classique de la fosse Vocontienne.

Nous avons fait l'hypothèse d'homogénéité écologique (suivant le climat et la géologie) à l'intérieur de chaque région climato-géologique, il reste à le vérifier. Cette nouvelle étape correspond à la **phase d'extrapolation à échelle intermédiaire**. A cet effet, des relevés complémentaires ont été réalisés suivant un protocole identique à celui qui a été utilisé pour les relevés de été 1990. Pour les deux régions climato-géologiques, ces relevés (été 1991) ont été implantés suivant de nouvelles directions géographiques. Ils se répartissent comme suit :

- * 10 relevés sur le versant nord de la Montagne de Lure, pour élargir l'espace du Ventoux au chaînon Ventoux-Lure, direction est,
- * 13 relevés dans le Nyonsais, en direction sud par rapport au synclinal test, phase d'extrapolation de la fosse Vocontienne,
- * 13 relevés dans le Gapençais, en direction est à sud-est par rapport au synclinal test, phase d'extrapolation de la fosse Vocontienne.

2.1) Différents types de données du milieu

Au total notre échantillon réalisé sur deux saisons compte 136 relevés du même type. La fiche écologique relative à ces relevés a été élaborée en fonction des premiers résultats offerts par les échantillons de l'I.N.R.A. et de l'I.F.N.. La stratification décrite plus haut, a fait ressortir l'importance des unités géo-pédologiques, à l'échelle du massif forestier ; par suite, nous avons renforcé l'approche pédologique dans la fiche écologique, qui comporte également des renseignements lithologiques et géographiques. Un exemple de la fiche de relevé est donné en annexe (annexe n°1). Ces paramètres du milieu, énumérés page 44, sont de deux types :

- * les données brutes : ce sont des *descripteurs "simples"* du milieu, qui se présentent sous une forme qualitative ou quantitative ;
- * les *descripteurs "complexes"*, élaborés à partir de descripteurs simples du milieu ou bien provenant d'une analyse en laboratoire. Il s'agit de la **réserve utile** et du **calcaire actif**, qui vont être détaillés dans le paragraphe suivant.

2.1.1) La réserve utile

Parmi les variables simples, trois sont récoltées afin d'effectuer le calcul de la **réserve utile (R.U.)**, pour chaque relevé. La capacité de rétention de l'eau pour un sol est un facteur du milieu, particulièrement important en région méditerranéenne, puisqu'il conditionne la production des essences forestières. Dans un sol non caillouteux, la densité

apparente de la terre fine augmente avec la profondeur et le réservoir hydrique augmente en proportion.

L'estimation correcte de ce descripteur complexe n'est pas facile, car il correspond à une synthèse complexe de plusieurs éléments simples du milieu. Nous exprimons cette variable de façon réductrice, mais quantitative. La méthode employée est préconisée par FRANC A., 1989. A cet effet, nous avons retenu l'épaisseur de chaque horizon du profil, le pourcentage en éléments grossiers et la texture de la terre fine de tous les horizons pédologiques superposés dans le profil de sol. On aurait pu compliquer cette estimation en y intégrant notamment le taux de calcaire actif.

Les trois descripteurs cités précédemment peuvent présenter quelques difficultés dans leur estimation sur le terrain. Ainsi :

- * l'épaisseur du profil est limitée à la profondeur de la fosse pédologique pour la majorité des cas, c'est-à-dire au maximum à 80 cm de profondeur. Il faut noter que pour quelques relevés du Ventoux, nous avons pris la liberté d'estimer cette profondeur en fonction de la fosse effectuée et de l'observation de la coupe en bordure du chemin, d'où quelques profondeurs autour de 1 m. En conséquence, certains relevés de profondeur de sol supérieure à 1 m ont été sous-estimés pour cette grandeur ;
- * la charge en éléments grossiers du profil correspond à une estimation visuelle grâce à un témoin sur papier, constitué de carrés noircis à des pourcentages différents. Là encore, il y a des possibilités d'erreurs d'estimation suivant l'opérateur (dans le présent travail, il n'y avait qu'un opérateur) ;
- * la texture de la fraction fine est une évaluation qualitative de la granulométrie. En pratiquant cet exercice, la détermination de l'élément dominant devient plus facilement accessible. La combinaison entre les sables, les limons et les argiles se traduit par un coefficient de réserve utile par centimètre (R.U. en mm/cm). Le tableau suivant, élaboré en milieu cristallin, rassemble les correspondances. Il faut toutefois signaler que le tableau cité ci-dessous, ne s'adapte pas totalement aux sols de décarbonatation, les valeurs devant être sous-estimées ; mais, en l'absence d'autres équivalences, nous avons utilisé ces résultats.

Texture		R.U. en mm/cm
Sableuse	S	0,7
Sablo-limoneuse	SL	1,0
Sablo-argileuse	SA	1,4
Limono-sableuse	LS	1,4
Limono-sablo-argileuse	LSA	1,6
Limono-argilo-sableuse	LAS	1,8
Limono-argileuse	LA	2,0
Argileuse	A	1,8
Argilo-sableuse	AS	1,7

(FRANC A., 1989)

Le calcul de la réserve utile s'effectue de la façon suivante :

$$R.U. = \sum R.U.(h)$$

$$R.U.(h) = R.U. \times \text{epai}(h) \times (1 - \text{cai}(h)) \quad \text{en mm}$$

R.U.(h) : R.U. de l'horizon,

R.U. : coefficient de réserve utile représentant la texture ; en fait, il correspond à la différence des teneurs en eau entre la capacité de rétention (ou capacité au champ) et le point de flétrissement dit "permanent",

epai(h) : épaisseur de l'horizon (en cm),

cai(h) : éléments grossiers de l'horizon (%).

2.1.2) Analyse du calcaire total et actif en laboratoire

Le **calcaire actif** tout particulièrement est un facteur primordial qui affecte la croissance de nombreuses espèces en milieu calcaire. Un excès de calcaire actif dans le sol inhibe leur nutrition en éléments tels que le fer et le manganèse. Le *Pin noir* d'Autriche dispose d'une certaine tolérance à l'égard du calcaire actif, grâce à la présence de champignons mycorhiziens (DECOUD J.-M., 1983). Par suite, aucun cas de chlorose n'a été observé si ce n'est dans le cas des éboulis vifs du Ventoux, milieux extrêmes. Bien que cette tolérance soit supérieure à celle observée chez d'autres espèces, il n'en demeure pas moins que le calcaire actif est un facteur déterminant de la croissance des arbres et donc de la fertilité, mesurée par la croissance en hauteur du *Pin noir* d'Autriche. De plus, on sait que la fraction fine silicatée (argile+limon) joue un rôle antinomique au calcaire actif, permettant une meilleure humification et une meilleure assimilation des éléments nutritifs (DUCHAUFOR Ph., 1984). Nous essaierons de vérifier ces effets sur le *Pin noir* d'Autriche.

Les déterminations en laboratoire ont suivi le protocole suivant :

Le calcaire total (% de l'échantillon)

Séparation de la fraction < 50 µm qui contient donc une fraction silicatée ("argile+limon") associée à un certain pourcentage de particules fines de CO₃Ca et qui peut être alors dosée et assimilée au calcaire actif (classiquement déterminé par la méthode à l'oxalate d'ammonium).

On en déduit alors :

- * la fraction < 50 µm (pourcentage du sol total) : il s'agit donc de l'ensemble "argile+limon" et calcaire actif ;
- * le calcaire actif exprimé :
 - soit en pourcentage du sol total ;
 - soit en pourcentage de la fraction < 50 µm ;
- * la fraction "argile+limon" pourcentage du sol total (fraction silicatée, débarrassée du carbonate).

Selon les zones de relevés, les tableaux de résultats pour chaque unité géo-pédologique, retiennent que certaines données concernant le calcaire actif, car elles ont été testées et sélectionnées sur une test de signification vis-à-vis de la fertilité.

3) DONNEES METEOROLOGIQUES

La subdivision d'Hydrométéorologie de la Météorologie Nationale dispose d'un programme "AUREHLY" (Analyse Utilisant le RELief pour L'HYdrométéorologie) (BENICHOU, P. et LE BRETON O., 1987), qui calcule pour un point quelconque, la hauteur des précipitations en tenant compte de la topographie uniquement ; alors que les paramètres du milieu influençant la variable précipitation sont bien plus nombreux (la structure du sol, le vent, la végétation, la proximité des sources d'humidité, etc.). Cette méthode répond à des besoins en cartographie de paramètres statistiques et s'appuie sur la reconnaissance automatique du "paysage" environnant le point de mesure. La détermination de la topographie repose sur l'acquisition par la Météorologie Nationale d'un fichier numérisé de l'I.G.N. fournissant les courbes de niveau d'une carte topographique générale de la France au 1/1000000. Un lissage du relief de la France a été effectué en calculant en chaque point d'une grille de maille 5 km une altitude moyenne à partir des 25 points environnants de la grille kilométrique ; une fois le lissage effectué, on détermine le "paysage" environnant un point quelconque en considérant les altitudes moyennes entourant le point. Une fois le codage du relief réalisé, aussi bien pour la grille 5 X 5 qu'aux points quelconques, il reste à quantifier la

part du "paysage" dans la répartition du champ des précipitations, soit en déduire les précipitations mensuelles en ce point avec une précision de 5 km (la grille).

Sachant que le fichier digitalisé de l'I.G.N. comporte des erreurs sur l'estimation des altitudes variant de 50 m en plaine jusqu'à 500 m en haute montagne ; et étant donné que l'estimation des précipitations avec la méthode "AURELHY" s'effectue avec une précision de 5 km, nous avons retenu ce renseignement de la Météorologie Nationale sur les seuls échantillons I.F.N. et I.N.R.A. ; même si l'incertitude est forte sur ces données. De tout façon, il nous a semblé inutile d'acquérir cette information pour notre fichier (136 relevés), dans la mesure où les différents points d'un massif forestier test auraient pratiquement eu la même valeur des précipitations.

Ces normales mensuelles des précipitations pour l'I.F.N. et l'I.N.R.A. seront traitées avec l'ensemble des paramètres du milieu. Par ailleurs nous avons sur ces données tenté le calcul de nouvelles variables, par exemple le régime des précipitations, les précipitations moyennes, ou encore le cumul des précipitations "mai-juin-juillet", "juin-juillet-août" et "mai-juin-juillet-août-septembre".

4) CHOIX DE L'INDICE DE FERTILITE ET RECOLTE DES DONNEES DENDROMETRIQUES CORRESPONDANTES

Choisir un indice de fertilité est une étape essentielle et difficile dans la mesure où il faut réduire l'ensemble du peuplement à une unique grandeur, qui se veut être le complet reflet du peuplement. De plus l'indice de fertilité doit permettre d'exprimer une liaison avec la production en volume. Avant de choisir le bon indice de fertilité pour entamer cette étude des relations entre le milieu et la production, grâce à la littérature disponible, nous avons fait un inventaire des indices possibles. Il ressort que dans la majorité des études menées sur les relations entre le milieu et la production, l'indice de fertilité retenu est la hauteur dominante (" H_0 "). Cependant, DECOURT N., 1973 a proposé l'utilisation du diamètre dominant (" D_0 "), qui correspond aux diamètres des plus gros arbres du peuplement, si on compare des peuplements ayant subi une même sylviculture (indice utilisé fréquemment dans le cas de peuplements irréguliers). Dans tous les cas, FRANC A. et HOULLIER F., 1989 observent que dans la mesure où "les variables dendrométriques utilisées pour caractériser la production dépendent les unes des autres de façon monotone (c'est-à-dire qu'elles varient toutes simultanément dans le même sens), alors le choix de l'une ou de l'autre de ces variables est relativement peu important".

Finalement, on note que dans bon nombre d'études "relations station-production", l'indice de fertilité préféré est dans le cas de peuplements sensiblement équiennes, la **hauteur dominante du peuplement à un âge de référence**. Cette hauteur dominante moyenne est à rapprocher de la notion des 100 plus gros arbres à l'hectare et implique que loi de EICHHORN soit vérifiée. Cette loi veut que la production totale en volume depuis l'origine d'un peuplement forestier est fonction de sa seule hauteur, et donc indépendante de l'âge, de la station et de la densité du peuplement, dans l'hypothèse où pour une essence donnée dans une région donnée, l'on se situe dans une futaie équienne fermée.

Pour cette étude, l'indice de fertilité définitivement retenu est la **hauteur dominante du peuplement à 80 ans**, notée " H_{80} ". Pourquoi 80 ans, car il s'agit approximativement de l'âge moyen des peuplements plantés dans le sud-est de la France entre 1860 et 1940. En choisissant cet âge, moyen pour la grande majorité des peuplements de *Pin noir* d'Autriche, nous limiterons les erreurs d'estimation sur l'indice de fertilité, car le modèle propose une valeur d'autant plus juste pour H_{80} , que le peuplement en question dispose d'un âge proche de 80 ans. De plus cet âge correspond à l'âge d'exploitabilité des peuplements, il est donc intéressant pour le gestionnaire de retenir en guise d'indice de fertilité, la hauteur qu'auront les peuplements au moment de leur exploitation.

Données et Méthodes

Les données dendrométriques recueillies ne sont pas les mêmes dans les trois échantillons, comme nous avons pu l'observer dans les paragraphes précédents et suivant la description suivante.

Les **données dendrométriques** de notre propre jeu de relevés (136), ont été recueillies d'après un protocole s'inspirant de celui de l'I.F.N., en tenant compte des conseils de P. DUPLAT (Département des Recherches Techniques de l'O.N.F.).

Dans la placette de 6 ares, pour l'ensemble des tiges de *Pin noir* d'Autriche, nous avons déterminé le diamètre à 1,30 m. Suivant cette mesure, les arbres ont été classés par ordre décroissant et nous en avons tiré les cinq plus gros. En fonction de la définition adoptée, pour une placette de surface "n", la hauteur moyenne dominante de la placette est donnée grâce à "n-1" plus gros arbres de cette placette (PARDÉ J. et BOUCHON J., 1988). Afin d'alléger la prise de mesures sur le terrain, qui devait théoriquement se faire sur cinq arbres, seuls les arbres n°1, 3, 5 ont été conservés. En effet, "le 1^{er}, le 3^{ème} et le 5^{ème} plus gros arbres d'une placette de 6 ares représentent valablement, du point de vue de la croissance en hauteur, la population des 100 plus gros arbres à l'hectare" (P. DUPLAT, 1989). Pour ces trois arbres, nous avons mesuré la hauteur (prise directe grâce à un jeu de perches) et l'âge (pris grâce à une tarière à 20 cm au-dessus du sol, comme le préconise l'I.N.R.A., ces 20 cm étant compensés par 3 années supplémentaires). Si par hasard la mesure de l'âge indiquait que la placette est inéquienne (écart entre le plus âgé et le plus jeune arbre supérieur à 10 ans), ce relevé serait rejeté. Le couple (hauteur-âge) moyen pour une placette, grâce au modèle de croissance, nous permettra de déterminer l'indice de fertilité pour la placette.

II) CALCUL DE L'INDICE DE FERTILITE

Ce paragraphe a pour objectif de rappeler les différentes étapes, qui nous ont permis de définir un indice de fertilité valable. Cette grandeur devait être absolument fiable afin de pouvoir entamer l'étude proprement dite des liaisons entre milieu et production. Il s'agit de construire un modèle de croissance en hauteur valable sur l'ensemble des Alpes externes méridionales, afin ultérieurement de définir un indice de fertilité pour chaque placette.

1) PHASE INITIALE : A PARTIR DES DONNEES PRE-EXISTANTES

En phase initiale pour appréhender la notion de production, au sens où nous l'avons choisi c'est-à-dire hauteur à un âge de référence, nous avons travaillé sur les deux jeux de données mis à notre disposition : jeux de l'I.F.N. et de l'I.N.R.A..

1.1) Indice de fertilité à partir des données de l'I.F.N.

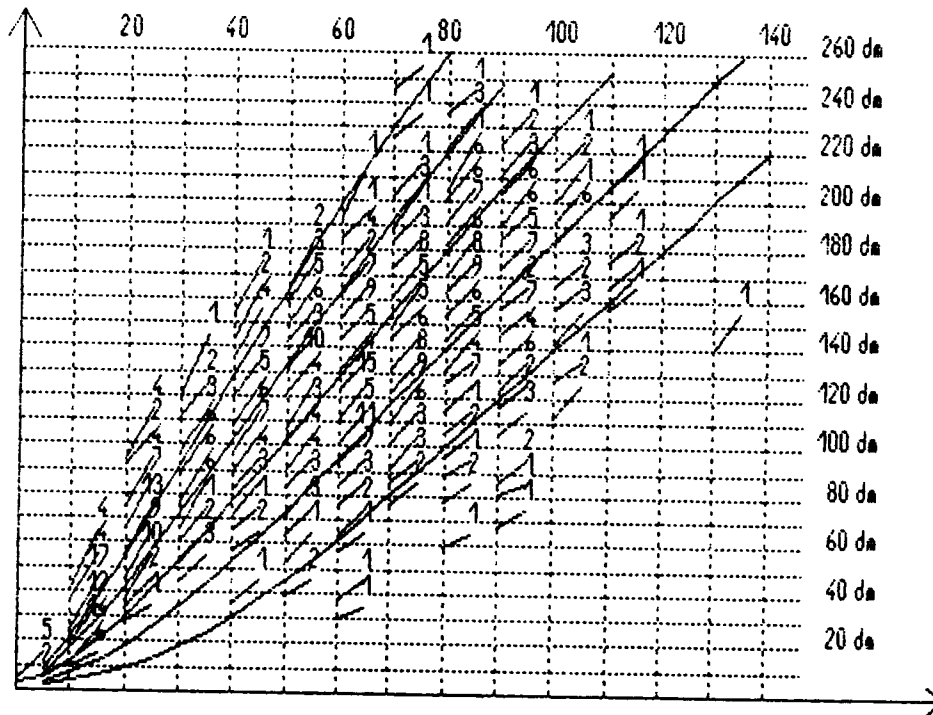
Les trois variables relatives au peuplement sont liées entre elles suivant un modèle donnant l'accroissement " L_5 " en fonction de la hauteur dominante et de l'âge dominant :

$$L_5 = f(A,H) \quad (\text{CHEVROU R.-B., 1986})$$

Cet accroissement est représenté graphiquement par un vecteur dans le plan (A,H). A partir du réseau de vecteurs, le modèle permet d'ajuster un faisceau de courbes qui coïncide au mieux avec le réseau observé et représente la croissance complète des peuplements (voir la représentation précédente), ceci dans la mesure où l'échantillon est suffisamment grand. Le modèle obtenu permet d'estimer, pour un peuplement d'âge

COURBES HAUTEUR/AGE

PIN NOIR D'AUTRICHE DANS LES ALPES EXTERNES



origine des axes = 0,0

EFFECTIF TOTAL = 548

Axe vertical = HAUTEUR ; lignes pointillées de 10 en 10 dm

Axe horizontal = AGE ; lignes pointillées de 10 en 10 ans

Courbes : $\text{Log}(Y)=f(A,H)$ à 5 coefficients.

(Y=acq en hauteur sur 5 ans)

'Log'=logarithme népérien.

$$\text{Log}(Y)=+0.8627613 +1.8022750 * \text{Log}(H/A) +0.7873868 * \text{Log}((H^2+A^2)^{1/2}) \\ -0.5880251 * \text{Arc tg}(H/A) * \text{Log}((H^2+A^2)^{1/2}) -0.0019086 * (H^2+A^2)^{1/2}$$

Age de référence: 80 ans.

Pas de 40 dm. pour la Hauteur à l'Age de référence.

Erreurs sur 5 ans:

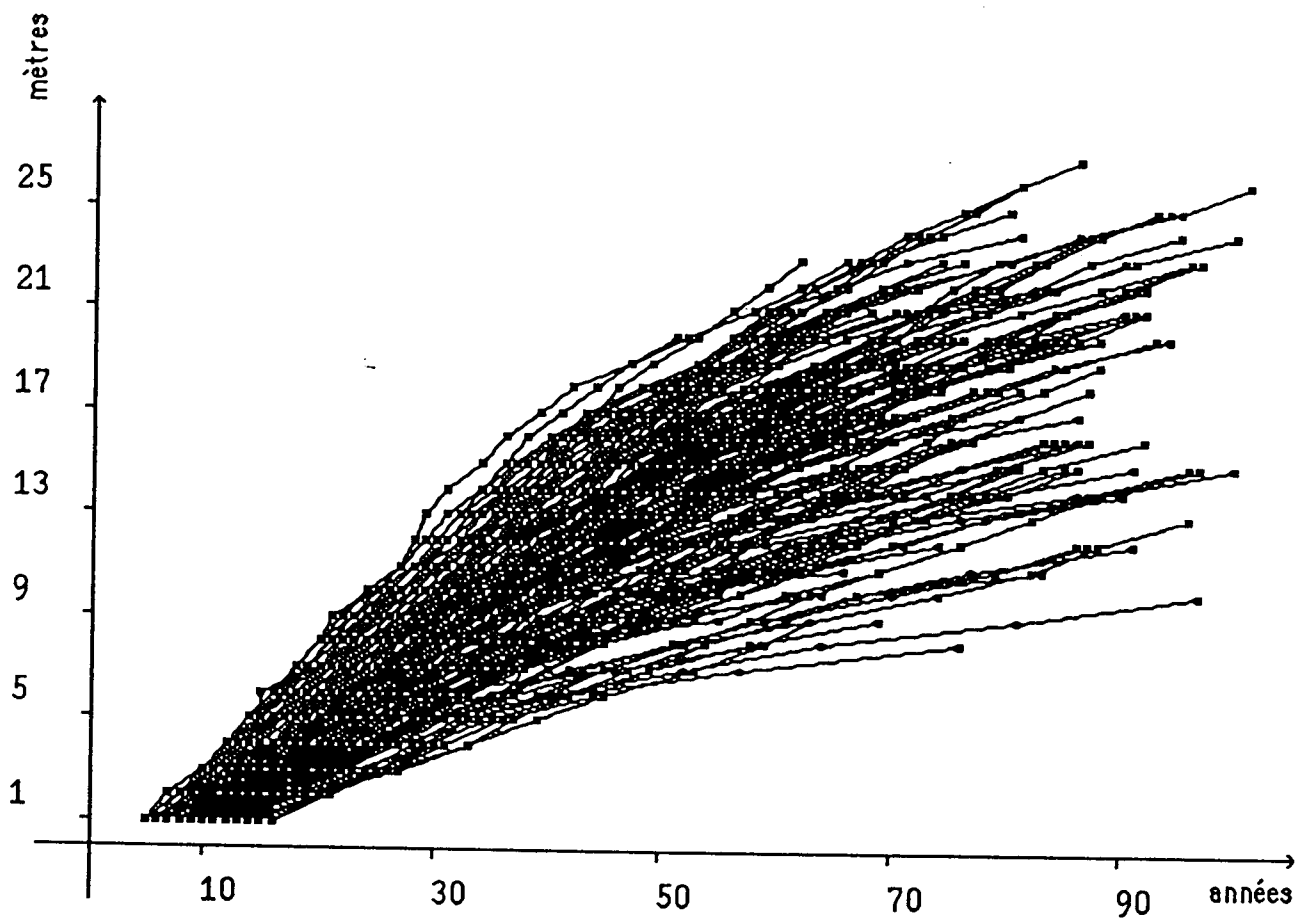
Ecart type= 3.81dm

Ecart type relatif= 27.4 %

Coef.de détermination $R^2= 0.398$

PIN NOIR - ALPES DU SUD

(données I.N.R.A. Avignon)



quelconque correspondant au domaine concerné, sa hauteur dominante à un âge de référence, soit H_{80} dans notre cas.

1.2) Indice de fertilité à partir des données de l'I.N.R.A.

Pour les 102 placettes de relevés I.N.R.A., nous disposons d'une courbe de croissance en hauteur dominante du peuplement en "faisant la moyenne" des deux tiges dominantes. Ces courbes constituent un faisceau qui a servi à l'élaboration de quatre classes de production pour le *Pin noir* d'Autriche ; ces classes présentent un intervalle de 3 m à 50 ans, ce qui correspond aux hauteurs dominantes suivantes à 80 ans : (TOTH J. et TURREL M., 1983)

* première classe : 23,8 m	production en volume : 749 m ³
* deuxième classe : 20,0 m	production en volume : 570 m ³
* troisième classe : 16,3 m	production en volume : 403 m ³
* quatrième classe : 12,7 m	production en volume : 260 m ³

(VANNIERE B., 1984)

Remarques : l'échantillon initial I.N.R.A. disposait en fait de 111 placettes, soit 9 de plus que notre échantillon du sud-est de la France. Il faut décompter 8 placettes situées en Lozère et 1 placette dans le Gard. Les fourchettes des classes de production proposées ci-dessus proviennent des résultats de l'I.N.R.A. et donc reposent sur les 111 placettes.

1.3) Comparaison des deux faisceaux des courbes I.F.N. et I.N.R.A.

L'observation des deux faisceaux de courbes de l'I.F.N. et de l'I.N.R.A. montrent très nettement une évolution différente, pour les âges les plus avancés.

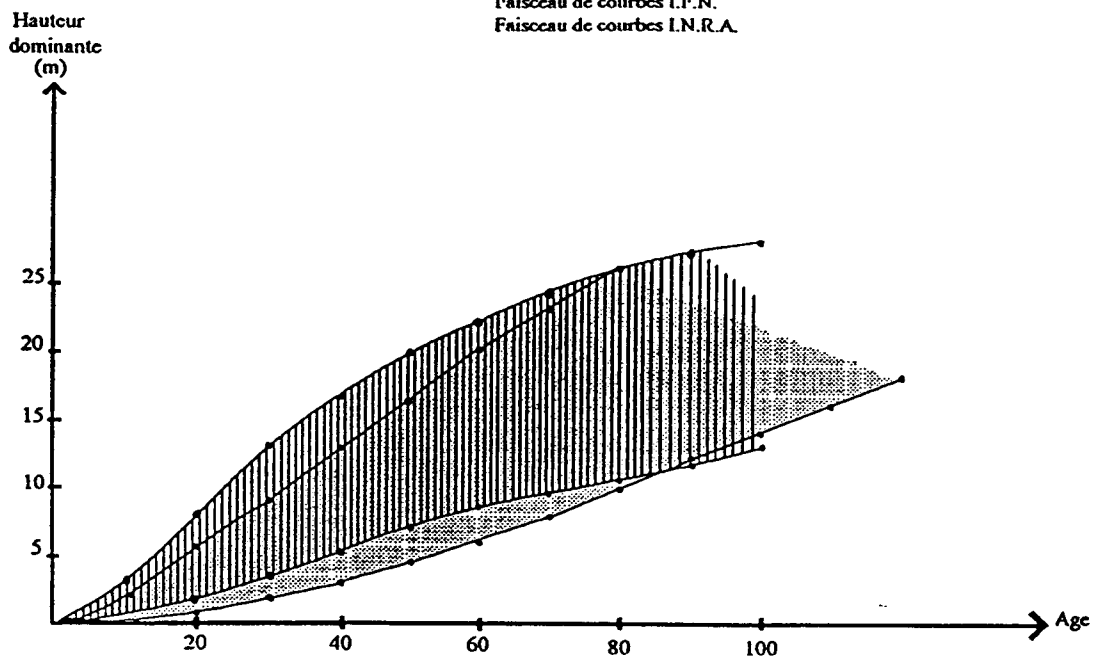
Au titre des similitudes entre ces deux faisceaux de courbes, on peut noter que les peuplements de *Pin noir* d'Autriche atteignent aujourd'hui dans les Alpes du sud-est un âge proche de 80 ans, ce qui explique que les deux faisceaux de courbes se superposent autour de cet âge. De plus, l'observation de la représentation graphique des deux faisceaux montre que si on admet que l'I.F.N. dispose d'un type d'échantillonnage totalement exhaustif en ce qui concerne le milieu, alors l'échantillon de l'I.N.R.A. couvre également cette même diversité des milieux, où pousse le *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales. Par ailleurs quel que soit le jeu de données, il faut constater la très grande variabilité des deux faisceaux de courbes traduisant des rendements allant du meilleur au pire en fonction des stations disposant de conditions écologiques plus ou moins favorables.


Voulant conserver et travailler sur ces deux jeux de données dendrométriques malgré leurs incertitudes respectives ou leurs éventuelles erreurs, le problème, qui se pose alors, est d'ordre statistique et dendrométrique.

Si l'on considère tout d'abord le faisceau de courbes de l'I.N.R.A. ; ne pourrait-on pas le subdiviser en deux ou trois sous-faisceaux qui répondraient différemment suivant les paramètres du milieu ? Ainsi, on peut peut-être imaginer que l'un des sous-faisceaux adopterait la forme du faisceau I.F.N.. En conséquence, il faudrait mettre en place différents modèles afin d'ajuster au mieux ces sous-faisceaux et voir par la suite comment raccorder ces modèles au groupe des placettes I.F.N., en ne considérant pour chaque placette que la hauteur dominante "H" et l'âge "A".

L'observation un peu fine du faisceau I.F.N. nous conduit à constater que les accroissements en hauteur dominante " L_5 " restent, quel que soit l'âge des placettes, toujours parallèles ; ce qui signifierait qu'à tout âge le *Pin noir* d'Autriche a un accroissement constant.

Pin noir d'Autriche
dans les Alpes externes méridionales
Faisceau de courbes I.F.N.
Faisceau de courbes I.N.R.A.



 courbes hauteur/âge des 548 points I.F.N.

 102 analyses de tiges I.N.R.A.

Or, il est plus fréquent d'imaginer que durant les jeunes années les arbres présentent une croissance accélérée, qui oriente et détermine la croissance ultérieure (phase exponentielle de la croissance). Vient ensuite une phase de croissance ralentie, qui fait tendre la courbe de croissance de l'arbre vers une asymptote, pas tout-à-fait horizontale (phase asymptotique de la croissance). Sur le jeu I.F.N., les " L_5 " des placettes ayant atteint 80 à 120 ans demeurent trop "optimistes" et ne traduisent plus la réalité. **La mesure du " L_5 " étant très difficile, il s'agit davantage d'une estimation que d'une mesure** ; à cela deux raisons, la mesure est délicate dans des peuplements âgés et denses, d'une part et la mesure dépend des variations climatiques des cinq dernières années, qui ne représentent pas la totalité de la vie du peuplement, d'autre part. Le modèle de CHEVROU R.-B., 1986, que nous venons de citer repose entre autre sur cette grandeur " L_5 ", il est donc impossible de l'utiliser dans ce cas du *Pin noir* d'Autriche.

Ce résultat nous a conduit à abandonner le modèle de CHEVROU, qui devait à priori nous servir, après un ajustement sur les données I.F.N., à estimer l'indice de fertilité des données I.N.R.A. et de notre propre jeu de données.

En conclusion, sur cet échantillon I.F.N., nous avons conservé simplement les couples (hauteur dominante, âge) et sur l'échantillon I.N.R.A. 102 placettes correspondant à 102 analyses de tiges dominantes, dans un même domaine d'étude : les Alpes externes méridionales. Il reste à appliquer un modèle de croissance aux données de l'I.N.R.A., afin dans un second temps de calculer l'indice de fertilité " H_{80} " pour ce jeu de données de l'I.N.R.A., pour celui de l'I.F.N. et pour le notre récolté durant les étés 1990 et 1991.

2) SOLUTION ADOPTÉE : MODELISATION J.-CH. HERVÉ

2.1) Ajustement d'un modèle aux analyses de tiges de l'I.N.R.A.

Seules les 102 analyses de tiges I.N.R.A. ont été retenues pour l'élaboration d'un modèle de croissance du *Pin noir* d'Autriche, dans les Alpes externes méridionales, dans la mesure où les renseignements dendrométriques de l'échantillon I.F.N. ont été réduits au seul couple (hauteur, âge). Il faut signaler l'existence d'un modèle de croissance du *Pin noir* d'Autriche sur les 111 placettes de l'I.N.R.A. élaboré par l'I.N.R.A. (TOTH J., 1974 ; OTTORINI J.-M. et TOTH J., 1975).

Sur les conseils de F. HOULLIER, nous avons pris contact avec un étudiant en thèse J.-Ch. HERVÉ (thèse E.N.G.R.E.F. au Laboratoire de Biométrie de Lyon ; responsable M. PAVÉ) dont le travail de recherche, qui doit s'achever prochainement, a concerné ces aspects de modélisation de la croissance et notamment de la croissance des peuplements forestiers. Nous avons donc travaillé sur le même jeu de données I.N.R.A. de 102 placettes et J.-Ch. HERVÉ en a réalisé la modélisation (HERVÉ J.-Ch., 1989).

La première étape consiste en une simple représentation graphique des 102 courbes moyennes représentant la croissance en hauteur d'une placette et donc d'un peuplement. Ces courbes n'étant pas trop sécantes, on peut envisager l'élaboration d'un modèle de croissance en hauteur, qui viendra s'ajuster à chaque courbe réelle illustrant chaque placette. Cependant, ce faisceau de courbes comportait 12 analyses de tiges correspondant à des arbres trop jeunes d'environ 30 ou 40 ans. Nous avons dû les éliminer de notre échantillon, ce qui a porté l'échantillon I.N.R.A. à 90 tiges analysées. En effet, il est dangereux de modéliser la courbe de croissance d'un arbre jeune (en-deçà de 30 ans), car l'incertitude est trop grande sur l'évolution de sa croissance réelle, étant donné qu'il n'a pas dépassé l'âge de l'accroissement moyen maximum.

J.-Ch. HERVÉ a utilisé une méthode mathématique pour établir le modèle de croissance du *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales. Après avoir choisi un modèle, en l'occurrence le modèle de "Chapman-Richards", il l'a ajusté à l'ensemble des

Données et Méthodes

courbes "terrain", en conservant deux paramètres flottants en fonction de chaque courbe. L'équation prend la forme suivante :

$$H = f(P1, P2, P3, P4, A)$$
$$H = P1 * (1 - p * \exp(-P2 * A / P1))^{1/(1 - P3)} \quad \text{avec } p = 1 - (P4 / P1)^{(1 - P3)}$$

"P1" et "P2" ne sont pas fixés, ils varient pour chaque placette, *paramètres locaux* :

- * P1 : asymptote à la courbe de croissance (en mètres),
- * P2 : deux fois la vitesse d'accroissement au point d'inflexion.

"P3" et "P4" paramètres fixés pour l'ensemble du peuplement, *paramètres globaux* :

- * P3 = 0,5 : forme, position du point d'inflexion,
- * P4 = 0 : ordonnée à l'origine (hauteur à l'âge "0"),
- * donc $p = 1$.

"P3" et "P4" permettent une simplification de l'équation de "Chapman-Richards" :

$$H = P1 * (1 - \exp(-P2 * A / P1))^2$$

"P1" et "P2" permettent de décrire la variabilité des profils de croissance entre les stations. Cette variabilité est quantifiée en estimant :

- * la moyenne de "P1" et "P2" pour l'ensemble des stations,
- * la matrice de "variances-coariances" de "P1" et "P2".

2.2) Utilisation de ce modèle pour définir l'indice de fertilité

Le problème posé consiste à estimer la hauteur dominante à 80 ans, connaissant la hauteur dominante à un ou plusieurs âges différents. Ceci est réalisé par le calcul de l'espérance de la hauteur à 80 ans, conditionnellement aux hauteurs mesurées.

L'expression de "Chapman-Richards" nous a donc fournit l'indice de fertilité : " H_{80} "; à la fois pour l'échantillon I.N.R.A., mais aussi pour l'échantillon I.F.N. et pour nos 136 relevés. Ceci est possible dans la mesure où certaines conditions demeurent inchangées dans les trois échantillons étudiés :

- * aire de répartition : Alpes externes méridionales,
- * l'essence : *Pin noir* d'Autriche,
- * type de peuplement : futaie régulière de *Pin noir* d'Autriche,
- * hauteur : analyse de tige ou mesure avec un jeu de perches,
- * âge : à la tarière pris à 20 cm au-dessus du sol dans les trois échantillons.

Ces similitudes nous autorisent donc à utiliser le modèle mis au point sur l'échantillon I.N.R.A. afin d'exprimer H_{80} pour l'échantillon I.F.N. et le notre.

De la construction du modèle de croissance en hauteur dominante, nous avons tiré un indice de fertilité, qui est mis en relation avec le milieu dans la suite de notre étude. Disposant d'un indice de fertilité correct et de paramètres du milieu pour chaque placette, afin d'exprimer les relations qui existent entre ces deux pôles, nous avons opéré un choix pas toujours facile en ce qui concerne les méthodes à retenir.

III) METHODES POUR ABORDER LES RELATIONS ENTRE LE MILIEU ET LA PRODUCTION

En commençant la rédaction de ce chapitre, il faut signaler l'existence d'une bibliographie assez fournie, qui nous a été très utile durant notre réflexion concernant les méthodes à retenir lorsque l'on veut aborder les "relations entre le milieu et la production". Nous citerons cinq références plus précisément et un groupe de travail dans le domaine :

- * LEMOINE B., 1981,
- * LE TACON F., 1973,
- * MILLIER C., 1973,
- * FRANC A. et HOULLIER F., 1989,
- * GUERO M.-Cl. et HOULLIER F., 1989,
- * Groupe de travail sur la typologie des stations forestières.

A titre de rappel et en vue de réaliser cette étude des relations entre le milieu et la production, nous disposons suivant les échantillons des types de données suivants :

- * échantillon I.F.N. :
 - ◆ variables simples qualitatives du milieu,
 - ◆ variable synthétique correspondant à une stratification du milieu en régions forestières I.F.N.,
 - ◆ indice de fertilité de forme continue ou découpé en six classes de fertilité d'effectifs égaux.
- * échantillon I.N.R.A. :
 - ◆ variables simples qualitatives du milieu,
 - ◆ variables dendrométriques concernant le peuplement et analyses de tiges,
 - ◆ indice de fertilité de forme continue ou découpé en six classes de fertilité d'effectifs égaux.
- * nos 136 relevés :
 - ◆ variables simples qualitatives ou quantitatives du milieu,
 - ◆ variable synthétique correspondant à une stratification du milieu en unités géo-pédologiques,
 - ◆ indice de fertilité de forme continue ou découpé en six classes de fertilité d'effectifs égaux.

1) TEST STATISTIQUE : ANALYSE DE VARIANCE

1.1) Relations entre les entités du milieu et la production

Il s'agit d'un simple test qui permet d'accepter ou de rejeter une hypothèse de liaison entre le milieu, considéré sous la forme d'une variable synthétique, et l'indice de fertilité, mesuré par H_{80} :

- * les **unités géo-pédologiques** et l'**indice de fertilité**, test concernant seulement nos 136 relevés ;
- * les **régions forestières I.F.N.** et l'**indice de fertilité**, test concernant les données de l'I.F.N..

Lorsque l'on pratique une **analyse de variance** sur l'indice de fertilité, il est nécessaire de vérifier que *l'indice de fertilité suit une loi de probabilité normale dans chaque groupe, avec une même variance dans tous les groupes*. Bien que cette hypothèse de la variance identique dans chaque groupe ne se vérifie pas dans le cas de nos échantillons, faute bien souvent d'un effectif suffisant, nous avons tout de même retenu cette méthode, parce

qu'elle est robuste ; elle nous a permis d'observer l'effet du découpage du milieu sur la production. Cette analyse de variance correspond à un test "F" de Fisher, c'est-à-dire au rapport entre la variabilité inter-groupes (entre les unités géo-pédologiques ou entre régions forestières I.F.N.) et la variabilité intra-groupe (entre les relevés d'une même unité géo-pédologique ou entre les relevés d'une même région forestière I.F.N.).

L'analyse de variance permet de tester :

- * si toutes les moyennes des stations sont identiques,
- * s'il existe au moins une moyenne différentes des autres.

1.2) Relations entre les unités géo-pédologiques et le calcaire actif

Sans répéter ce qui vient d'être exposé ci-dessus, il s'agit de réaliser une **analyse de variance** pour définir l'existence ou non d'une liaison entre les unités géo-pédologiques et le calcaire actif. Dans la mesure où la liaison existe, nous avons illustré chaque unité géo-pédologique par un taux de calcaire actif moyen et l'écart-type sur cette moyenne.

2) ANALYSE DES DONNEES

2.1) Analyse des correspondances

Les variables du milieu et la variable "fertilité" constituent un tableau de données [relevés/variables du milieu - indice de fertilité], qui peut servir pour exprimer les relations entre ces variables "milieu", dites explicatives, et la variable à expliquer "l'indice de fertilité". Exprimer cette relation revient à en démontrer l'existence dans une *première étape* purement *descriptive*. L'analyse des données et plus précisément l'**analyse des correspondances** est un bon moyen multidimensionnel pour démontrer l'existence ou non d'une liaison entre des variables "milieu" et l'indice de fertilité ; de plus ces méthodes permettent de sélectionner une liste réduite de variables du milieu optimales pour décrire "H₈₀" (CAZES P., 1976 ; LEBART L., MORINEAU A. et FENELON J.-P., 1982 ; VOLLE M., 1985 ; WAKMAN G., MÉNARD M. et BÉLANGER J., 1975).

Cette analyse des correspondances a pour objectif de regrouper la totalité des variables écologiques qualifiées de "simples" ou de "complexes", dans la mesure où elles sont renseignées sur chaque relevé ; à ces variables du milieu vient s'ajouter l'indice de fertilité. Cet ensemble de variables est alors recodé de façon qualitative, afin de rentrer dans un unique tableau à traiter. La chaîne de traitements, qui a été suivie, s'est déroulée en trois étapes développées ci-dessous :

- * Eclater l'ensemble des variables "milieu" en classes et coupler ce tableau aux six classes de fertilité ; on compose ainsi un *tableau disjonctif complet* [relevés/modalités des variables du milieu-six classes de fertilité] ;

		modalités des variables milieu	
		126	1 H ₈₀ 6
relevés du Ventoux tableau "initial"	1		
	50		

Au total, ce tableau se compose de 126 modalités de variables du milieu dans le Ventoux et 125 dans le Diois, auxquelles s'ajoutent six classes de fertilité (H1, H2, H3, H4, H5, H6). Il peut alors subir deux types de transformations.

- * Supprimer les six classes de fertilité pour obtenir un *tableau disjonctif complet* [relevés/modalités des variables du milieu] ;
La réalisation d'une analyse des correspondances sur ce tableau disjonctif complet, correspond à la construction de nouvelles variables écologiques : les **axes factoriels**. Dans tous les cas étudiés, nous avons retenu les cinq premiers axes, soit cinq nouvelles variables écologiques, qui se trouvent être des combinaisons linéaires de variables écologiques, simples ou complexes. Ces cinq axes ont la particularité d'être orthogonaux deux à deux, c'est-à-dire indépendants. En essayant d'exprimer l'indice de fertilité par ces cinq variables, nous avons défini le pourcentage de variabilité sur H_{80} expliqué par le milieu, au travers de ces cinq axes.
- * D'autre part, le tableau initial peut permettre de construire la *table de contingence "multiple"* : [six classes de fertilité/modalités des variables du milieu] ;

	H1	modalités de variables milieu	126
classes de fertilité	1		
	H6		

A l'intersection d'une colonne et d'une ligne, on obtient le nombre de fois où une modalité d'une variable milieu a été rencontrée dans telle classe de fertilité.

L'interprétation de l'analyse des correspondances réalisée sur la table de contingence, nous a fourni comme résultat des groupes de modalités de variables du milieu permettant d'expliquer chaque classe de fertilité, et donc au-delà une **liste réduite de descripteurs optimaux pour décrire " H_{80} "**. Cette liste de paramètres du milieu simplifiée a été reprise dans l'étape suivante.

L'avantage de ce type de méthode est de cerner davantage le problème posé, en sélectionnant d'une part, une liste réduite d'éléments expliquant l'indice de fertilité et d'autre part, en offrant un pourcentage d'explication sur la variabilité de l'indice de fertilité.

2.2) Analyse en composantes principales sur les données pluviométriques

Les normales mensuelles des précipitations disponibles sur l'ensemble des échantillons I.F.N. et I.N.R.A. lors des premiers traitements semblaient peu significatives ; afin de conserver ce renseignement et pour tenter de l'améliorer, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (A.C.P.) sur les douze mois de l'année disponibles pour l'ensemble des relevés. L'observation de cette A.C.P. montre que les deux premiers vecteurs propres sont associés à deux valeurs propres et qu'ils expriment respectivement la **moyenne des précipitations mensuelles** et le **régime de ces précipitations sur douze mois**. Les nouvelles coordonnées des relevés correspondant à ces deux premiers vecteurs propres sont alors tirées des deux premiers axes factoriels. Théoriquement, ces deux nouvelles variables sont un résumé efficace des douze variables, représentant les douze mois de l'année ; elles seront intégrées dans les traitements de la même façon que l'ensemble des variables "milieu".

De plus, en observant la signification de chaque normale mensuelle des précipitations pour expliquer H_{80} , nous avons imaginé de cumuler certains mois afin d'observer, si la relation avec l'indice de fertilité s'améliore. Ainsi, pour l'I.F.N. et l'I.N.R.A., nous avons associé "mai-juin-juillet" "juin-juillet-août" et "mai-juin-juillet-août-septembre". Les résultats ne sont pas très probants comme nous le verrons.

Ces tentatives d'explication de H_{80} à partir des précipitations ont été initiées par l'article de GUYON J.-P., 1986. Cet auteur a démontré que des paramètres climatiques (précipitations et températures) influencent l'accroissement annuel du *Pin noir* d'Autriche. Ces influences sont de deux types :

- * les *précipitations* cumulées des mois de juin, juillet et septembre d'une année donnée expliquent au mieux d'une part le nombre d'entre-noeuds initiés cette année là et d'autre part l'accroissement total de l'année suivante ;
- * les *températures* minimales des mois d'avril et de mai conditionnent l'importance de l'allongement moyen de ces entre-noeuds.

En fonction de ce résultat, nous avons voulu dans cette étude des relations entre le milieu et la production, accorder une place aux paramètres climatiques et notamment aux précipitations, sous une forme cumulée. Il faut toutefois remarquer que J.-P. GUYON a travaillé à partir des précipitations mensuelles enregistrées au cours d'une année alors que nous, nous avons utilisé les normales mensuelles des précipitations, établies sur 30 ans.

3) REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE

3.1) Sur les descripteurs simples du milieu

L'étape précédente d'analyse des données nous a permis de réduire la liste des variables analytiques du milieu, aux seules variables significatives pour décrire l'indice de fertilité, mais cette liste demeure encore trop importante. A partir du sous-tableau [relevés/variables du milieu], il s'agit d'exprimer l'indice de fertilité ; la méthode retenue est la **régression linéaire multiple**, dont le but est d'extraire quelques variables du milieu des plus pertinents pour exprimer H_{80} . A ce niveau remarquons que l'ensemble des variables pour rentrer dans un même traitement de l'analyse des correspondances avaient été éclatées sous une forme disjonctive complète ; pour ce nouveau traitement la régression linéaire multiple, les variables initialement continues reprennent leur forme première et les variables qualitatives vraies seront inchangées.

Pour réaliser cette nouvelle sélection à partir de la liste de variables issue de l'analyse des données, on utilise une méthode de **régression pas à pas ascendante ou descendante**. Dans le cas de la régression ascendante, la première variable extraite est la variable la plus significative pour décrire H_{80} , au sens d'un test "F" (Fisher) identique à celui effectué pour l'analyse de variance ; ce test "F" est comparé à une valeur seuil que nous avons fixée à 4. Après avoir testé ce premier lien, ce mode de calcul permet d'extraire la seconde variable la plus significative pour décrire H_{80} , et ainsi de suite. Après l'ajout de chaque nouvelle variable, il faut vérifier de plus qu'aucune des variables déjà introduites ne doit être éliminée. Ce traitement s'arrête automatiquement lorsque à une étape d'extraction d'une variable, le test "F" devient non significatif (inférieur à 4). Dans le cas de la régression descendante, le procédé est le même en retirant du modèle, composé de la totalité des variables, les variables une à une, en commençant par celles qui sont associées à un test "F" le moins significatif ; cela revient à supprimer du modèle les variables qui disposent d'un "F" inférieur à 4.

L'expression obtenue de l'indice de fertilité en fonction de variables écologiques est dite optimale pour exprimer cet indice, si elle offre un même résultat par **régression ascendante** (Forward) ou **descendante** (Backward). On parle de **régression pas à pas**, car les variables du milieu sont introduites, ou retirées une à une, en fonction de la réponse au test, à chaque étape.

Pour chaque expression de l'indice de fertilité, un certain nombre de paramètres sont donnés, qui traduisent la signification de l'expression. Il s'agit d'un test de signification

"F", de l'estimation de l'écart-type résiduel "SE" et d'un pourcentage de variabilité expliquée sur l'indice de fertilité "R2" : coefficient de détermination.

3.2) Sur les axes factoriels combinaisons linéaires du milieu

Il s'agit toujours d'extraire par régression linéaire multiple, la relation la meilleure qui rassemble le milieu et la production, mais cette fois le milieu est représenté par les cinq axes factoriels issus de l'analyse des correspondances sur le tableau disjonctif complet. Dans ce cas les descripteurs "simples" ou "complexes" du milieu sont sous-jacents aux axes factoriels et donc non exprimés clairement ; de plus, tous les descripteurs initiaux appartenant au tableau disjonctif complet (décrit dans le paragraphe 2), sont présents.

4) REGRESSION NON LINEAIRE

Ce type de traitement n'a pu être utilisé que sur le jeu "chaînon Ventoux-Lure", soit 60 relevés de notre échantillon, car dans la fosse Vocontienne, l'observation des différents échantillons n'a pas révélé une évolution non linéaire des variables écologiques (continues) en fonction de l'indice de fertilité.

En choisissant une variable que l'on sait significative pour exprimer H_{80} , nous avons observé graphiquement son évolution par rapport à l'indice de fertilité. La liaison linéaire entre H_{80} et cette variable du milieu, nous a semblé aller à l'encontre de la réalité physique ; elle s'accompagne de plus d'un coefficient de corrélation assez faible. Nous avons donc fait quelques tentatives afin d'observer cette même liaison entre l'indice de fertilité et une variable écologique quantitative, exprimée sous une forme non linéaire. Nous avons retenu une **expression de forme multiplicative** se présentant de la façon suivante :

$$H_{80} = f(\text{var}_i) + \varepsilon$$

(où "f" est une fonction non linéaire par rapport à un paramètre du modèle)

$$H_{80} = a \text{ var}_i^b + \varepsilon \quad (\text{fonction multiplicative})$$

Après avoir sélectionné une expression pour décrire H_{80} et après avoir exprimé par cette expression multiplicative une variable écologique, il s'agit à présent d'exprimer le résidu "ε" par d'autres éléments simples du milieu. Dans l'absolu, il aurait été préférable de trouver une nouvelle variable continue évoluant encore de façon non linéaire afin d'exprimer "ε". Or cette solution n'a pu être réalisée faute d'outil informatique. En effet, nous n'avons pas su construire une nouvelle expression de la fertilité enchaînant deux variables "milieu" ou plus, sous une forme non linéaire. Notre outil ("STATGRAPHICS") nous a permis de construire une expression multiplicative, où le résidu "ε" a été exprimé sous une forme linéaire à partir d'autres variables écologiques significatives pour expliquer H_{80} .

Une dernière étape achève de mettre en forme cette expression "mi-non linéaire" "mi-linéaire", qui consiste à ajuster les coefficients des différentes variables "milieu" sélectionnées. On obtient ainsi une nouvelle expression de la fertilité simplifiée quant au nombre des variables écologiques indispensables pour prédire H_{80} .

$$H_{80} = a \text{ var}_i^b + c \text{ var}_j + d \text{ var}_k \dots$$

**RESULTATS CONCERNANT
LES RELATIONS ENTRE LE MILIEU ET LA PRODUCTION
EN FONCTION DE L'ECHELLE DE PERCEPTION**

Faisant suite à la description de l'essence choisie dans son cadre physique et à l'inventaire des données et des méthodes sélectionnées, l'exposé des résultats obtenus en fonction de l'échelle, va être présenté depuis l'échelle la plus grande jusqu'à l'échelle la plus petite. Les résultats concernant les "relations entre le milieu et la production" se répartissent de la façon suivante :

- * à l'échelle la plus grande : le **massif forestier test**, (PARTIE III),
- * à l'échelle intermédiaire : phase d'extrapolation entre massif forestier test et massif forestier satellite : la **région climato-géologique**, (PARTIE IV),
- * à l'échelle la plus petite : les **Alpes externes méridionales**, trois jeux de données de l'I.F.N., de l'I.N.R.A. et les 136 relevés personnels, (PARTIE V).

Cette stratification emboîtée correspond aux trois échelles de perception que nous avons choisi pour aborder les "relations entre le milieu et la production", mais non aux seules échelles possibles ; chacune des ces trois échelles constitue une partie et a coïncidé avec la récolte de *nouvelles données terrain*.

La "partie III" est consacrée à l'échelle la plus grande, l'échelle du **massif forestier test** ; pour chaque unité géo-pédologique, nous avons effectué au minimum cinq relevés, tirés au hasard, dans la mesure où l'étendue de l'unité géo-pédologique en question le permettait. Cet échantillon à l'échelle du massif forestier test a constitué un premier niveau d'étude, à l'opposé de celui concernant les Alpes externes méridionales.

A partir des conclusions à l'échelle du massif forestier test, nous avons construit une phase d'extrapolation à l'échelle de la **région climato-géologique**, soit l'échelle intermédiaire, qui fait l'objet de la "partie IV". Il s'agit de translations géographiques depuis le massif forestier test suivant d'autres directions géographiques, dans une même région climato-géologique. A cette échelle, les relevés ont été tirés au hasard dans les différentes unités géo-pédologiques retrouvées dans le massif forestier satellite et déjà présentes dans le massif forestier test.

Enfin en dernier lieu, la totalité de nos relevés effectués en deux saisons de terrain a été rassemblée afin d'entrevoir quelques conclusions concernant la petite échelle, c'est-à-dire l'échelle des Alpes externes méridionales. Ces observations seront à comparer avec celles issues des échantillons de l'I.F.N. et de l'I.N.R.A. et présentées dans une dernière partie : "partie V".

Pour l'échelle la plus grande et l'échelle intermédiaire, les résultats exprimant les "relations entre le milieu et la production", se sont organisés suivant deux approches, fréquemment opposées et largement exposées dans l'introduction. Il s'agit d'une :

- * **approche synthétique** : relations unités géo-pédologiques / production ;
- * **approche analytique** : relations descripteurs du milieu / production.

Ces deux approches organisent l'exposé des résultats dans les parties III et IV.

PARTIE III

**RELATIONS MILIEU-PRODUCTION
A L'ECHELLE DU MASSIF FORESTIER**

Les résultats énoncés ci-après correspondent à l'étude complète des relations milieu-production concernant le *Pin noir* d'Autriche, à l'échelle du massif forestier test. Ces résultats mettent en valeur l'**approche synthétique** et l'**approche analytique** pour chaque massif forestier test. Dans chaque paragraphe, les résultats seront fournis par massif, c'est-à-dire :

- * versant nord du Ventoux,
- * forêt domaniale de Solaure,
- * forêts domaniales de Solaure et de Glandasse (Diois).

I) APPROCHE SYNTHETIQUE : RELATIONS UNITES GEO-PEDOLOGIQUES / PRODUCTION

Le massif forestier test est découpé en unités géo-pédologiques correspondant à une stratification "naturelle" de l'espace (voir inventaire et description précédente). Suivant cette typologie du milieu, nous avons testé l'existence d'une liaison avec l'indice de fertilité, avant d'affecter à chaque unité géo-pédologique un indice de fertilité. Prenant en considération la variable calcaire actif, nous avons ensuite attribué à chaque unité géo-pédologique un taux de calcaire actif.

1) ANALYSE DE VARIANCE POUR VALIDER LA LIAISON ENTRE UNITE GEO-PEDOLOGIQUE ET FERTILITE

Légende :

- * F-ratio = rapport entre la variance inter-unités géo-pédologiques et la variance intra-unités géo-pédologiques,
- * R^2 = somme des carrés inter-unités géo-pédologiques/total de la somme des carrés,
- * SE = racine carrée de la variance intra-unités géo-pédologiques (erreur standard).

VERSANT NORD DU VENTOUX

Dans le versant nord du Ventoux (50 relevés), le test de Fisher "F" est très significatif, indiquant une forte liaison entre H_{80} et les unités géo-pédologiques.

Analyse de Variance

Source de variation	Somme des carrés	d.d.l.	Variance	F-ratio	Sig. level
Inter-unités géo-pédologiques	604,730	9	67,192	19,862	< 10 ⁻⁵
Intra-unités géo-pédologiques	135,320	40	3,383		
Total	740,050	49			

De cette analyse de variance on tire :

- * $R^2 = 0,817$
- * SE = 1,84 m
- * soit $1,84/H_{80}$ moyen = 10,24 %

FORET DOMANIALE DE SOLAURE

Dans le Diois, et plus particulièrement dans la forêt domaniale de Solaure, le test "F" sur un échantillon de quarante relevés est également significatif.

Analyse de Variance

Source de variation	Somme des carrés	d.d.l.	Variance	F-ratio	Sig. level
Inter-unités géo-pédologiques	361,869	7	51,695	11,369	< 10 ⁻⁵
Intra-unités géo-pédologiques	141,509	32	4,547		
Total	507,377	39			

De cette analyse de variance on tire :

- * $R^2 = 0,713$
- * $SE = 2,13 \text{ m}$
- * soit $2,13/H_{80}\text{moyen} = 12,88 \%$

FORETS DOMANIALES DE SOLAURE ET DE GLANDASSE

Les huit unités géo-pédologiques mises au point pour le massif de Solaure en juillet 1990, ont été retrouvées dans la forêt domaniale de Glandasse ; un complément d'échantillonnage a été réalisé dans la mesure où l'effectif initial était insuffisant.

Le test (analyse de variance) entre l'indice de fertilité et ce découpage du milieu en unités homogènes sur le plan géo-pédologique demeure très significatif ; il est amélioré grâce à l'augmentation des effectifs, le "F-ratio" passant de 11,37 pour "Solaure" (40 relevés) à 16,42 pour "Solaure et Glandasse" (50 relevés), soit 10 relevés supplémentaires. Par ailleurs, on peut noter une légère amélioration de l'erreur standard commise sur H_{80} , qui passe en dessous de 2 m.

Analyse de Variance

Source de variation	Somme des carrés	d.d.l.	Variance	F-ratio	Sig. level
Inter-unités géo-pédologiques	451,876	7	64,554	16,420	< 10 ⁻⁵
Intra-unités géo-pédologiques	165,124	42	3,932		
Total	616,999	49			

De cette analyse de variance on tire :

- * $R^2 = 0,733$
- * $SE = 1,98 \text{ m}$
- * soit $1,98/H_{80}\text{moyen} = 11,93 \%$

SIGNIFICATIONS DE CES TROIS RESULTATS

Le résultat de ce test signifie qu'une liaison forte existe entre l'indice de fertilité et le découpage géo-pédologique réalisé, pour les deux massifs forestiers considérés. Cette approche synthétique est donc pertinente pour exprimer les relations entre le milieu et la production.

Cette stratification naturelle en unités homogènes, rend bien compte de la diversité du milieu. Cette diversité du milieu se traduit par une variabilité de la production du *Pin noir* d'Autriche, qui correspond à une réponse de l'essence en fonction des possibilités offertes par ces milieux.

A l'échelle du massif forestier

Les résultats exposés précédemment montrent que 82 % dans le Ventoux et au maximum 73 % dans le Diois de la variabilité sur H_{80} est expliquée par les unités géo-pédologiques. L'erreur standard commise pour déterminer H_{80} est de l'ordre de 2 m. Par exemple dans le Ventoux, pour une hauteur dominante moyenne de 17,96 m, l'erreur standard est de 1,84 m, soit 10,24 % d'erreur.

Le test de Fisher est plus élevé dans le Ventoux que dans le Diois ; cela signifie que la différence relative entre les unités géo-pédologiques, associées à des indices de fertilité, est plus grande dans le Ventoux que dans le Diois.

Les unités géo-pédologiques correspondent à la synthèse de combinaisons entre variables écologiques. Ces variables sont de deux types :

- * soit il s'agit de variables écologiques "apparentes" (généralement "simples"). Elles sont issues de la fiche écologique et servent à l'élaboration des unités géo-pédologiques ; ce sont celles que nous déterminerons par les chaînes de traitements statistiques et par les régressions multiples ;
- * soit il s'agit d'autres variables écologiques "non identifiées", car elles n'appartiennent pas à la fiche écologique, mais elles complètent parfaitement la structure des unités géo-pédologiques (par exemple, des variables écophysiologicals). Dans ce cas, leur mise en évidence ne passe pas par les chaînes de traitements classiques, qui traitent individuellement chaque variable.

Par suite, les unités géo-pédologiques sont plus riches, plus complexes et elles représentent mieux le paysage qu'une simple liste de quelques variables écologiques. La précision des unités géo-pédologiques explique cette bonne adéquation entre l'indice de fertilité et le découpage pré-supposé.

Nous rappelons ci-dessous, les variables écologiques apparents, qui nous ont servi à différencier les unités géo-pédologiques dans les différents massifs forestiers.

VERSANT NORD DU VENTOUX

- * Epaisseur du profil pédologique (facteur limitant < 50 cm),
- * roche en place, si le matériau est peu épais (< 50 cm),
- * pente (éboulis vifs, zones d'atterrissement...),
- * topographie stationnelle favorable :
 - ◆ "P<A" pertes en eaux inférieures aux apports,
 - ◆ replat.

FORETS DOMANIALES DE SOLAURE ET DE GLANDASSE

- * Altitude,
- * roche en place,
- * épaisseur du profil pédologique,
- * pente,
- * topographie stationnelle et du versant,
- * pierrosité en surface.

Dans les deux cas, la réserve utile est sous-jacente, même si elle n'a pu être utilisée pour la mise en forme du découpage géo-pédologique. Il s'agit d'une variable "complexe" combinant la profondeur prospectable du profil, la granulométrie et le pourcentage en éléments grossiers.

Cette analyse de variance prouve l'existence d'une liaison forte entre les unités géo-pédologiques et l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche ; le paragraphe suivant chiffre ce lien en affectant à chaque unité géo-pédologique un indice de fertilité.

2) MOYENNE DE H_{80} POUR CHAQUE UNITE GEO-PEDOLOGIQUE

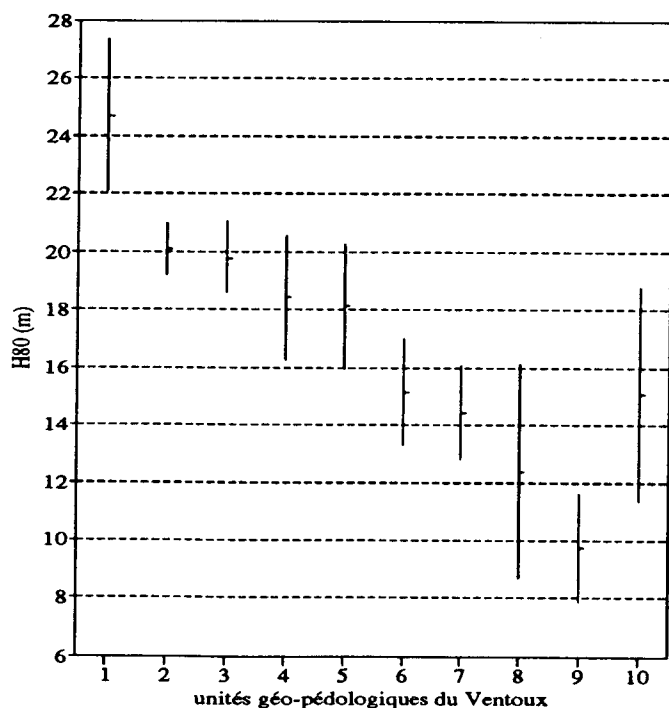
Les trois tableaux ci-dessous, associés aux trois graphiques, présentent l'indice de fertilité " H_{80} " moyen pour les différentes unités géo-pédologiques inventoriées dans les massifs forestiers du Ventoux et du Diois.

Dans chaque tableau sont indiqués :

- * les unités géo-pédologiques,
- * les effectifs,
- * les moyennes de " H_{80} " (m),
- * les écarts types sur la moyenne de " H_{80} " (m), c'est-à-dire la qualité de l'estimation de la moyenne,
- * les écarts types sur la population (m), c'est-à-dire la dispersion des points autour de la moyenne ; soit racine carrée de (Variance intra-groupes/effectif de l'unité géo-pédologique concernée),
- * les intervalles de confiance à 95 % sur la moyenne.

VERSANT NORD DU VENTOUX

unités géo-pédologiques	effectif	moyenne H_{80} (m)	écart type (m)	écart population (m)	intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %	
Zones d'atterrissement	2	24,70	0,89	1,300	22,071	27,330
Profondeur > 50 cm	18	20,09	0,404	0,434	19,214	20,966
Cal. durs < 50 cm	9	19,797	0,379	0,613	18,557	21,036
Cal. gréseux < 50 cm	3	18,413	1,578	1,062	16,266	20,560
Brèche < 50 cm	3	18,127	0,548	1,062	15,980	20,273
Grèze < 50 cm	4	15,175	1,062	0,920	13,316	17,034
Cal. marneux < 50 cm	5	14,46	1,066	0,823	12,797	16,123
Marnes < 50 cm	1	12,410	0	1,839	8,692	16,128
Eboulis vifs	4	9,748	1,309	0,920	7,888	11,607
Cône torrentiel	1	15,08	0	1,839	11,362	18,798
Total	50	17,966	0,260	0,260	17,440	18,492

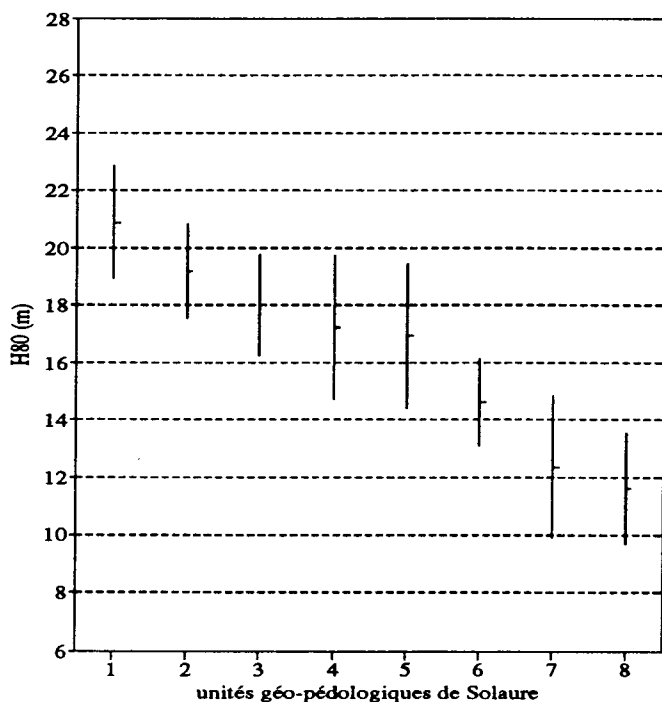


Représentation de la moyenne et de l'intervalle de confiance sur l'indice de fertilité moyen H_{80} .

- "1" : Zones d'atterrissement
- "2" : Profondeur > 50 cm
- "3" : Cal. durs < 50 cm
- "4" : Cal. gréseux < 50 cm
- "5" : Brèche < 50 cm
- "6" : Grèze < 50 cm
- "7" : Cal. marneux < 50 cm
- "8" : Marnes < 50 cm
- "9" : Eboulis vifs
- "10" : Cône torrentiel

FORET DOMANIALE DE SOLAURE

unités géo-pédologiques	effectif	moyenne H80 (m)	écart type (m)	écart population (m)	intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %	
Cal. durs du plateau	5	20,886	1,312	0,954	18,943	22,829
Colluvium épais	7	19,201	0,517	0,806	17,559	20,844
Cône torrentiel	6	18,015	0,895	0,871	16,241	19,789
Terres Noires	3	17,237	1,039	1,231	14,728	19,745
Bancs Cal. durs/Colluvium	3	16,947	0,592	1,231	14,438	19,455
Colluvium mince	8	14,623	0,366	0,754	13,086	16,159
Marnes de l'Argovien	3	12,373	2,526	1,231	9,864	14,881
Cône torrentiel-Eboulis	5	11,614	1,036	0,954	9,671	13,557
Total	40	16,541	0,337	0,337	15,854	17,228



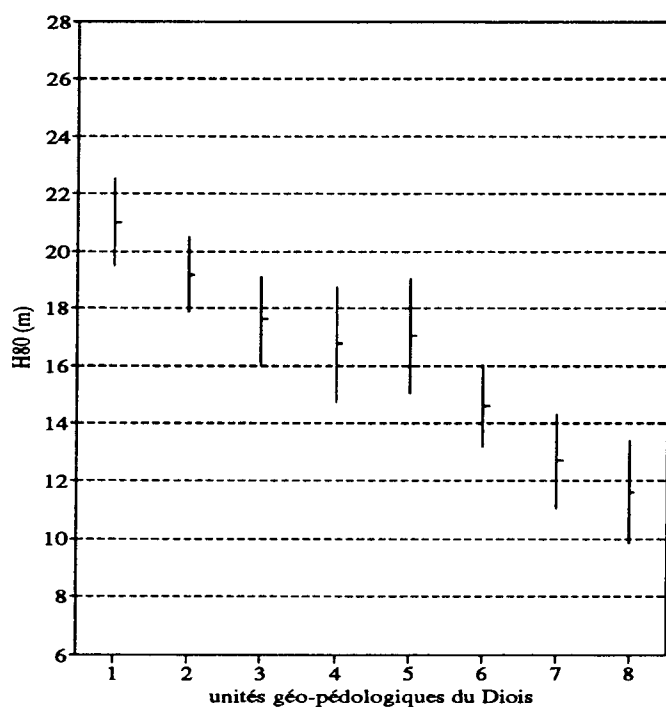
Représentation de la moyenne et de l'intervalle de confiance sur l'indice de fertilité moyen H₈₀.

- "1" : Cal. durs du plateau
- "2" : Colluvium épais
- "3" : Cône torrentiel
- "4" : Terres Noires
- "5" : Bancs Cal. durs/Colluvium
- "6" : Colluvium mince
- "7" : Marnes de l'Argovien
- "8" : Cône torrentiel-Eboulis

FORETS DOMANIALES DE SOLAURE ET DE GLANDASSE

unités géo-pédologiques	effectif	moyenne H80 (m)	écart type (m)	écart population (m)	intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %	
Cal. durs du plateau	7 (+2)	21,016	0,946	0,749	19,503	22,528
Colluvium épais	9 (+2)	19,198	0,424	0,661	17,863	20,532
Cône torrentiel	7 (+1)	17,599	0,863	0,749	16,085	19,111
Terres Noires	4 (+1)	16,758	0,877	0,991	14,756	18,759
Bancs Cal. durs/Colluvium	4 (+1)	17,045	0,430	0,991	15,044	19,046
Colluvium mince	8	14,623	0,366	0,701	13,207	16,038
Marnes de l'Argovien	6 (+3)	12,701	1,200	0,809	11,067	14,335
Cône torrentiel-Eboulis	5	11,614	1,036	0,887	9,824	13,404
Total	50	16,591	0,280	0,280	16,025	17,157

Dans la colonne "effectif" figure les effectifs de chaque unité géo-pédologique, suivis entre parenthèses du nombre de relevés supplémentaires issus de Glandasse.



Représentation de la moyenne et de l'intervalle de confiance sur l'indice de fertilité moyen H₈₀.

- "1" : Cal. durs du plateau
- "2" : Colluvium épais
- "3" : Cône torrentiel
- "4" : Terres Noires
- "5" : Bancs Cal. durs/Colluvium
- "6" : Colluvium mince
- "7" : Marnes de l'Argovien
- "8" : Cône torrentiel-Eboulis

SIGNIFICATIONS DE CES TROIS RESULTATS

Les résultats précédents nous permettent d'associer à une unité géo-pédologique un indice de fertilité ; chaque unité étant suffisamment bien décrite d'un point de vue écologique, pour pouvoir être repérée dans les massifs étudiés et permettre d'y déduire un indice de production, pour le *Pin noir* d'Autriche.

Globalement, on observe que cette essence est peut-être plus "productive" dans le versant nord du Ventoux (17,97 m) que dans la forêt domaniale de Solaure (16,54 m) ou dans l'ensemble "Solaure-Glandasse" (16,59 m) ; et que sa variabilité sur la moyenne est moins forte dans le Ventoux ($\sigma = 0,26$ m dans le Ventoux, $\sigma = 0,34$ m à "Solaure" et $\sigma = 0,28$ dans les forêts de "Solaure et Glandasse"). On peut déduire de ce résultat que les situations écologiques sont globalement plus mauvaises sur le plan de la production du *Pin noir* d'Autriche dans le Diois que dans le Ventoux.

Dans le Ventoux, l'amplitude écologique est plus importante que dans le Diois ; ainsi, l'ensemble des unités géo-pédologiques du Ventoux se répartissent depuis les "zones d'atterrissements" particulièrement favorables ($H_{80} = 24,70$ m) jusqu'aux "éboulis vifs", autre situation extrême, mais cette fois extrêmement défavorable ($H_{80} = 9,75$ m). Par contre, dans le Diois, cette amplitude est plus réduite, les "calcaires durs du plateau" s'opposent aux "cônes torrentiel-éboulis", avec un indice de fertilité qui passe de 20,89 m à 11,61 m (voir les différents graphiques représentant l'indice de fertilité moyen et son écart-type pour chaque unité géo-pédologique).

Certaines unités sont sous-échantillonnées (effectif < 5), car elles représentent un espace restreint dans le massif considéré ; dans ces quelques cas, il faut utiliser avec précaution les valeurs sur l'indice de fertilité, les écarts types devenant très grands (> 1 m).

Dans le cas particulier du Diois, une amélioration des résultats apparaît par la seule augmentation des effectifs de certaines unités géo-pédologiques entre "Solaure" et "Solaure-Glandasse". De façon systématique les "écarts types" diminuent pour toutes ces unités, par suite leur intervalle de confiance autour de la moyenne est réduit, ce qui affine la précision sur la moyenne.

Dans la mesure où chaque unité géo-pédologique des deux massifs forestiers tests étudiés est caractérisée par un indice de fertilité moyen, nous pouvons à présent essayer de les affecter d'un taux de calcaire actif. Cette variable écologique, qualifiée de fonctionnelle, est essentielle dans la caractérisation des unités géo-pédologiques, puisqu'elle conditionne la croissance des peuplements de *Pin noir* d'Autriche.

3) ILLUSTRATION DES UNITES GEO-PEDOLOGIQUES PAR LE CALCAIRE ACTIF

L'exposé que nous faisons dans ce paragraphe correspond à un type de traitement effectué seulement à l'échelle du massif forestier test, à partir des analyses menées en laboratoire sur le calcaire actif. Chaque relevé des massifs du Ventoux et de Solaure dispose d'un résultat concernant le calcaire actif. Par ailleurs, ces résultats ont fait l'objet d'une description fine dans la "partie I", à propos de la "Description des unités géo-pédologiques".

Le terme de "variable fonctionnelle" dans le cas du calcaire actif correspond à une variable du milieu interne à la composition du sol, qui influence la croissance en hauteur du *Pin noir* d'Autriche en inhibant l'assimilation de certains éléments nutritifs, tel que le fer provoquant éventuellement une "chlorose ferrique" (BAIZE D., 1990). Ce facteur est donc essentiel pour exprimer la croissance du *Pin noir* ; en laboratoire, nous avons choisi quelques grandeurs à analyser, afin de mieux cerner son influence sur la production. Les variables retenues sont les suivantes :

- * Pourcentage en calcaire total dans l'horizon "A1", "CO3CAIT" et dans l'horizon "C", "CO3CACT",
- * Teneur en calcaire actif en pourcentage du sol total de l'horizon "A1", "CO3CA1" et de l'horizon "C", "CO3CAC",
- * Teneur en calcaire actif en pourcentage de la fraction < 50 μ m, dans l'horizon "A1", "CO3CAITF" et dans l'horizon "C", "CO3CACTF",
- * Pourcentage de la fraction "argile+limon" en pourcentage de sol dans l'horizon "A1", "TFA1SC" et dans l'horizon "C", "TFCSC" (déduction faite du calcaire actif),
- * Pourcentage de la fraction < 50 μ m en pourcentage de sol, dans l'horizon "A1", "TFA1" et dans l'horizon "C", "TFC".

Cinq variables quantitatives pour les horizons "A1" et "C", concernant le calcaire actif ont été tirées des analyses pratiquées en laboratoire. Ce nouvel échantillon de variables

dites "complexes" a donné lieu à deux types d'approches pour décrire l'indice de fertilité. Une approche, qui permet de caractériser plus finement la description du paysage grâce aux unités géo-pédologiques, et une autre approche passant par la construction de nouvelles expressions de la fertilité du *Pin noir* d'Autriche, que nous allons aborder dans la partie concernant "l'approche analytique".

Dans cette partie, nous voulons affecter aux unités géo-pédologiques répertoriées dans les forêts domaniales du Ventoux et de Solaure, un taux de calcaire actif pour chaque horizon "A1" et "C", des différents échantillons. Par voie de conséquence, les unités géo-pédologiques étant affectées d'un indice de fertilité, nous pourrions associer à ces indices de fertilité des variables "complexes" caractéristiques du calcaire actif.

VERSANT NORD DU VENTOUX

Avant de décrire le lien entre les unités géo-pédologiques et les variables exprimant le calcaire actif, il faut par une "analyse de variance", établir l'existence ou non de ce lien. Ce test, dont les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant, indique que deux variables décrivant le calcaire actif, sont susceptibles de caractériser les unités géo-pédologiques établies dans le Ventoux ; car nous avons choisi un seuil "F-ratio" > 4.

Facteurs analysés	F-ratio	Sig. level
CO3CA1T	3,395	0,0062
CO3CACT	1,566	0,1679
CO3CA1	6,503	0,0001
CO3CAC	4,168	0,0013
CO3CA1TF	8,037	0,0000
CO3CACTF	5,060	0,0003
TFA1SC	2,020	0,0758
TFCSC	2,608	0,0221
TFA1	0,953	0,4889
TFC	1,554	0,1717

En "analyse de variance" le test sur le "F-ratio" permet de vérifier qu'il existe une liaison entre les unités géo-pédologiques et les diverses variables décrivant le calcaire actif.
(si "F-ratio" > 4, il existe une liaison)

Le tableau suivant offre le pourcentage moyen, ainsi que l'écart-type associé et l'effectif, des deux variables en liaison avec chaque unité géo-pédologique. A titre de rappel, les unités géo-pédologiques sont illustrées par leur indice de fertilité H_{80} .

A l'échelle du massif forestier

unités géo-pédologiques		H80 50 rel.	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % de sol	
			A1	C	A1	C
Zone d'atter- rissement	moy. (σ) eff.	24,70 0,89 2	0,21 - 1	0,81 - 1	0,13 - 1	0,44 - 1
Colluvium épais (> 50 cm)	moy. σ eff.	20,09 0,40 18	1,85 0,33 17	5,95 2,10 16	1,06 0,20 17	3,85 1,24 16
Calcaires durs (< 50 cm)	moy. σ eff.	19,80 0,38 9	6,27 3,70 7	21,14 7,30 5	3,90 2,18 7	15,16 5,50 5
Calcaires grèseux (< 50 cm)	moy. σ eff.	18,41 1,58 3	8,12 3,33 3	13,93 1,87 3	4,11 1,85 3	9,38 2,02 3
Brèches (< 50 cm)	moy. σ eff.	18,13 0,55 3	4,37 4,00 2	14,40 8,70 3	2,11 1,91 2	10,53 6,77 3
Grèze (< 50 cm)	moy. σ eff.	15,18 1,06 4	17,34 9,23 4	26,38 12,05 4	7,82 3,68 4	15,59 7,05 4
Cône torrentiel	moy. (σ) eff.	15,08 - 1	41,91 - 1	45,68 - 1	19,28 - 1	23,75 - 1
Calcaires marneux (< 50 cm)	moy. σ eff.	14,46 1,07 5	15,07 4,85 5	23,02 5,57 5	7,08 2,29 5	16,14 3,74 5
Marnes	moy. (σ) eff.	12,41 - 1	X - 1	50,79 - 1	X - 1	38,60 - 1
Eboulis vifs	moy. σ eff.	9,75 1,31 4	51,83 - 1	45,50 4,89 3	21,77 - 1	22,17 1,57 3
	F-ratio	19,86	8,04	5,06	6,50	4,17

**Ventoux
"Analyse de Variance"**

**unités géo-pédologiques en
liaison avec des variables
illustrant le calcaire actif.**

♦ Teneur en calcaire actif des
différents horizons "A1" et "C",
sont donnés :

moyenne : "moy."
écart-type : "σ"
effectif : "eff."

♦ Indice de fertilité : H₈₀ par unités
géo-pédologiques.

♦ Test "F-ratio" pour mesurer le
lien entre :

*unités géo-pédologiques et
l'indice de fertilité,

*unités géo-pédologiques et le
calcaire actif.

De ces résultats pour le versant nord du Ventoux, il faut retenir que la liaison entre le calcaire actif et les unités géo-pédologiques est forte. De plus, il faut remarquer que très globalement les deux expressions "teneur en calcaire actif en pourcentage de la fraction < 50 µm" et "teneur en calcaire actif en pourcentage de sol" sont homologues, car les teneurs en fraction < 50 µm en "A1" et "C" varient très peu d'un relevé à l'autre. En effet, pour l'horizon "A1," les cinquante relevés ont pratiquement le même pourcentage de fraction < 50 µm, soit environ 55 % ; et il en est de même pour l'horizon "C" avec 70 % de fraction < 50 µm par échantillon. Par suite, les deux colonnes "A1" et les deux colonnes "C" sont proportionnelles et elles s'ordonnent de la même façon. Aussi la "teneur en calcaire actif

en pourcentage de sol" aurait suffi à classer les unités géo-pédologiques, en tenant compte du gradient "A1-C".

Dans le tableau précédent, les unités géo-pédologiques étant classées en fonction d'un indice de fertilité décroissant, on note un classement inverse pour le taux de calcaire actif à trois exceptions près : les "Brèches", les "Calcaires marneux" et les "Calcaires durs".

- * Pour les "Brèches" rappelons que d'une part l'effectif des relevés est insuffisant et que d'autre part, les indices de fertilité des "Calcaires durs", des "Calcaires gréseux" et des "Brèches" sont assez comparables autour de 18 à 19 m, ce qui correspond à une fourchette de calcaire actif entre 4 et 8 % pour l'horizon "A1" et 14 à 21 % pour l'horizon "C" ; d'où un classement difficile entre ces trois unités géo-pédologiques, sachant que l'unité géo-pédologique de la "Brèche" correspond à des arbres poussant non pas sur la brèche, où a été effectuée la fosse pédologique, mais en bordure de celle-ci, donc sur un sol assez favorable (voir la description de l'unité géo-pédologique "Brèche"). Finalement, cette unité géo-pédologique peut être comparée aux "Calcaires durs", avec toutefois moins de fissuration et davantage de cimentation, d'où un indice de fertilité légèrement plus faible.
- * Les "Calcaires marneux" présentent un taux de calcaire actif assez variable suivant les relevés (voir la description de l'unité géo-pédologique "Calcaire marneux") par suite la valeur moyenne fournie n'a que peu de sens. L'indice de fertilité s'explique bien par un taux de calcaire actif plutôt élevé, face à une texture à tendance plus grossière et une réserve utile faible.
- * Les "Calcaires durs" ont un taux de calcaire actif moyen (21 % pour l'horizon "C") pour un indice de fertilité H_{80} approchant les meilleures valeurs (20 m). Ce taux peu favorable de calcaire actif doit être compensé par une réserve utile correcte, grâce à la présence de fissures et par une texture très nettement plus fine.

FORET DOMANIALE DE SOLAURE

Comme pour le versant nord du Ventoux, le tableau ci-dessous indique l'existence, pour "F-ratio" > 4, de liaisons entre unités géo-pédologiques et variables traduisant le calcaire actif.

Facteurs analysés	F-ratio	Sig. level
CO3CA1T	5,789	0,0003
CO3CACT	10,801	0,0000
CO3CA1	6,194	0,0002
CO3CAC	5,220	0,0011
CO3CA1TF	9,494	0,0000
CO3CACTF	8,351	0,0000
TFA1SC	3,302	0,0109
TFCSC	6,058	0,0004
TFA1	1,429	0,2334
TFC	1,098	0,3971

En "analyse de variance" le test sur le "F-ratio" permet de vérifier qu'il existe une liaison entre les unités géo-pédologiques et les diverses variables décrivant le calcaire actif.
(si "F-ratio" > 4, il existe une liaison)

Pour la forêt domaniale de Solaure, la liaison entre calcaire actif et découpage en unités géo-pédologiques paraît plus forte et concerne davantage de variables "calcaire actif".

Les quatre variables concernées permettent de caractériser les unités géo-pédologiques, déjà affectées par un indice de fertilité. Comme pour le Ventoux, on retrouve pour chaque unité géo-pédologique la moyenne du pourcentage de calcaire actif, l'écart-type de la moyenne de ce pourcentage et un effectif, pour les horizons "A1" et "C".

**Forêt domaniale de Solaure "Analyse de variance"
unités géo-pédologiques en liaison avec des variables illustrant le calcaire actif.**

- ◆ Pourcentage en calcaire total dans les horizons "A1" et "C",
- ◆ Pourcentage de la fraction "argile+limon" en pourcentage de sol dans l'horizon "C",
- ◆ Pourcentage en calcaire actif en pourcentage de la fraction < 50 µm des horizons "A1" et "C",
- ◆ Teneur en calcaire actif en pourcentage du sol total des horizons "A1" et "C",

- ◆ Indice de fertilité : H₈₀ par unités géo-pédologiques.

- ◆ Test "F-ratio" pour mesurer le lien entre :
 - * unités géo-pédologiques et l'indice de fertilité,
 - * unités géo-pédologiques et le calcaire actif.

unités géo-pédologiques		H80 40 rel.	% de calcaire total		% de la fraction "argile+limon" en % de sol	Teneur en calcaire actif en % de la fraction < 50 µm		Teneur en calcaire actif en % du sol total	
			A1	C	C	A1	C	A1	C
Cal.durs du plateau	moy.	20,89	17,11	13,15	68,45	9,89	4,93	6,07	3,55
	σ	1,31	5,28	-	-	6,94	-	3,94	-
	eff.	5	4	1	1	4	1	4	1
Colluvium épais sur grèze	moy.	19,20	6,29	12,36	66,20	2,71	4,53	1,36	2,95
	σ	0,52	1,07	2,19	6,5	0,59	0,97	0,35	0,52
	eff.	7	7	7	7	7	7	7	7
Cône torrentiel	moy.	18,02	39,57	48,99	32,23	44,74	44,46	21,37	27,17
	σ	0,90	9,67	8,05	6,17	9,00	9,19	4,74	7,42
	eff.	6	5	5	5	5	5	5	5
Terres Noires	moy.	17,24	17,88	23,84	55,04	12,77	21,85	5,70	15,45
	σ	1,04	2,57	6,58	1,48	0,35	3,76	0,30	2,99
	eff.	3	3	2	2	3	2	3	2
Bancs Cal. dur/colluvium mince	moy.	16,95	21,16	34,73	54,39	12,45	20,50	6,25	13,62
	σ	0,59	3,50	1,44	8,40	3,61	6,50	1,35	3,40
	eff.	3	3	2	2	3	2	3	2
Colluvium mince sur grèze	moy.	14,62	23,11	30,70	45,88	24,77	23,44	13,00	13,87
	σ	0,37	2,13	3,75	3,96	5,20	5,11	2,61	2,90
	eff.	8	8	8	8	8	8	8	8
Marnes de l'Argovien	moy.	12,37	31,54	58,15	34,21	49,02	53,24	24,65	38,79
	σ	2,53	2,76	5,96	5,79	5,20	7,29	6,69	4,79
	eff.	3	3	2	2	3	2	3	2
Cône torrentiel Eboulis	moy.	11,61	31,36	56,61	24,26	41,96	51,29	19,27	28,24
	σ	1,04	3,53	2,77	1,96	4,52	5,30	4,75	7,20
	eff.	5	3	4	4	3	4	3	4
	F-ratio	11,37	5,79	10,80	6,06	9,49	8,35	6,19	5,22

Logiquement la décroissance de l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche correspond à une décroissance de la fraction "argile+limon" et à une augmentation du calcaire actif et du calcaire total. Ces deux variables sont étroitement corrélées ; cependant il faut noter une exception : l'unité du "Cône torrentiel". Cette unité géo-pédologique présente un

A l'échelle du massif forestier

indice de fertilité correct, pour ce domaine d'étude, $H_{80} = 18,0$ m associé à un pourcentage de la fraction "argile+limon", appartenant aux valeurs les plus faibles : 32,23 %.

Par contre, les différents taux de calcaire actif, mesurés pour les horizons "A1" et "C" évoluent en sens inverse par rapport à la fertilité. Ainsi, la décroissance de la production correspond à un pourcentage en calcaire total dans l'horizon "C" qui varie de 13,15 % à 58,15 %.

EN CONCLUSION

Afin de préciser l'action négative du calcaire actif sur les arbres, il faut savoir que : le calcaire actif, très réactif dans le sol, constitue la fraction de calcaire du sol qui existe à l'état de particules très fines $< 50 \mu\text{m}$, capables d'être facilement dissoutes. Il est sous la dépendance de deux phénomènes antagonistes : la décarbonatation et la carbonatation (DUCHAUFOR Ph., 1984). La **décarbonatation** consiste en la perte par lessivage sous forme de nitrates, de bicarbonates et de sels organiques du calcaire actif des profils pédologiques ; il s'agit d'un processus lent qui évolue depuis les horizons "A" vers l'horizon "C". A l'inverse, la **carbonatation** bloque la pédogénèse, par la constitution d'agrégats très stables, liés à la présence de calcaire actif. Ces phénomènes alternent sous l'influence du climat, de la saison (hiver : décarbonatation et été : carbonatation). Un excès de calcaire actif exerce une action physiologique chez le végétal, qui se traduit par une déficience dans l'absorption du fer, pouvant aller jusqu'à la chlorose (BAIZE D., 1990). Le *Pin noir* d'Autriche est une essence résistante au calcaire actif ; cependant, introduit dans des milieux extrêmes (marnes, éboulis), il présente parfois des signes de chlorose.

En résumé, le lien entre le taux de calcaire actif et l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche peut être exprimé par les correspondances rassemblées dans le tableau ci-dessous :

Teneur en calcaire actif en % de la fraction $< 50 \mu\text{m}$ dans l'horizon "C"	H_{80}
0 à 10 %	19 m et plus
10 à 20 %	17 à 19 m
20 à 40 %	15 à 17 m
40 % et plus	15 m et moins

4) CONCLUSION

L'**approche synthétique** du milieu grâce aux unités géo-pédologiques, qui vient d'être proposée constitue une première possibilité pour aborder les relations entre le milieu et la production. Elle consiste en une description préalable du milieu ; pour cela, il faut sillonner et comprendre le milieu, y faire l'inventaire les descripteurs les plus significatifs et ensuite tenter un découpage en fonction des variables écologiques sélectionnées. Etant donné que la composition floristique dans certains relevés est hétérogène (à cheval sur plusieurs milieux), ce découpage en "unité géo-pédologique" est plus grossier, qu'une stratification aboutissant à une étude stationnelle. Mais il procède d'un même principe, consistant à exprimer le milieu sous forme d'entités globalement homogènes, qui sont ensuite mises en relation avec la production. On constate que ce niveau de découpage en unités géo-pédologiques est suffisant, dans notre étude du *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales. En effet, dans une étude "station-production", bien souvent des regroupements entre stations écologiquement proches sont pratiqués, car leur indice de fertilité ne présente aucune différence significative ; dans la mesure où certaines variables, servant à différencier les stations, ne sont pas significatives pour distinguer l'indice de fertilité.

Cette démarche synthétique montre par les résultats, toute son importance. En effet, 70 à 80 % de la variabilité expliquée sur H_{80} peut être exprimée par cette stratification du milieu, soit un chiffre identique à celui que nous trouverons ultérieurement par une approche analytique. Faut-il en conclure que nous avons su exprimer la totalité de l'information contenue dans cette relation entre le milieu et la production, à l'échelle la plus grande ?.

Cette approche synthétique est donc un premier moyen pour répondre au sujet. Elle est à rapprocher d'une approche analytique, reposant sur les liaisons "directes" entre les descripteurs du milieu, le calcaire actif et l'indice de fertilité. Cette nouvelle procédure fait l'objet du paragraphe suivant.

II) APPROCHE ANALYTIQUE : VERS UNE MODELISATION

L'objet de ce chapitre est de pouvoir construire une expression simple de l'indice de fertilité " H_{80} ", en fonction de quelques variables écologiques particulièrement pertinents. Cette expression élaborée grâce à notre échantillon de relevés est en premier lieu *descriptive* de la situation du *Pin noir* d'Autriche dans le massif forestier retenu. Nous testerons ultérieurement sa capacité *prédictive*, dans une phase d'extrapolation, en déterminant pour des relevés supplémentaires, toujours tirés au hasard, leur indice de fertilité.

1) RESULTATS DE L'ANALYSE DES DONNEES

Deux renseignements sont tirés de l'analyse factorielle des correspondances, qui font l'objet des deux paragraphes suivants.

1.1) Expression de H_{80} à partir des axes factoriels issus de l'analyse des correspondances

L'analyse des correspondances réalisée sur le tableau disjonctif complet [relevés/modalités de variables milieu] (126 modalités écologiques dans le Ventoux, 125 modalités écologiques dans le Diois), fournit entre autres comme résultat des axes factoriels (AFC1, AFC2, AFC3, AFC4, AFC5). Ces axes sont des combinaisons linéaires de la totalité des modalités du milieu, et ils présentent la particularité d'être orthogonaux entre eux. Sur l'observation des résultats, nous avons retenu pour le Ventoux comme pour le Diois cinq axes, c'est-à-dire cinq nouvelles variables écologiques.

Puisqu'il s'agit de variables écologiques combinant de nombreuses variables "simples" ou "complexes" de forme qualitative, nous avons essayé de construire une expression de la fertilité grâce aux axes factoriels de l'A.F.C.. Les résultats obtenus sont les suivants :

VERSANT NORD DU VENTOUX

Paramètres de l'analyse des correspondances

- * Nombre de lignes du tableau disjonctif complet = 50 relevés,
- * Nombre de colonnes du tableau disjonctif complet = 126 modalités écologiques,
- * Pourcentage d'inertie cumulée sur les cinq premiers axes de l'analyse des correspondances = 28,92 %.

Régression linéaire multiple pas à pas : $H_{80} = f(\text{AFC1}, \text{AFC2}, \text{AFC3}, \text{AFC4}, \text{AFC5})$

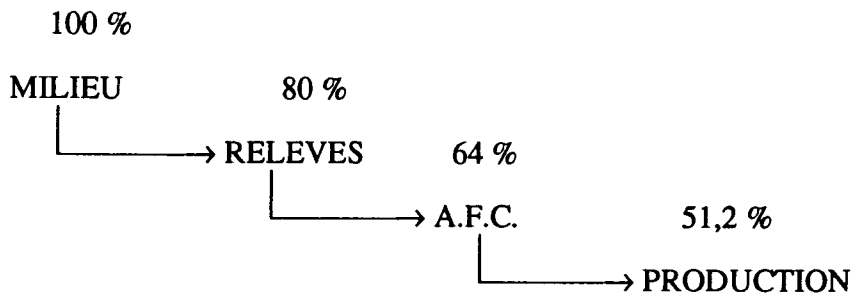
$$H_{80} = 17,97 - 1,41 \text{ AFC1} - 4,30 \text{ AFC2} - 2,98 \text{ AFC3} + 2,35 \text{ AFC5}$$

(en mètres)

$R^2 = 0,60$	(R^2 = coefficient de détermination)
$R^2_{\text{adj}} = 0,56$	(R^2_{adj} = coefficient de détermination en fonction de l'effectif)
$F = 16,76$	(F = test de Fisher)
$SE = 2,57 \text{ m}$	(SE = erreur standard)

Cette expression de l'indice de fertilité est fonction de la totalité des variables du milieu contenues dans les quatre axes factoriels. Elle offre 56 % de variabilité expliquée sur l'indice de fertilité. Ce chiffre est inférieur aux résultats de la relation "unités géo-pédologiques du Ventoux et H_{80} " (81,7 %) ; il faut donc immédiatement signaler que ces axes factoriels permettent de structurer le milieu d'une façon non pertinente pour H_{80} .

L'explication la plus simple que nous puissions trouver est la suivante ; cette régression multiple pas à pas sur les cinq axes factoriels intervient après une *succession de traitements emboîtés*. Or, on sait que plus la chaîne des traitements est longue, plus la perte d'information est grande. Voici le détail de cette chaîne de traitements :



Dans le cas présent, en partant du milieu, on collecte quelques relevés, supposés représentatifs de ce milieu. Puis sur ces relevés, identifiés grâce à des variables écologiques choisies à priori, une **analyse des correspondances** est pratiquée. Elle offre comme résultats 49 axes factoriels (combinaisons linéaires de variables du milieu), mais seuls les **cinq premiers** (les plus significatifs) sont retenus. Enfin, une régression linéaire multiple pas à pas extrait parmi les cinq premiers axes les plus significatifs pour décrire la **production** ; finalement quatre axes sont retenus. Dans l'hypothèse où l'on suppose de *façon théorique* que la perte d'information à chaque étape se chiffre à 20 %, au bout de la chaîne des traitements il reste 51,2 % d'information. Un tel résultat nous permet de conclure que dans le cas du Ventoux, l'expression de H_{80} suivant ces axes factoriels offre un pourcentage d'explication correct de 56 %.

Par contre, les unités géo-pédologiques sont une expression directe du milieu ; cette stratification contient la totalité de l'information écologique. L'expression de l'indice de fertilité par ces unités géo-pédologiques est issue d'un *unique traitement*, soit un bon pourcentage de variabilité expliquée sur H_{80} par le milieu (81,7 %).

FORET DOMANIALE DE SOLAURE

Paramètres de l'analyse des correspondances

- * Nombre de lignes du tableau disjonctif complet = 40 relevés,
- * Nombre de colonnes du tableau disjonctif complet = 125 modalités écologiques,

A l'échelle du massif forestier

- * Pourcentage d'inertie cumulée sur les cinq premiers axes de l'analyse des correspondances = 37,91 %.

Régression linéaire multiple pas à pas : $H_{80} = f(\text{AFC1}, \text{AFC2}, \text{AFC3}, \text{AFC4}, \text{AFC5})$

$$H_{80} = 16,54 - 2,28 \text{ AFC1} + 2,56 \text{ AFC5} \quad (\text{en mètres})$$

$$F = 6,66$$

$$R^2 = 0,264$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,225$$

$$SE = 3,18 \text{ m}$$

L'expression de H_{80} énoncée à partir de deux axes factoriels ne fournit que 26,4 % d'information, soit un pourcentage faible d'explication de H_{80} par des combinaisons de variables écologiques. Cette perte d'information est en partie liée à la succession des traitements énoncés plus haut, pour le cas du Ventoux.

FORETS DOMANIALES DE SOLAURE ET DE GLANDASSE

Paramètres de l'analyse des correspondances

- * Nombre de lignes du tableau disjonctif complet = 50 relevés,
- * Nombre de colonnes du tableau disjonctif complet = 125 modalités écologiques,
- * Pourcentage d'inertie cumulée sur les cinq premiers axes de l'analyse des correspondances = 33,78 %.

Régression linéaire multiple pas à pas : $H_{80} = f(\text{AFC1}, \text{AFC2}, \text{AFC3}, \text{AFC4}, \text{AFC5})$

$$H_{80} = 16,59 - 1,49 \text{ AFC1} + 2,77 \text{ AFC2} \quad (\text{en mètres})$$

$$F = 8,28$$

$$R^2 = 0,260$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,229$$

$$SE = 3,12 \text{ m}$$

Cette expression est plus robuste que celle reposant sur les 40 relevés de Solaure, d'où un léger accroissement du "F". Par contre, le "R²" et "SE" restent stables. Ce pourcentage mauvais ($R^2 = 0,26$) dans le cas du Diois, s'explique peut-être d'une part, par une mauvaise perception du milieu, dans le sens où certaines variables écologiques indispensables à l'expression de la production n'ont pas été récoltées et d'autre part, des éléments extérieurs au milieu jouent un rôle plus important pour expliquer la production, dans le Diois que dans le Ventoux (peut-être une sylviculture plus diversifiée).

Les résultats concernant les relations entre les unités géo-pédologiques et la production sont plus faibles que ceux enregistrés dans le Ventoux ($R^2 = 0,733$).

Cette tentative pour exprimer la production grâce aux axes factoriels ne semble pas très concluante, aussi allons nous aborder à présent une autre façon d'utiliser l'analyse des données. L'objectif est différent, puisque l'analyse des correspondances est pratiquée sur un nouveau type de tableau, afin de sélectionner les variables du milieu les plus significatives pour décrire l'indice de fertilité.

1.2) L'ensemble des variables écologiques significatives pour décrire H_{80}

Grâce à l'analyse des données, nous voulons dans ce paragraphe sélectionner les variables les plus significatives pour décrire l'indice de fertilité H_{80} . En effet, il est impossible de conserver la totalité des variables écologiques dans la mesure où elles ne sont pas toutes

A l'échelle du massif forestier

explicatives de H_{80} . L'analyse des données est alors un outil de sélection vers la modélisation de H_{80} par quelques variables écologiques.

Par exemple pour le Ventoux

	H1	modalités de variables "milieu"	126
classes de fertilité	1		
	H6		

L'analyse des correspondances sur la table de contingence offre pour chaque axe factoriel un pourcentage d'inertie. Les chiffres rassemblés dans le tableau suivant sont élevés et montrent que dans les trois cas, les plans factoriels constitués par les deux premiers axes (F1,F2) donnent une inertie supérieure à 50 %, ce qui signifie que les deux premiers axes disposent de plus de 50 % d'information concernant la relation entre le milieu et l'indice de fertilité (au total six axes factoriels).

	% inertie cumulée sur les axes	
	axes 1-2	axes 1-2-3-4-5
Ventoux (50 rel.)	62,68 %	91,12 %
Solaure (40 rel.)	57,31 %	87,40 %
Diois (50 rel.)	58,29 %	88,92 %

L'interprétation de l'analyse des correspondances permet de mettre en évidence les modalités du milieu, qui sont liées aux classes de fertilité. L'ensemble des modalités, issues de variables quantitatives ou qualitatives, les plus significatives pour exprimer H_{80} , sont réunies dans les tableaux suivants, sous une forme qualitative. Ultérieurement, les données quantitatives découpées en classes seront restituées à leur forme primaire, pour participer à l'expression de la fertilité. On définit une variable comme étant "significative" pour décrire H_{80} dans la mesure où, elle est représentée au minimum dans cinq relevés et que sa valeur en "CTR" (contribution aux axes) dans l'analyse des correspondances est supérieure à un seuil préalablement fixé.

VERSANT NORD DU VENTOUX

H1 : 20,9 à 25,59 m	H2 : 20,23 à 20,9 m	H3 : 18,755 à 20,23 m
épaisseur du profil > 1 m épaisseur de A1 < 10 cm R.U. de A1 < 10 mm latitude classe "1" altitude 950 à 1110 m pertes < apports (en eau)	affleurement rocheux nul latitude classe "4"	affleurement rocheux 20 % colluvium % élém. gros. BC 30 à 40 % % élém. gros. A1 30 à 40 %

A l'échelle du massif forestier

H4 : 17,52 à 18,755 m	H5 : 13,84 à 17,52 m	H6 : 6,77 à 13,84 m
calcaires durs épaisseur du profil < 50 cm épaisseur de A1 10 à 15 cm % élém. gros. BC 30 % à 40 % % élém. gros. A1 ≤ 30 % exposition NW mi-versant convexe	latitude classe "3" exposition E pente : 37 à 45 % grèze % élém. gros. BC 60 % texture de BC : SL	pente de 60 à 75 % altération très forte éboulis vifs calcaires marneux épaisseur < 50 cm R.U. du profil ≤ 30 mm

La classe de fertilité "H2" est très étroite (maximum = 20,9 m et minimum = 20,23 m), ce qui ne permet pas de la distinguer des classes de fertilité "H1" et "H3". Cependant l'observation du plan factoriel (1-2) montre que les classes de fertilité "H2" et "H3" sont quasiment confondues ; par suite, les variables "milieu" inventoriées dans le tableau précédent ont un sens pour décrire "H2" et "H3".

Variables retenues

Les modalités des variables, qui ont été sélectionnées, vont être utilisées afin de construire le modèle descriptif de croissance du *Pin noir* d'Autriche. Les variables retenues sont les suivantes :

les variables quantitatives :

- * Latitude (degré), "lati"
- * Altitude (m), "alti"
- * Pente (%), "pent"
- * Affleurement rocheux (%), "affl"
- * Epaisseur de l'horizon A1 (cm), "epaiA1"
- * Epaisseur du profil pédologique P (cm) (observation), "epaiP"
- * R.U. de l'horizon A1 (mm), "RUA1"
- * R.U. du profil pédologique P (mm), "RUP"
- * Eléments grossiers de l'horizon A1 (%), "caiA1"
- * Eléments grossiers du profil pédologique sauf A1 (%), "caiBC"

les variables qualitatives :

(ces modalités sont présentes dans au moins cinq relevés)

- * Exposition : Est, "E"
- * Exposition : Nord-Ouest, "NW"
- * Topographie du versant : mi-versant convexe, "Vconv"
- * Topographie stationnelle : pertes < apports (en eau), "P<A"
- * Altération : très forte, "alteF"
- * Roche : Eboulis calcaires, "eboulis"
- * Roche : Calcaires marneux, "calmar"
- * Roche : Calcaires durs, "caldur"
- * Roche : Grèze, "grèze"
- * Matériau sur la roche : Colluvium, "collu"
- * Epaisseur du profil : < 50 cm, "epai1"
- * Texture du reste du profil BC : sablo-limoneux, "txBCSL"

FORET DOMANIALE DE SOLAURE

De même pour la forêt de Solaure, les modalités des variables significatives sont regroupées dans les tableaux suivants :

A l'échelle du massif forestier

H1 : 19,85 à 23,93 m	H2 : 18,12 à 19,85 m	H3 : 16,45 à 18,12 m
altitude > 1000 m sols sur calcaires durs latitude classe "3" mi-versant concave R.U. du Profil pédo < 40 mm	mi-versant concave % d'élém. gros. dans BC 40 à 45 % pertes < apports (en eau) épaisseur de A1 ≤ 50 cm pierrosité 10 %	R.U. A1 20 à 40 mm pendage inverse latitude classe "2" exposition S
H4 : 14,92 à 16,45 m	H5 : 13,95 à 14,92 m	H6 : 7,43 à 13,95 m
% élém. gros. A1 40 à 45 % mi-versant rectiligne replat pertes = apports (en eau) pierrosité 20 à 30 %	pente 30 à 50 % grèze sol sur grèze % élém. gros. A1 40 à 45 % texture BC : équilibrée	% élém. gros. BC ≤ 35 % altération non visible texture de BC : SL

Variables retenues

les variables quantitatives

- * Altitude (m), "alti"
- * Pente (%), "pent"
- * Latitude (degré), "lati"
- * Epaisseur de l'horizon A1 (cm), "epaiA1"
- * R.U. du profil pédologique P (mm), "RUP"
- * Eléments grossiers de l'horizon A1 (%), "caiA1"
- * Eléments grossiers du profil pédologique sauf A1 (%), "caiBC"

les variables qualitatives

(forte "CTR" dans l'A.F.C. et caractérisées par au moins cinq relevés)

- * Exposition : Sud, "S"
- * Eléments grossiers du reste du profil : 40 à 45 %, "caiBC2"
- * Roche : Grèze, "grèze"
- * Matériau sur la roche : Sol sur la grèze, "SolG"
- * Matériau sur la roche : Sol sur calcaires durs, "SolCD"
- * Topographie du versant : mi-versant concave, "Vconc"
- * Topographie du versant : mi-versant rectiligne, "Vrect"
- * Topographie du versant : mi-versant convexe, "Vconv"
- * Topographie stationnelle : pertes = apports (en eau), "P=A"
- * Topographie stationnelle : pertes < apports (en eau), "P<A"
- * Pierrosité : 10 %, "pier1"
- * Pierrosité : 20 à 30 %, "pier23"
- * Pendage : inverse, "pendI"

FORETS DOMANIALES DE SOLAURE ET DE GLANDASSE

Pour le massif forestier test du Diois, qui correspond à "Solaure-Glandasse", nous avons repris le même protocole expérimental et la même chaîne de traitements.

les variables quantitatives

- * Altitude (m), "alti"
- * Pente (%), "pent"
- * Epaisseur de l'horizon A1 (cm), "epaiA1"
- * Epaisseur du profil pédologique (cm), "epaiP"

- * R.U. de l'horizon A1 (mm), "RUA1"
- * R.U. du profil pédologique P (mm), "RUP"
- * Eléments grossiers de l'horizon A1 (%), "caiA1"
- * Eléments grossiers du profil pédologique sauf A1 (%), "caiBC"

les variables qualitatives

(modalités affichant une forte "CTR" dans l'A.F.C. et caractérisées au moins par cinq relevés) :

- * Exposition : Sud, "S"
- * Roche : Grèze, "grèze"
- * Roche : Calcaires durs, "caldur"
- * Topographie du versant : mi-versant concave, "Vconc"
- * Topographie du versant : mi-versant rectiligne, "Vrect"
- * Topographie du versant : mi-versant convexe, "Vconv"
- * Topographie stationnelle : pertes > apports (en eau), "P>A"
- * Topographie stationnelle : pertes < apports (en eau), "P<A"
- * Texture de l'horizon A1 : LS, "txA1LS"
- * Pierrosité : 10 %, "pier1"
- * Pierrosité : 20 à 30 %, "pier23"
- * Pendage : inverse, "pendI"
- * Altération : présence, "alte"
- * Fissuration : présence, "fiss"

La liste des variables du milieu retenues dans le cas présent de la forêt domaniale de Solaure complétée par la forêt domaniale de Glandasse, est quasiment inchangée par rapport à la première liste écologique tirée du seul massif de Solaure.

2) REGRESSIONS LINEAIRES MULTIPLES EXPRIMANT LA PRODUCTIVITE EN FONCTION DE VARIABLES DU MILIEU

Il s'agit de construire pas à pas une **expression descriptive de la croissance** en hauteur dominante du *Pin noir* d'Autriche à partir de variables "simples" ou "complexes" issues de l'analyse des correspondances et citées plus haut. Par régression linéaire multiple, on extrait une à une les variables écologiques. Un seuil à ne pas franchir est fixé, il correspond à un test de Fisher systématique après chaque introduction, ou extraction, de variables écologiques dans le modèle.

VERSANT NORD DU VENTOUX

2.1) Les expressions milieu-production pour le Ventoux

Trois expressions de H_{80} sont proposées ci-dessous ; elles permettent de décrire environ 80 % de la variabilité totale de l'indice de fertilité. Elles sont composées d'un mélange de variables continues et de variables qualitatives (présence ou absence). Elles présentent une particularité, les expressions à sept variables sont emboîtées dans l'expression à huit variables ; elles sont obtenues par régression ascendante et descendante en ce qui concerne les expressions à sept variables, alors que l'expression à huit est simplement l'expression globale comportant la totalité des variables significatives pour décrire H_{80} .

modèle n°1 : 8 variables (global)

$$H_{80} = 17,853 - 0,053 \text{ pent} - 0,006 \text{ caiBC} + 0,068 \text{ RUP} + 2,592 \text{ P<A} \\ - 3,974 \text{ éboulis} - 1,865 \text{ calmar} + 3,032 \text{ caldur} - 1,27 \text{ epail} \\ \text{(en mètres)}$$

F = 26,22
 R² = 0,836
 R²adj = 0,805
 SE = 1,72 m, soit 1,72/H₈₀moyen = 9,57 %

modèle n°2 : 7 variables (Backward)

$$H_{80} = 16,66 - 0,054 \text{ pent} - 0,007 \text{ caiBC} + 0,085 \text{ RUP} + 2,532 \text{ P<A} \\ - 4,263 \text{ éboulis} - 2,61 \text{ calmar} + 2,822 \text{ caldur} \\ \text{(en mètres)}$$

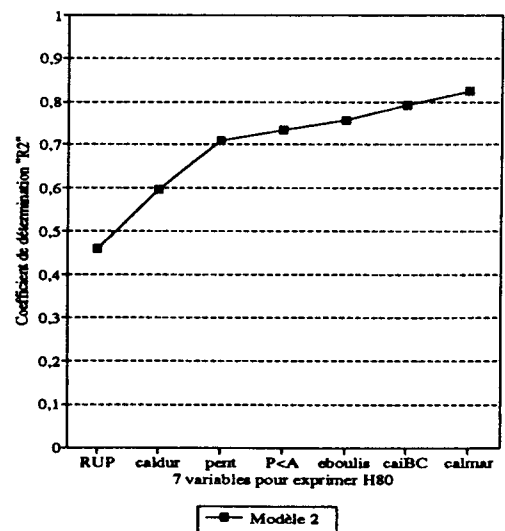
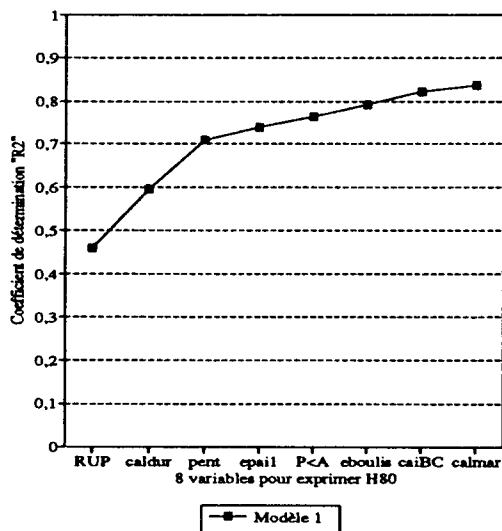
F = 28,08
 R² = 0,824
 R²adj = 0,795
 SE = 1,76 m, soit 1,76/H₈₀moyen = 9,8 %

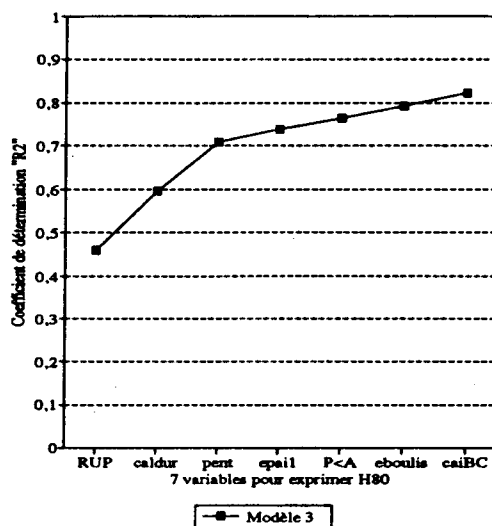
modèle n°3 : 7 variables (Forward)

$$H_{80} = 18,21 - 0,063 \text{ pent} - 0,006 \text{ caiBC} + 0,066 \text{ RUP} + 2,671 \text{ P<A} \\ - 3,22 \text{ éboulis} + 3,564 \text{ caldur} - 1,825 \text{ epail} \\ \text{(en mètres)}$$

F = 27,85
 R² = 0,823
 R²adj = 0,793
 SE = 1,77 m, soit 1,77/H₈₀moyen = 9,85 %

**Représentation de l'information sur H₈₀
 apportée par chaque variable
 dans les trois modèles du Ventoux**





Les trois expressions fournies précédemment sont très proches les unes des autres. Elles présentent toutes les trois, les trois mêmes variables continues : **la pente, la réserve utile du profil et le pourcentage en éléments grossiers du profil en dehors de l'horizon A1**. A ces variables quantitatives, s'ajoutent des qualitatives, qui dépendent toutes du système géo-pédologique, lequel est à relier à la teneur en eau ; on trouve donc **la topographie stationnelle (pertes en eau < apports), l'épaisseur du profil inférieure à 50 cm et trois types de roche en place : éboulis vif, calcaire marneux, et calcaire dur fissuré**.

De plus, en observant les trois représentations graphiques de l'information sur H_{80} apportée par chaque variable écologique, on note que systématiquement pour ces trois modèles, les trois premières variables sélectionnées sont dans l'ordre : "RUP", "caldur" et "pent". Elles se combinent sous la forme de l'expression suivante :

$$H_{80} = 14,95 - 0,085 \text{ pent} + 0,129 \text{ RUP} + 4,399 \text{ caldur}$$

(en mètres)

$$F = 37,14$$

$$R^2 = 0,708$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,689$$

$$SE = 2,17 \text{ m}$$

Ces trois variables, fournissant 71 % de la variabilité expliquée sur H_{80} sont primordiales, de sorte que les 4 ou 5 autres variables contenues dans les trois expressions de la fertilité du Ventoux apportent seulement 10 % d'information supplémentaire. Les graphiques montrent une ligne brisée constituée de deux segments de droites, dont la pente forte (71 % sur trois variables), s'écrase vers une "asymptote" (10 % avec 4 ou 5 variables).

On peut s'interroger à présent, dans le but de choisir la relation optimale "milieu/production", parmi les trois proposées. Les deux expressions à sept variables, ont la particularité d'être emboîtées dans l'expression à huit, ce qui nous autorise à effectuer un **test de Fisher sur les sommes des carrés des écarts**. La relation est la suivante :

$$SE^2 = \frac{SCE}{n-p-1}$$

SE (erreur standard) du modèle construit avec "p" variables du milieu sur "n" observations

A l'échelle du massif forestier

- * SCE_{n1} : Somme des carrés des écarts du modèle construit avec $n1$ variables
- * SCE_{n2} : Somme des carrés des écarts du modèle construit avec $n2$ variables
- * $n1 > n2$
- * N : effectif de l'échantillon

$$F_{\text{calculé}} = \frac{\frac{SCE_{n2} - SCE_{n1}}{n1 - n2}}{\frac{SCE_{n1}}{N - n1 - 1}} \quad \text{suit un Fisher } F(n1-n2, N-n1-1)$$

Au risque 5 %

Test modèle n°1 X modèle n°2
 $F_{\text{calculé}} = 2,976 < F(1,41) = 4,08$

Test modèle n°1 X modèle n°3
 $F_{\text{calculé}} = 3,477 < F(1,41) = 4,08$

Le test de Fisher effectué ci-dessus montre que la relation à huit variables au lieu de sept apporte trop peu de renseignements supplémentaires sur l'indice de fertilité, ($F_{\text{calculé}} < F(n1-n2, N-n1-1)$) pour être prise en considération. Par suite, les deux relations à sept variables peuvent être considérées comme étant "optimales" et suffisamment précises pour décrire H_{80} . Par contre, il est délicat de choisir une des deux expressions à sept variables étant donné que leur "F", "R²", "R²adj" et "SE" sont quasiment identiques.

Enfin, nous proposons ci-dessous la *table des corrélations* concernant l'ensemble des huit variables du milieu retenues dans les expressions précédentes.

pent	1,000								
RUP	-0,125	1,000							
caiBC	-0,220	-0,238	1,000						
P<A	-0,128	0,019	0,354	1,000					
eboulis	0,256	-0,483	-0,048	0,036	1,000				
calmar	0,170	-0,056	-0,087	-0,145	-0,111	1,000			
caldur	0,338	-0,074	-0,048	0,010	-0,187	-0,187	1,000		
epai1	0,211	-0,649	0,156	0,000	0,333	0,333	0,093	1,000	
vari.	pent	RUP	caiBC	P<A	eboulis	calmar	caldur	epai1	

Table des corrélations entre variables du milieu
 N = 50
 d.d.l. = 48
 il existe une corrélation, au risque 5 %, si $|\rho| > 0,273$.

Cette table des corrélations met en évidence au total six corrélations entre descripteurs du milieu, qui se réduisent à trois corrélations, dans la mesure où l'on retient le modèle n°2, c'est-à-dire sans prendre en considération "epai1".

2.2) Commentaires et interprétation écologique pour le Ventoux

Le test de Fisher qui vient d'être réalisé nous conduit à utiliser ultérieurement l'expression de la fertilité à sept variables ; cependant, dans cette approche du milieu les trois expressions étant étroitement imbriquées, nous avons travaillé sur l'ensemble des variables "milieu", soit la liste de l'expression n°1.

Les trois expressions de la fertilité du *Pin noir* d'Autriche expliquent plus de 80 % de variabilité totale sur H_{80} par des variables du milieu, en l'occurrence huit variables exprimant en premier lieu l'eau disponible. Ce pourcentage si élevé traduit le fait que la croissance du *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales dépend en priorité du milieu et que la sylviculture et l'origine génétique des peuplements sont bien contrôlés.

- * **les grandeurs quantitatives** : variant suivant le type de milieu,
 - ◆ Pente (%), "pent",
 - ◆ Pourcentage en éléments grossiers du profil pédologique sauf A1 (%), "caiBC",
 - ◆ Réserve utile (R.U.) du profil pédologique (P) (en mm), "RUP".
- * **les grandeurs qualitatives** : caractérisant le type de milieu
 - ◆ Topographie stationnelle : pertes < apports (en eau), "P<A",
 - ◆ Roche : Éboulis calcaires, "eboulis",
 - ◆ Roche : Calcaires marneux, "calmar",
 - ◆ Roche : Calcaires durs, "caldur",
 - ◆ Épaisseur du profil : < 50 cm, "epai1".

Ces grandeurs varient à l'échelle métrique, sauf le "pourcentage en éléments grossiers des horizons autre que A1" : "caiBC", qui varie suivant une échelle décimétrique.

Chaque variable, qui intervient dans le calcul de l'indice de fertilité a, soit une action positive, c'est-à-dire qu'elle accroît la valeur de H_{80} , soit une action négative, dans ce cas la valeur de H_{80} est diminuée. On distingue donc :

Action positive : H_{80} augmenté

- * **la réserve utile du profil pédologique** : (quantité d'eau pouvant être stockée) la réserve utile varie de 8 mm à 100 mm sur le versant nord du Ventoux ; il s'agit du facteur essentiel en zone méditerranéenne, qui présente un coefficient dans les expressions retenues assez élevé, de telle sorte que la hauteur du *Pin noir* augmente de façon conséquente : de moins d'un mètre à 8 m suivant les situations écologiques.
- * **la topographie stationnelle "P<A"** : lorsque les pertes en eau sont inférieures aux apports, le bilan hydrique est positif, ce qui favorise la croissance du peuplement. Ce facteur topographique dépend de l'alimentation en eau de la réserve utile. Il est associé à un coefficient de 2,5 m, cette valeur élevée complète donc l'influence de la réserve utile.
- * **le calcaire dur** : la réserve utile des sols sur calcaire dur est toujours sous-estimée, car il s'agit de **calcaire dur fissuré** ; le volume de terre fine situé dans les fissures (poches de sol), renferme des racines et conserve de l'humidité. Ce support de roche est l'un des meilleurs du versant nord du Ventoux, ses limites, concernant la production, proviennent de l'épaisseur du sol, qui le recouvre. D'après les expressions, sur "calcaire dur" le peuplement a un indice de fertilité accru de près de 3 m.

Action négative : H_{80} diminué

- * **la pente** : les pentes les plus fortes, en région méditerranéenne, accentuent les phénomènes de sécheresse et les glissements de sols, ce qui nuit à la croissance de l'arbre. Les pentes variant de 10 à 75 %, H_{80} , sous l'effet de la pente, perd de moins d'1 m à 4 m.
- * **le pourcentage en éléments grossiers** : un pourcentage élevé en éléments grossiers conduit à une insuffisance de terre fine, c'est-à-dire de la fraction parcourue par les racines, qui sert de réservoir en eau. Cette variable intervient déjà dans le calcul de la réserve utile et s'exprime encore individuellement ; ce qui tend à démontrer que les milieux, même ceux à réserve utile correcte, voient leur fertilité affectée par la présence d'une trop forte quantité en éléments grossiers. Il faut noter cependant que le coefficient de cette variable continue est dix fois plus petit que celui de la réserve utile ou de la pente ; par suite, H_{80} est réduit d'une hauteur inférieure à un mètre, il ne s'agit donc pas d'un paramètre décisif dans la détermination de la hauteur à 80 ans.
- * **l'éboulis vif** : il s'agit d'une situation extrême, très défavorable pour l'arbre, qui se combine à d'autres variables du milieu négatives, et qui correspond aux fertilités les plus basses. Le coefficient négatif dans les expressions de la fertilité est de l'ordre de 4 m.
- * **le calcaire marneux** : type de calcaire assez fréquent et défavorable au niveau du lit marneux, dont on évalue l'action négative sur la hauteur à environ 2 m.
- * **la profondeur du profil inférieure à 50 cm** : sol trop peu profond, qui n'offre pas à l'arbre un volume suffisant pour ses racines, sachant que ces peuplements nécessitent environ 80 cm d'épaisseur de sol prospectable par les racines ; à cela s'ajoute une réserve hydrique réduite. Au total, une profondeur de sol inférieure à 50 cm fait perdre un peu plus d'un mètre en hauteur au peuplement.

Les trois variables quantitatives, "pent", "caiBC", "RUP", font référence à la quantité d'eau disponible pour l'essence et donc au facteur limitant qu'elle représente. Il s'ajoute à ces trois éléments deux variables qualitatives, qui expriment encore l'eau disponible : "P<A" et "epail". Enfin, trois types de roches "caldur", "calmar", "eboulis" interviennent pour l'estimation de l'indice de fertilité. Elles correspondent à trois unités géopédologiques dont certains descripteurs sont mal définis ou inaccessibles (la fissuration, la profondeur, etc.),

FORET DOMANIALE DE SOLAURE

2.3) Les expressions milieu-production pour Solaure

En considérant la liste des 10 variables quantitatives et des 15 qualitatives, nous avons construit les régressions linéaires multiples, qui expriment " H_{80} " en fonction du milieu :

modèle n°1 : 7 variables (Backward)

$$H_{80} = - 3,389 + 0,0156 \text{ alti} + 0,1051 \text{ RUP} + 1,795 \text{ caiBC2} - 2,371 \text{ grèze} \\ + 2,799 \text{ P<A} + 2,114 \text{ pier1} + 3,03 \text{ pier23} \\ \text{(en mètres)}$$

A l'échelle du massif forestier

$$\begin{aligned} F &= 12,09 \\ R^2 &= 0,726 \\ R^2_{adj} &= 0,665 \\ SE &= 2,09 \text{ m, soit } 2,09/H_{80}\text{moyen} = 12,64 \% \end{aligned}$$

modèle n°2 : 6 variables

$$H_{80} = - 3,224 + 0,015 \text{ alti} + 0,119 \text{ RUP} - 2,106 \text{ grèze} + 2,909 \text{ P<A} \\ + 2,424 \text{ pier1} + 3,272 \text{ pier23} \\ \text{(en mètres)}$$

$$\begin{aligned} F &= 12,06 \\ R^2 &= 0,687 \\ R^2_{adj} &= 0,630 \\ SE &= 2,19 \text{ m, soit } 2,19/H_{80}\text{moyen} = 13,24 \% \end{aligned}$$

Comme pour le massif du Ventoux, ces deux expressions proches sont emboîtées, il faut donc choisir une relation que l'on considérera comme optimale. A cet effet, il suffit de mettre en place un **test de Fisher sur les sommes des carrés des écarts**, du type suivant :

$$SE^2 = \frac{SCE}{n-p-1} \quad \text{SE (erreur standard) du modèle construit avec "p" variables du milieu sur "n" observations}$$

- * SCE_{n1} : Somme des carrés des écart du modèle construit avec n1 variables
- * SCE_{n2} : Somme des carrés des écart du modèle construit avec n2 variables
- * $n1 > n2$
- * N : effectif de l'échantillon

$$F_{calculé} = \frac{\frac{SCE_{n2} - SCE_{n1}}{n1 - n2}}{\frac{SCE_{n1}}{N - n1 - 1}} \quad \text{suit un Fisher } F(n1-n2, N-n1-1)$$

Test modèle n°1 X modèle n°2

$$\begin{aligned} F_{calculé} &= 4,541 > F(1,32) = 4,17 \text{ au risque } 5 \% \\ F_{calculé} &= 4,541 < F(1,32) = 7,56 \text{ au risque } 1 \% \end{aligned}$$

Ce simple test de Fisher montre que la relation à sept variables apporte un peu plus d'information que la relation à six, au risque 5 % et non au risque 1 %. On peut donc légèrement privilégier le modèle à sept variables, en sachant que le modèle à six variables offre cependant un bon compromis.

2.4) Commentaires et interprétation écologique pour Solaure

Les deux expressions précédentes ont été établies à partir de quarante relevés effectués en juillet 1990, dans la forêt domaniale de Solaure (Diois), pour le *Pin noir* d'Autriche. Elles n'ont donc de valeur, que sur ce massif, puisque pour l'instant, nous n'avons pas testé la stabilité et la valeur de ces expressions, grâce à un complément d'échantillonnage.

A l'échelle du massif forestier

On observe d'après les résultats, qu'un peu plus de 70 % de la variabilité sur l'indice de fertilité est expliquée par 7 variables. Par suite, la hauteur dominante moyenne étant de 16,54 m avec une erreur standard supérieure à 2 m, l'imprécision sur H_{80} est de 12,64 ou 13,24 % suivant le modèle considéré. Le milieu représente donc une part importante dans l'explication de H_{80} . Ce chiffre élevé peut être expliqué par les origines et l'histoire de cette essence.

Si l'on observe en détail ces deux expressions de la fertilité, leurs composants sont deux grandeurs continues : **altitude** et **réserve utile** du profil pédologique (R.U.), d'une part et quatre ou cinq grandeurs qualitatives : la **grèze** (type de matériau-roche assez particulier correspondant au colmatage d'un colluvium ancien), le **pourcentage de pierrosité en surface** (10 % ou 20 à 30 %), un élément de **topographie stationnelle favorable** (pertes en eau < apports en eau) et le **pourcentage d'éléments grossiers dans les horizons du sol**.

Ces sept variables écologiques expriment une même réalité du milieu à savoir la teneur en eau disponible pour le *Pin noir* et une approche du support offert à cette essence. Ces deux pôles se retrouvent de la façon suivante :

- * **teneur en eau** : altitude, R.U., pierrosité, topographie stationnelle, pourcentage en éléments grossiers ;
- * **support pédologique** : R.U., type de roche particulier ("grèze"), pourcentage en éléments grossiers.

En reprenant une à une ces variables, on peut tenter de définir un rôle logique et naturel à chacune.

- * **Altitude** : il s'agit d'un gradient pluviométrique, qui fixe pratiquement l'indice de fertilité.

par exemple :

coefficient de l'altitude : 0,015,

◆ à 600 m : $0,015 \times 600 = 9$ m

◆ à 1100 m : $0,015 \times 1100 = 15$ m

⇒ H_{80} s'accroît de 1,5 m lorsque l'altitude augmente de 100 m, toutes choses égales par ailleurs.

- * **Réserve utile** : il s'agit de la quantité d'eau disponible pour la végétation ; c'est une combinaison entre la profondeur du sol, le pourcentage en éléments grossiers (> 2mm) et la texture. Après la réception au sol de l'eau, en fonction de l'altitude, il faut encore que des réserves se constituent, avec un maximum correspondant à la réserve utile.

par exemple :

coefficient de la R.U. : 0,1,

◆ pour une R.U. = 30 mm : $0,1 \times 30 = 3$ m

◆ pour une R.U. = 70 mm : $0,1 \times 70 = 7$ m

⇒ une augmentation de H_{80} de 1 m pour 10 mm de R.U. supplémentaire.

Ces deux variables mesurables sur le terrain montrent que l'indice de fertilité dépend en premier lieu de l'eau, sous la forme des apports extérieurs ("alti") et sous la forme de la capacité de stockage de l'eau dans le sol ("RUP").

Les variables qualitatives quant à elles viennent rectifier la valeur de l'indice de fertilité en l'affectant positivement ou négativement par une grandeur métrique. Ces quatre ou cinq variables caractérisent des situations mal appréhendées par les seules variables "altitude" et "R.U." et qui exigent un réajustement pour bien définir H_{80} . Parmi ces variables on retrouve :

- * **Grèze** : comme elle a été décrite précédemment, il s'agit d'un colluvium ancien colmaté et induré par précipitation dans la terre fine de carbonate de calcium. Cet horizon devient un obstacle à la pénétration des racines du *Pin noir* ; une telle

couche située à faible profondeur limite la profondeur pédologique utilisable par les racines, d'où une action négative sur la croissance de cette essence.

- * **Topographie stationnelle, "P<A"** : un bilan hydrique positif, cette situation topographique correspond à des stations, qui peuvent retenir l'eau et se constituer des réserves ; c'est donc une action positive sur la croissance de l'arbre, qui complète la réserve utile dans certaines situations très favorables, afin de mieux expliquer H_{80} .
- * **Eléments grossiers dans le sol et en surface, "pier1", "pier23" et "caiBC2"** : (action positive dans tous les cas) Ce facteur intervient dans le calcul de la réserve utile dans le sens où un fort pourcentage en éléments grossiers correspond à une faible quantité de terre fine (fraction qui retient l'eau), ce qui entraîne une diminution de la réserve utile. Un coefficient positif sur les éléments grossiers augmente la valeur de l'indice de fertilité, sous-estimé par une réserve utile réduite. Ceci tend à montrer que certaines particules supérieures à 2 mm peuvent retenir de l'eau disponible pour les racines ou que la terre fine peut emprisonner davantage d'eau que ce que cette simple formule de la réserve utile laisse supposer.

FORETS DOMANIALES DE SOLAURE ET DE GLANDASSE

2.5) Les expressions milieu-production pour le Diois

Sur le même principe que précédemment pour la forêt domaniale de Solaure, nous avons mis en forme une expression de la fertilité à partir des neuf variables continues et des quinze variables discontinues extraites de l'A.F.C., comme étant les plus significatives pour décrire H_{80} . Par la "régression multiple pas à pas" effectuée sur les 50 relevés de Solaure et de Glandasse (Diois), trois expressions présentées ci-après ont été retenues :

modèle n°1 : 8 variables (Forward)

$$H_{80} = 3,896 + 0,007 \text{ alti} + 0,096 \text{ RUP} - 2,416 \text{ S} + 3,132 \text{ Vconc} + 1,520 \text{ Vconv} \\ + 2,478 \text{ pier1} + 2,769 \text{ pier23} + 2,598 \text{ caldur} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 13,775 \\ R^2 = 0,728 \\ R^2_{\text{adj}} = 0,676 \\ SE = 2,02 \text{ m, soit } 2,02/H_{80}\text{moyen} = 12,18 \%$$

modèle n°2 : 8 variables (Backward)

$$H_{80} = 1,716 + 0,009 \text{ alti} + 0,095 \text{ RUP} + 4,631 \text{ Vconc} + 2,492 \text{ Vrect} + 1,563 \text{ Vconv} \\ + 2,683 \text{ pier1} + 2,395 \text{ pier23} - 2,975 \text{ grèze} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 13,978 \\ R^2 = 0,732 \\ R^2_{\text{adj}} = 0,679 \\ SE = 2,00 \text{ m, soit } 2/H_{80}\text{moyen} = 12,05 \%$$

Une troisième expression a été construite en supprimant la "pierrosité" relevée en surface. En effet, lors du début de la phase de terrain, qui se situait dans la Ventoux en juillet 1990, nous n'avions pas jugé nécessaire de relever cette variable du milieu ; alors que dans le Diois, il s'est révélé être indispensable pour une bonne compréhension des liaisons entre milieu et production. Lors de la phase de test entre les deux régions climato-géologiques

A l'échelle du massif forestier

"chaînon Ventoux-Lure" et "fosse Vocontienne", nous n'aurons que cette expression pour établir une comparaison, bien qu'elle soit légèrement moins pertinente que les deux premières (68 % de variabilité expliquée sur H_{80} contre 73 % dans les deux premières expressions).

modèle n°3 : 8 variables

$$H_{80} = 0,338 + 0,0105 \text{ alti} + 0,116 \text{ RUP} + 4,014 \text{ Vconc} + 3,22 \text{ Vrect} + 2,24 \text{ Vconv} - 1,551 \text{ S} + 2,512 \text{ P<A} - 2,316 \text{ grèze}$$

(en mètres)

$$F = 10,94$$

$$R^2 = 0,681$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,618$$

$$SE = 2,19 \text{ m, soit } 2,19/H_{80\text{moyen}} = 13,20 \%$$

Afin, de mieux interpréter ces résultats, nous proposons une table des corrélations, qui rassemble ci-dessous l'ensemble des descripteurs du milieu significatifs pour décrire H_{80} ; il s'agit de la *matrice des corrélations* déterminée pour cet échantillon du Diois (50 relevés).

alti	1,000										
RUP	-0,268	1,000									
Sud	-0,091	0,343	1,000								
Vconc	0,005	0,240	0,155	1,000							
Vrect	0,159	-0,059	-0,247	-0,239	1,000						
Vconv	-0,113	0,169	0,168	-0,239	-0,351	1,000					
pier1	0,135	0,132	0,064	0,417	0,064	-0,143	1,000				
pier23	-0,224	0,013	-0,182	-0,201	0,159	0,045	-0,296	1,000			
greze	-0,053	0,421	0,376	0,417	0,064	-0,143	0,376	-0,296	1,000		
caldur	0,563	-0,219	-0,068	-0,057	0,273	-0,182	0,045	0,000	-0,296	1,000	
vari.	alti	RUP	Sud	Vconc	Vrect	Vconv	pier1	pier23	greze	caldur	

Table des corrélations entre variables du milieu

N = 50

d.d.l. = 48

il existe une corrélation, au risque 5 %, si $|\rho| > 0,273$

2.6) Commentaires et interprétation écologique pour le Diois

En ayant grossi l'échantillonnage du Diois (50 relevés), on peut noter immédiatement que la part de variabilité sur l'indice de fertilité expliquée par le milieu demeure inchangée, soit autour de 70, 73 % grâce à huit variables. Ce résultat traduit certainement le fait, qu'en fonction des méthodes retenues pour traiter les liaisons entre le milieu et la production dans ce massif du Diois, le pourcentage d'information extrait pour exprimer H_{80} , correspond au pourcentage maximum possible à l'échelle du massif forestier.

La conclusion concernant le seul espace de Solaure demeure vraie pour l'ensemble du massif test "Solaure et Glandasse", soit un milieu qui participe de façon majeure à l'explication de H_{80} pour le *Pin noir* d'Autriche : car cette essence a subi une sylviculture réduite et elle présente dans les Alpes externes méridionales peu de variabilité génétique.

A l'échelle du massif forestier

Sans reprendre l'interprétation écologique décrite pour le seul massif de Solaure, qui demeure vraie dans cette situation élargie de "Solaure et Glandasse", il faut noter que ces expressions sont la traduction des teneurs en eau offertes par le support pour alimenter l'arbre.

Comme pour le seul massif de Solaure, l'indice de fertilité est fixé par les variables continues : altitude "alti" et réserve utile du profil pédologique "RUP" ; ces deux variables, pour l'ensemble "Solaure, Glandasse" sont affectées d'un coefficient stable, puisque identique à celui déterminé sur "Solaure" (altitude : coeff. = 0,01 et "RUP" : coeff. = 0,1).

		Altitude (0,01)	
		Min 600 m	Max 1100 m
RUP (0,1)	Min 30 mm	+9 m	+14 m
	Max 70 mm	+13 m	+18 m

Globalement, H_{80} évolue si on s'en tient aux seules variables continues dans un intervalle de 9 à 18 m ; les variables qualitatives, qui viennent compléter l'expression, permettent d'ajuster cet indice de fertilité, grâce à leur coefficient de l'ordre du mètre. Il s'agit de nuances concernant la topographie ("Vconc", "Vrect", "Vconv", "P<A"), l'exposition ("S"), le support pédologique de l'arbre ("pier1", "pier23") ou encore le support géologique ("caldur", "grèze"). Il est à remarquer que les trois modalités de la topographie du versant présentent toutes un coefficient positif, même si ce coefficient décroît lorsqu'on passe d'une topographie concave à une topographie convexe. Cela montre simplement qu'aucune des trois situations topographiques n'interdit la croissance du peuplement ; suivant les cas, elle est seulement ralentie.

CONCLUSION POUR LES MASSIFS FORESTIERS DES ALPES EXTERNES MERIDIONALES

A grande échelle, dans chacun des deux massifs étudiés, on observe un pourcentage très élevé (70 à 80 %) de variabilité sur H_{80} , expliquée par le milieu. Ce chiffre s'explique par le choix même de cette essence, qui a subi une sylviculture réduite et dont les provenances sont très peu nombreuses ; il ne reste donc que le milieu ou presque pour expliquer l'indice de fertilité.

Parmi les objectifs de cette étude, un des premiers à atteindre consistait à inventorier les variables du milieu les plus significatives pour la croissance du *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales. Pour le versant nord du Ventoux et les forêts domaniales de Solaure et de Glandasse, quelques descripteurs communs se dégagent ; on retrouve dans cette liste, la **réserve utile**, la **topographie stationnelle**, et les **calcaires durs**. Ces variables écologiques semblent appartenir à une liste minimum et indispensable, qui permet de décrire l'indice de fertilité du *Pin noir* dans les Alpes externes méridionales. Cette liste se retrouvera ultérieurement lors de l'élaboration d'un modèle global valable en associant le Ventoux au Diois. Ces différents descripteurs écologiques indispensables représentent deux contraintes fortes du milieu méditerranéen : **l'eau et la nature de la roche**.

A l'opposé, d'autres descripteurs du milieu ne sont pas sélectionnés sur le versant nord du Ventoux comme dans les massifs du Diois ; une telle situation peut s'expliquer en partie par les particularités de chaque massif forestier, mais également par les descripteurs eux-mêmes, qui ont été retenus dans chaque expression. Ainsi, pourquoi l'altitude n'apparaît pas dans le Ventoux ? l'altitude comme nous l'avons signalé plus haut est en liaison avec la réserve utile. Si on considère dans le Ventoux, la variabilité expliquée sur H_{80} par la réserve utile, on atteint 45,9 %. Cette même valeur dans le Diois ne représente que 11,7 %, alors que lorsque l'on considère l'association "réserve utile" et "altitude" ce pourcentage arrive à 33,8 %. L'altitude est donc indispensable dans le Diois afin d'exprimer la totalité de l'eau disponible pour le peuplement, ce qui n'est pas nécessaire dans l'échantillon Ventoux.

3) REGRESSIONS NON LINEAIRES EXPRIMANT LA FERTILITE EN FONCTION DE VARIABLES DU MILIEU

En observant plus particulièrement un des descripteurs quantitatifs : la réserve utile, significatif pour expliquer l'indice de fertilité, on note que ce facteur n'a pas une évolution linéaire. Ainsi, le nuage de points ("RUP", H_{80}) est mieux ajusté par une régression non linéaire, de type multiplicatif :

$$H_{80} = a \cdot RUP^b + \epsilon$$

Sur le versant nord du Ventoux, le coefficient de corrélation entre la variable à expliquer H_{80} et la variable explicative "RUP" est de 68 % si on opte pour une expression linéaire, alors qu'il passe à 76 % pour une expression non linéaire du type précédent.

Il est facile de concevoir l'évolution suivante de la réserve utile, en sachant bien sur, que d'autres facteurs interviennent :

- * sans eau, le *Pin noir* d'Autriche ne pousse pas,
- * présence d'eau dans le milieu, il y a croissance des arbres, avec une première phase d'accélération,
- * puis, le milieu peut se saturer en eau et la croissance ne s'améliore plus, phase stationnaire (non observé dans notre échantillon).

Afin de construire une expression de la fertilité du *Pin noir* d'Autriche dans les deux massifs étudiés, nous avons dans un premier temps testé le lien entre H_{80} et les différentes variables quantitatives, prises une à une. Comme le montrent les différents tableaux ci-dessous, il existe une unique corrélation " ρ " entre H_{80} et la réserve utile, dans le versant nord du Ventoux.

Corrélation entre H_{80} et des variables écologiques quantitatives dans le Ventoux et le Diois

Légende :

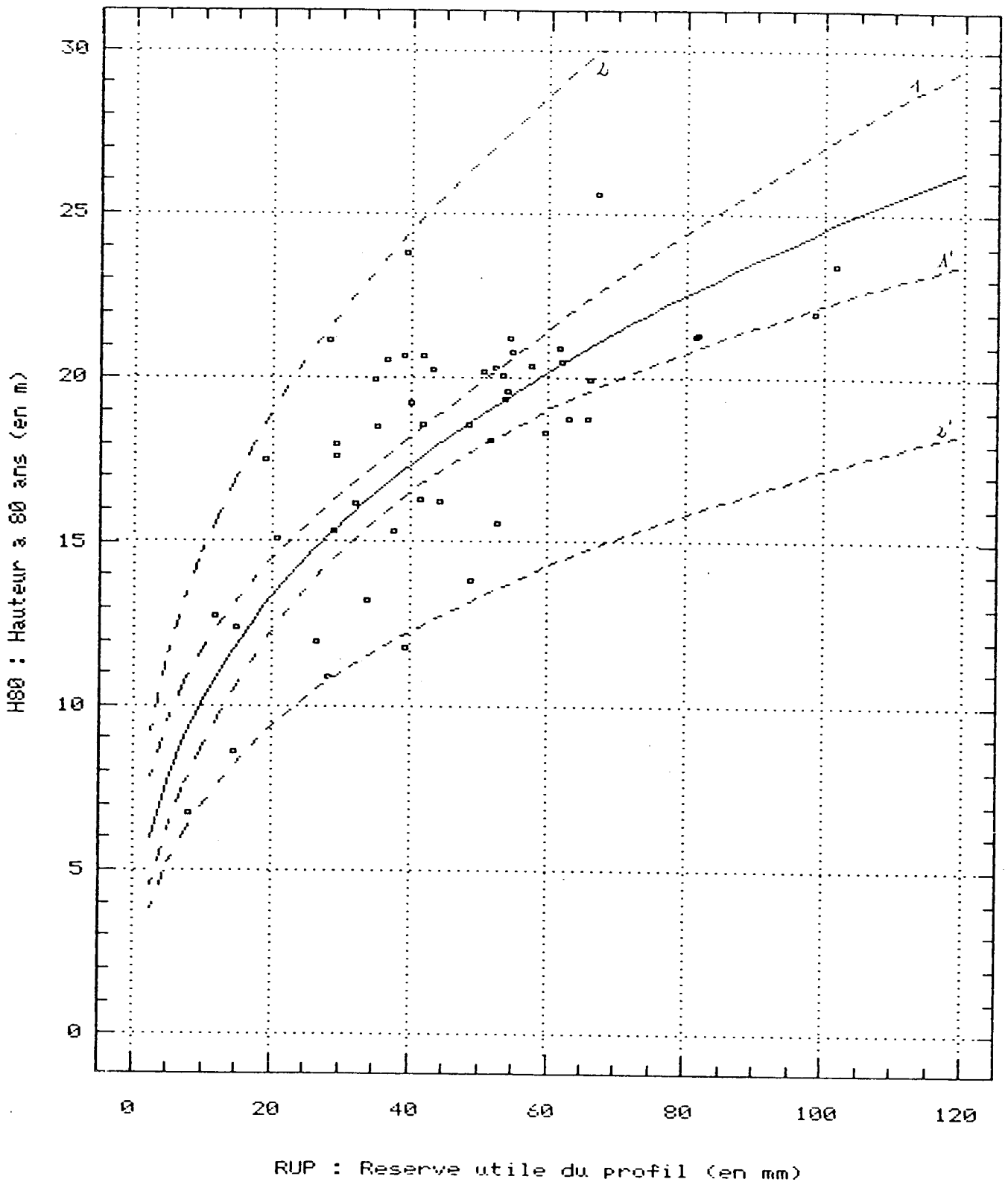
" ρ " : coefficient de corrélation

"F" : F-ratio de l'équation $Y = f(X)$

Ventoux 50 relevés	$Y = a+bX$ linéaire	$Y = aX^b$ multiplicative	$Y = \exp(a+bX)$ exponentielle	$1/Y = a+bX$ réciproque
RUP	F = 40,75 $\rho = 0,678$	F = 64,71 $\rho = 0,758$	F = 36,12 $\rho = 0,655$	F = 28,31 $\rho = -0,609$
caiBC	F = 1,673 $\rho = -0,183$	F = 0,077 $\rho = -0,04$	F = 1,381 $\rho = -0,167$	F = 0,867 $\rho = 0,133$
pent	F = 4,010 $\rho = -0,278$	F = 2,644 $\rho = -0,228$	F = 4,917 $\rho = -0,305$	F = 5,632 $\rho = 0,324$

Regression non lineaire

$$H80 = f(RUP)$$



Courbe ajustée au nuage des placettes

- (11') : intervalle de confiance à 95 % pour la moyenne prédite,
- (22') : intervalle de confiance à 95 % pour une placette particulière.

A l'échelle du massif forestier

Diois 50 relevés	Y = a+bX linéaire	Y = aX^b multiplicative	Y = exp(a+bX) exponentielle	1/Y = a+bX réciproque
RUP	F = 6,38 ρ = 0,343	F = 7,528 ρ = 0,368	F = 7,311 ρ = 0,364	F = 7,420 ρ = -0,366
alti	F = 7,161 ρ = 0,360	F = 6,747 ρ = 0,351	F = 6,715 ρ = 0,350	F = 5,980 ρ = -0,333

Face à ces résultats, nous avons tenté de construire un nouveau modèle, cette fois non linéaire, exprimant H₈₀ en fonction du milieu, pour le seul versant nord du Ventoux. La démarche est constituée de trois étapes :

* Estimation de H₈₀ par la R.U. : H₈₀ = f(RUP)

H₈₀ = a RUP^b "fonction multiplicative"

Ajustement linéaire de Log(H₈₀) sur Log(RUP).

Paramètres du modèle	Estimation	écart-type	test T	Sig. level
"LOG a"	1,4486	0,1771	8,181	0,0000
"b"	0,3805	0,0473	8,044	0,0000

Analyse de Variance

Source de variation	Somme des carrés	d.d.l.	Variance	F-ratio	Sig. level
Modèle	1,873	1	1,873	64,711	0,0000
Erreurs	1,389	48	0,029		
Total	3,262	49			

De cette analyse de variance on tire :

* R² = 0,574
 * SE = 0,17
 (sur le Log(H₈₀))

$$H_{80 \text{ cal.}} = a RUP^b + \epsilon \quad \Rightarrow \quad H_{80 \text{ cal.}} = 4,257 RUP^{0,38} + \epsilon$$

* Estimation des résidus : ε

Les résidus tirés de l'expression précédente non linéaire, liant H₈₀ à RUP, expriment l'écart entre les H₈₀ vrais "H_{80 mes.}" (fournis par J.-Ch. HERVÉ) et les H₈₀ calculés "H_{80 cal.}" suivant l'expression précédente. Comme il s'agit d'une expression non linéaire, cet écart est un pourcentage, pondéré par "H_{80 cal.}".

$$\epsilon \approx \frac{H_{80 \text{ mes.}} - H_{80 \text{ cal.}}}{H_{80 \text{ cal.}}} \quad (\%)$$

Cette deuxième étape consiste en l'estimation des résidus "ε", grâce aux facteurs du milieu restant, qui sont les plus significatifs pour décrire H₈₀. Par régression linéaire multiple pas à pas, nous avons estimé ces résidus.

$$\varepsilon = f(\text{pent}, \text{caiBC}, \text{eboulis}, \text{calmar}, \text{caldur}, \text{P<A}, \text{epai1})$$

$$\varepsilon = 0,127 - 0,004 \text{ pent} + 0,230 \text{ caldur} + 0,123 \text{ P<A}$$

(en mètres)

$$F = 13,04$$

$$SE = 0,127$$

*** Ajustement des coefficients de l'équation finale**

Cette dernière phase consiste à rassembler les variables "milieu" retenues définitivement (RUP, pent, caldur, P<A, constante) et à ajuster leur coefficient respectif dans une équation globale. Cet ajustement se fait par itérations successives afin d'obtenir une valeur optimale du coefficient pour chaque paramètre. Un premier résultat nous a conduit à abandonner la constante issue de l'expression des résidus, car elle disposait d'un coefficient instable, associé à un écart-type trop élevé.

Le résultat suivant provient d'une nouvelle phase d'ajustement sur les coefficients des seules variables écologiques.

$$H_{80} = 6,938 \text{ RUP}^{0,281} - 0,067 \text{ pent} + 3,745 \text{ caldur} + 2,013 \text{ P<A}$$

(en mètres)

$$F = 845,193$$

$$R^2 = 0,759$$

$$SE = 1,98 \text{ m}$$

Cette expression de la fertilité du *Pin noir* d'Autriche concerne seulement le versant nord du Ventoux, puisque nous n'avons pas pu entreprendre un calcul équivalent dans le Diois, faute de liaison forte, non linéaire entre H_{80} et une variable écologique. On tire de ce résultat une expression simplifiée quant au nombre de variables du "milieu" nécessaires pour expliquer la fertilité. Cette nouvelle équation permet de connaître 76 % de la variabilité totale de H_{80} , avec une erreur sur l'estimation inférieure à 2 m.

Les quatre variables (**réserve utile, topographie stationnelle P<A, pente et calcaire dur fissuré**) sélectionnées dans cette expression traduisent, en premier lieu la capacité de rétention en eau du milieu, donnée essentielle en région méditerranéenne. Les calcaires durs reflètent dans ce modèle une situation particulière, mais fréquente du Ventoux, très mal appréhendée par la fiche de relevé, du point de vue de la teneur en eau, puisque qu'elle est sous-estimée.

Il faut noter que les quatre variables de cette équation non linéaire sont contenus dans les équations linéaires du Ventoux ; il s'agit donc d'éléments indispensables pour décrire H_{80} dans le Ventoux. Par ailleurs, il est à signaler que cette expression non linéaire, mise au point dans le versant nord du Ventoux, comporte trois variables, que nous avons attribué à une liste minimum et indispensable pour décrire l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche à l'échelle du massif forestier.

Parmi les quatre variables enregistrées sur le terrain pour décrire H_{80} , trois sont dites "simples" et une la réserve utile (incontournable dans les expressions de la fertilité) est dite "complexe". Pour aller plus loin dans la connaissance de la production du *Pin noir* d'Autriche, il serait intéressant d'aborder la notion d'**écophysiologie de cette essence**. Or toutes les variables écophysiologiques sont difficiles à appréhender. Le calcaire actif qui influence la réserve utile et qui peut nuire à la physiologie de l'arbre en réduisant sa capacité d'absorption de certains éléments du milieu, peut être assimilé à une variable écophysiologique, tout au moins indirectement. Il a été mesuré pour chaque échantillon de sol ; cette nouvelle approche est développée dans le chapitre suivant.

4) UTILISATION DE LA VARIABLE FONCTIONNELLE : CALCAIRE ACTIF DANS UNE REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE

A partir des descripteurs concernant le calcaire actif qui ont été analysés en laboratoire (voir page 116), nous avons essayé de mettre en forme de nouvelles expressions de H_{80} ; ce qui nous a conduit à deux types de modèles.

- * Le premier modèle a été construit à partir de l'ensemble des variables écologiques augmenté des variables fonctionnelles ;
- * le second par contre, a été établi sur les seules variables fonctionnelles issues des analyses pédologiques, auxquelles nous avons ajouté la variable "réserve utile" autre variable "complexe".

Il faut remarquer que cette étude à partir des variables fonctionnelles n'a pu être réalisée que pour les données du Ventoux et de Solaure, les analyses n'étant pas disponibles sur la forêt domaniale de Glandasse.

Avant d'exposer nos résultats pour chaque massif forestier test, la matrice des corrélations entre variables liées au calcaire actif est fournie.

VERSANT NORD DU VENTOUX

CO3CA1T	1,000									
CO3CACT	0,475	1,000								
CO3CA1	0,793	0,567	1,000							
CO3CAC	0,587	0,542	0,638	1,000						
CO3CA1TF	0,763	0,558	0,995	0,636	1,000					
CO3CACTF	0,647	0,547	0,774	0,946	0,785	1,000				
TFA1SC	-0,547	-0,509	-0,719	-0,489	-0,743	-0,612	1,000			
TFCSC	-0,567	-0,501	-0,694	-0,766	-0,707	-0,872	0,635	1,000		
TFA1	-0,292	-0,344	-0,399	-0,297	-0,433	-0,388	0,923	0,465	1,000	
TFC	-0,378	0,314	-0,523	-0,353	-0,544	-0,547	0,552	0,872	0,450	1,000
vari.	CO3CA1T	CO3CACT	CO3CA1	CO3CAC	CO3CA1TF	CO3CACTF	TFA1SC	TFCSC	TFA1	TFC

Table des corrélations entre variables du milieu

N = 50

d.d.l. = 48

il existe une corrélation, au risque 5 %, si $|\rho| > 0,273$.

- * Grâce à la totalité des variables, H_{80} s'exprime de la façon suivante :

$$H_{80} = 16,972 + 0,098 \text{ RUP} - 0,084 \text{ pent} - 0,188 \text{ CO3CA1} + 1,860 \text{ P<A} + 3,675 \text{ caldur}$$

(en mètres)

$$F = 25,46$$

$$R^2 = 0,804$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,773$$

$$SE = 1,69 \text{ m}$$

- * A partir des seules variables fonctionnelles, H_{80} devient :

$$H_{80} = 15,061 + 0,084 \text{ RUP} - 0,258 \text{ CO3CA1}$$

$$F = 23,21$$

$$R^2 = 0,577$$

$$R^2_{adj} = 0,552$$

$$SE = 2,37 \text{ m}$$

Les expressions de la fertilité construites en introduisant des variables fonctionnelles montrent que seule la teneur en calcaire actif en pourcentage du sol total de l'horizon "A1" influence la croissance du *Pin noir* d'Autriche. Comme pour les expressions linéaires ou non, précédemment établies dans le versant nord du Ventoux, l'équation proposée dépend des mêmes quatre variables primordiales ("RUP", "pent", "caldur" et "P<A"), qui varient à une échelle métrique ; à ces quatre variables il faut ajouter la variable "CO3CA1", pouvant modifier l'indice de fertilité également à une échelle métrique. En effet, H₈₀ est réduit par la présence de calcaire actif de quelques centimètres jusqu'à 4 mètres. De ce résultat, on peut déduire une grande stabilité à propos des variables "simples" et à propos de la réserve utile, qui conditionnent l'indice de fertilité "H₈₀".

Une unique variable calcaire actif est sélectionnée car toutes ces variables sont étroitement corrélées entre elles, comme le montre le tableau précédent. Dans ce versant nord du Ventoux, les systèmes pédologiques se réduisent bien souvent à des **rendzines** (voir les fiches des unités géo-pédologiques) ; d'où l'importance de l'horizon "A1", qui apparaît comme étant plus important dans l'estimation de l'indice de fertilité que l'horizon "C".

Par ailleurs, lorsque la construction du modèle se réduit aux seules variables fonctionnelles, on obtient une expression très simplifiée se composant de la même variable calcaire actif "CO3CA1", à laquelle s'ajoute la réserve utile. Il faut noter le bon pourcentage (57,7 %) de variabilité expliquée sur H₈₀, grâce à ces deux variables ; tout en sachant que la réserve utile représente à elle seule 40 % de cette variabilité expliquée sur H₈₀.

FORET DOMANIALE DE SOLAURE

CO3CAIT	1,000									
CO3CACT	0,755	1,000								
CO3CA1	0,824	0,856	1,000							
CO3CAC	0,731	0,907	0,876	1,000						
CO3CAITF	0,798	0,876	0,951	0,831	1,000					
CO3CACTF	0,766	0,952	0,891	0,956	0,900	1,000				
TFAISC	-0,415	-0,570	-0,596	-0,527	-0,734	-0,613	1,000			
TFCSC	-0,675	-0,794	-0,766	-0,693	-0,837	-0,831	0,699	1,000		
TFA1	0,146	-0,021	0,063	0,049	-0,148	-0,047	0,000	0,184	1,000	
TFC	-0,209	-0,198	-0,190	0,034	-0,334	-0,200	0,446	0,697	0,401	1,000
vari.	CO3CAIT	CO3CACT	CO3CA1	CO3CAC	CO3CAITF	CO3CACTF	TFAISC	TFCSC	TFA1	TFC

Table des corrélations entre variables du milieu

N = 40

d.d.l. = 38

il existe une corrélation, au risque 5 %, si $|\rho| > 0,304$.

Une unique expression de la fertilité a été développée en ajoutant les variables analysées en laboratoire aux variables "milieu" relevées sur le terrain.

A l'échelle du massif forestier

$$H_{80} = 3,028 + 0,012 \text{ alti} + 0,077 \text{ RUP} - 2,70 \text{ grèze} + 2,072 \text{ P<A} + 2,49 \text{ pier1} \\ + 4,132 \text{ pier23} - 0,08 \text{ CO3CAC} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 11,44 \\ R^2 = 0,777 \\ R^2_{\text{adj}} = 0,709 \\ SE = 1,78 \text{ m}$$

Le calcul de la fertilité du *Pin noir* d'Autriche conduit à une expression comparable aux expressions linéaires mises au point dans la forêt domaniale de Solaure, mais elle est améliorée par la présence de "CO3CAC" (teneur en calcaire actif en pourcentage du sol, dans l'horizon "C"). Cette variable concernant l'horizon "C", c'est-à-dire l'essentiel de l'espace sollicité par les racines, fait chuter l'indice de fertilité de quelques centimètres à pratiquement 4 mètres (3,77 m). Ce nouveau modèle à sept variables est plus déterminant pour H_{80} ; le pourcentage de variabilité expliquée sur H_{80} passe de 68,7 % (relation à 6 variables) à 77,7 % (relation à 7 variables), soit 9 % d'explication supplémentaire sur l'indice de fertilité, ce qui entraîne une forte diminution de l'erreur standard sur H_{80} passant de 2,19 m à 1,78 m.

Dans la forêt domaniale de Solaure, l'élaboration d'un modèle sur la base des seules variables "R.U." et "calcaire actif", conduit à plusieurs modèles non optimaux et très éloignés les uns des autres. Il semble donc que les seules variables "complexes", isolées de l'ensemble des variables milieu, ne permettent pas de déterminer l'indice de fertilité ; l'explication qu'elles fournissent doit être complétée par des renseignements écologiques simples. En effet, comme nous avons pu l'observer précédemment dans l'ensemble du Diois et donc dans la forêt domaniale de Solaure en particulier, la totalité de l'eau disponible pour le peuplement est traduite par une combinaison étroite entre réserve utile et altitude ; par suite, la variable "altitude" est incontournable dans les expressions de la fertilité dans le Diois.

Comme dans le Ventoux, ce résultat montre que le calcaire actif conditionne la croissance du *Pin noir* et non le calcaire total.

III) CONCLUSION

A grande échelle, c'est-à-dire à l'échelle du massif forestier, deux approches, toutes aussi pertinentes l'une que l'autre, nous ont permis de définir l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche.

- * Une approche *synthétique*, qui passe par la détermination préliminaire d'une stratification, en vue de la mise en forme des unités géo-pédologiques.
- * Une approche *analytique*, qui consiste à inventorier un ensemble de variables du milieu, pour en sélectionner finalement quelques unes, particulièrement significatives, qui participent à la description de la fertilité.

Ces deux approches à l'échelle du massif forestier, dans les deux régions géologiques, offrent 70 % pour le Diois et 80 % pour le Ventoux de variabilité sur l'indice de fertilité expliquée par le milieu. Ces chiffres très élevés s'expliquent par le choix de l'essence ; en effet, le *Pin noir* d'Autriche, par son histoire dans les Alpes externes méridionales, est certainement le meilleur support à une étude des liaisons entre milieu et production. Planté sur un domaine très vaste, cette essence est issue de provenances très peu nombreuses et elle n'a pas été soumise à une sylviculture à cause d'un milieu généralement peu accessible (versant R.T.M.). En éliminant les aspects *origine* et *sylviculture*, l'indice de fertilité, considéré dans notre étude comme étant la hauteur à 80 ans, s'est exprimé sous la seule action du milieu.

A l'échelle du massif forestier

L'observation détaillée des expressions de la fertilité dans ces deux massifs forestiers tests montre une certaine stabilité, en ce qui concerne le type des variables sélectionnées.

- * Ainsi, dans le Ventoux comme dans le Diois, les *variables "complexes"* sont primordiales : réserve utile et taux de calcaire actif.
- * Ces variables sont complétées par des *variables "simples"*, parmi lesquelles on retrouve *systématiquement* des teneurs en éléments grossiers (en surface ou en profondeur), de la topographie stationnelle, et de la roche en place. Ces variables traduisent le type géo-pédologique.
- * Enfin, certaines variables traduisant le climat local viennent compléter ces expressions de la fertilité. Ces variables sont caractéristiques du massif forestier et donc varient d'un massif à l'autre.

Le tableau ci-dessous rassemble les résultats obtenus en estimant la production par le milieu, à l'échelle du massif forestier.

Approches du milieu		Massif forestier du Ventoux	Massif forestier de Solaure	Massif forestier de Solaure et Glandasse
Approche synthétique	unités géo-pédologiques	R ² = 0,817 SE = 1,84	R ² = 0,713 SE = 2,13	R ² = 0,733 SE = 1,98
Approche analytique	5 axes factoriels	R ² = 0,60 SE = 2,57	R ² = 0,264 SE = 3,18	R ² = 0,260 SE = 3,12
	régression linéaire	R ² = 0,836 SE = 1,72	R ² = 0,726 SE = 2,09	R ² = 0,732 SE = 2,00
	régression non linéaire	R ² = 0,759 SE = 1,98	-	-
	régression avec CO ₃ Ca	R ² = 0,804 SE = 1,69	R ² = 0,777 SE = 1,78	-

La phase suivante pour poursuivre ce travail est une **phase d'extrapolation**, qui permettra de vérifier les modèles établis et de tester leur prédiction de la production, tout en complétant éventuellement cette liste de variables du milieu indispensables à cette prédiction. A cet effet, nous avons récolté des données sur des massifs forestiers dits satellites, car ils sont en périphérie des massifs forestiers tests. Il s'agit, sans toutefois changer de régions climato-géologiques, d'une translation géographique afin de tenter l'identification des influences climatiques.

PARTIE IV

**RELATIONS MILIEU-PRODUCTION
A L'ECHELLE INTERMEDIAIRE
ENTRE LE MASSIF FORESTIER ET LES REGIONS CLIMATO-
GEOLOGIQUES
PHASE D'EXTRAPOLATION**

- * Après avoir effectué, à grande échelle pour un massif forestier, l'inventaire des unités géo-pédologiques et la sélection des variables écologiques les plus significatives ;
- * après avoir estimé la liaison entre les unités géo-pédologiques et la fertilité, d'une part et après avoir rassemblé dans une expression permettant de décrire la fertilité à partir des variables écologiques, d'autre part ;

nous abordons dans ce chapitre l'étape suivante, qui vise à tester la **prédiction** à la fois du découpage en unités géo-pédologiques et des expressions donnant la fertilité en fonction des variables du milieu. Par ailleurs, à cette nouvelle échelle plus petite (moins fine), nous pourrions estimer la précision des "liaisons milieu-production".

I) PROTOCOLE

Comment pratiquer un tel changement d'échelle, lorsque l'aire d'étude est si vaste ? Les délais impartis à cette étude, nous imposaient une seule saison de terrain pour cette phase d'extrapolation, c'est-à-dire un nombre restreint de relevés supplémentaires. Il s'agissait donc de bien les positionner afin d'en tirer un maximum d'information.

Après la présentation générale, un découpage écologique en fonction de la géologie et du climat s'est imposé pour l'ensemble des Alpes externes méridionales. Nous avons alors émis l'hypothèse de l'existence pour cette région de trois régions climato-géologiques (II - Présentation du milieu physique des Alpes externes méridionales, page 20).

Ainsi, le versant nord du Ventoux s'associe à la Montagne de Lure, pour former le **chaînon Ventoux-Lure**, homogène d'un point de vue géologique et légèrement nuancé d'un point de vue climatique. De même, les forêts domaniales de Solaure et de Glandasse, constituent un synclinal perché classique de la **fosse Vocontienne**, qui se répète dans les directions est ou sud de cette région climato-géologique. La dernière région climato-géologique appartenant aux Alpes externes méridionales est la **nappe de Digne**, espace moins vaste que le précédent et plus singulier, qui n'a pu être abordé dans cette thèse faute de temps.

Partant des massifs forestiers sélectionnés pour cette étude à grande échelle et avec les connaissances des acteurs du terrain, nous avons choisi des **massifs forestiers satellites** présentant des similitudes géologiques et géomorphologiques, associées à des variations climatiques. Ainsi, pour les deux régions climato-géologiques, nous avons retenu :

- * Pour le chaînon Ventoux-Lure, le massif test étant le versant nord du Ventoux, le **versant nord de la Montagne de Lure** (Alpes de Haute-Provence) est le massif satellite ; soit un massif situé plus à l'est, à environ 45 km, dans le même alignement.
- * Pour la fosse Vocontienne, le massif test "Solaure, Glandasse" a été étendu dans deux directions :
 - ◆ à environ 40 km plus au sud, le **Nyonsais** : mosaïque de forêts domaniales autour de Rémuzat et Cornillon-sur-l'Oule (Drôme),
 - ◆ à environ 50 km plus au sud-est, le **Gapençais** : forêts domaniales de "Bonsecours et Saint-Genis" (Hautes-Alpes).

Pour chaque massif forestier satellite, nous avons dans un premier temps sillonné l'espace afin d'y inventorier les différentes unités géo-pédologiques ; le but était de retrouver les unités géo-pédologiques déjà observées à grande échelle et de vérifier l'existence d'éventuelles nouvelles unités. Dans les cas qui nous préoccupent, les unités géo-pédologiques observées, boisées en *Pin noir* d'Autriche, étaient déjà présentes dans les massifs forestiers tests. Par ailleurs, il faut noter que certaines unités géo-pédologiques n'ont pas été retrouvées dans les massifs satellites choisis, alors qu'elles étaient présentes dans les massifs forestiers tests.

Chaque unité géo-pédologique repérée a donné lieu à des relevés du même type que ceux effectués dans les massifs tests. Le nombre de relevés réalisé est fonction de l'étendue de l'unité géo-pédologique et du temps imparti à chaque massif.

Le but à atteindre dans cette phase d'extrapolation est de :

- * mesurer la *perte éventuelle d'information, lors d'un changement d'échelle, liée à une translation géographique* entre massifs forestiers d'une même région climato-géologique ;
 - ◆ connaître la **stabilité du modèle** construit et adapté à un massif forestier particulier, lorsqu'il est utilisé dans un massif différent appartenant à la même région climato-géologique ; ce qui revient à observer sa **valeur prédictive** pour l'indice de fertilité ;
 - ◆ définir le **lien entre les unités géo-pédologiques et la fertilité** ;
 - ◆ **construire des expressions globales** valables pour une région climato-géologique donnée.
- * enfin, *rassembler les deux régions climato-géologiques* étudiées afin d'extraire quelques critères exprimant l'indice de fertilité à l'échelle des Alpes externes méridionales.

II) REALISATION, QUELQUES RAPPELS DES METHODES

La phase d'extrapolation correspondant au passage d'une étude à grande échelle vers une étude à échelle plus petite, (soit un élargissement des massifs forestiers tests aux massifs forestiers satellites), a été réalisée suivant deux niveaux :

1) CALCUL DE H_{80} POUR LES RELEVES SUPPLEMENTAIRES GRACE AUX MODELES ELABORES A GRANDE ECHELLE

Pour chaque point récolté dans un massif forestier satellite, un indice de fertilité est déterminé, grâce aux modèles établis dans le massif forestier test associé. Cet indice de fertilité calculé est alors comparé à la "vraie" valeur de H_{80} , obtenue à partir des mesures dendrométriques recueillies sur le terrain, et transformées grâce à un modèle à deux paramètres de "Chapman-Richards" (J.-Ch. HERVÉ, "METHODE").

Le test consiste à établir l'existence ou non d'une différence entre les deux séries de H_{80} : " H_{80m} "(vrai) et " H_{80mod} "(issu du modèle), mais il faut noter immédiatement que ces deux séries sont appariées. Pour **comparer les moyennes de deux séries appariées de faible effectif**, on forme pour chaque paire la différence des deux mesures et on compare la moyenne des différences à "0" par le rapport "t".

$$t = \frac{m - 0}{s / (n)^{\frac{1}{2}}}$$

où "m" et "s" désignent la moyenne et l'écart-type estimés sur l'échantillon des "n" différences.

- * Si $|t|$ est inférieur à la valeur lue dans la table de "t" pour le nombre de degrés de liberté (n-1) et le risque 5 %, les moyennes ne diffèrent pas significativement,
- * Dans le cas contraire les moyennes diffèrent significativement et le risque indiqué par la table pour la valeur $|t|$ trouvée fixe le degré de signification.

(SCHWARTZ D., 1963)

Afin d'appliquer cette formule, nous considérons que la différence des deux séries est distribuée selon une loi normale.

Ce test comparant les moyennes nous offre une conclusion en ce qui concerne la qualité prédictive du modèle, établi à grande échelle, lorsque l'on aborde la phase d'extrapolation.

2) AJOUT DE RELEVES SUPPLEMENTAIRES AUX RELEVES EFFECTUES A GRANDE ECHELLE

L'ajout des relevés supplémentaires réalisés dans des *massifs forestiers satellites* aux relevés pré-existants récoltés à grande échelle, issus des *massifs forestiers tests* permet d'aborder à nouveau deux approches écologiques :

2.1) Approche synthétique : relations unité géo-pédologiques/production

Dans tous les massifs forestiers satellites, nous n'avons identifié que des unités géo-pédologiques inventoriées à grande échelle ; à une exception près dans la forêt domaniale de Saint-Genis, où un relevé se situe dans la ripisylve. Il s'est avéré, dans la sélection des massifs supplémentaires, que le *Pin noir* d'Autriche avait été planté sur un moins grand nombre de milieux que dans le massif initial ; en effet, par exemple dans le cas de la Montagne de Lure, le *Pin noir* est en concurrence avec un plus grand nombre d'espèces que dans le Ventoux.

Les relevés collectés sont donc venus renforcer le nombre des relevés initiaux dans les différentes unités géo-pédologiques, en vue de définir leur liaison avec H_{80} . Les associations de relevés réalisées sont les suivantes :

- * Ventoux-Lure (translation ouest-est) : 50 + 10 relevés,
- * Diois-Nyonsais (translation nord-sud) : 50 + 13 relevés,
- * Diois-Gapençais (translation nord.ouest-sud.est) : 50 + 13 relevés,
- * Diois-Nyonsais-Gapençais (fosse Vocontienne) : 50 + 13 + 13 relevés.

Ces regroupements de relevés restent valables pour l'ensemble de cette phase d'extrapolation.

2.2) Approche analytique : nouvelles expressions de la fertilité à l'échelle intermédiaire

A petite échelle, après avoir constitué les groupes précédemment cités, nous avons pratiqué la même chaîne de traitements qu'à grande échelle. Cette chaîne de traitements correspond à deux étapes :

- * *Analyse des données* : l'objectif étant de sélectionner à partir de l'ensemble des facteurs, les variables les plus significatives pour définir l'indice de fertilité.
- * *Régression multiple pas à pas* :
 - ◆ *linéaire* : à partir des seules variables significatives, il s'agit d'extraire une nouvelle expression de la fertilité ;
 - ◆ *non linéaire* : pour le seul axe Ventoux-Lure, construction d'une autre expression fertilité-milieu à partir de la réserve utile.

Au-delà de la construction d'une nouvelle expression de l'indice de fertilité, il s'agit d'observer si la liste des paramètres du milieu retenus, demeure stable et de mesurer le pourcentage d'explication, que l'on peut tirer de cette expression.

III) RESULTATS

1) CALCUL DE H_{80} POUR LES RELEVÉS SUPPLÉMENTAIRES GRACE AUX MODELES ELABORES A GRANDE ECHELLE

Cette phase d'extrapolation est organisée suivant trois modalités géographiques, que l'on retrouve dans chaque paragraphe : "axe Ventoux-Lure", "Diois-Nyonsais", "Diois-Gapençais".

Les modèles élaborés à l'échelle du massif forestier test offrent une possibilité de **description** du milieu dans le but d'expliquer la production. Dans un second temps, nous voulons observer la valeur **prédictive** de ces modèles, en calculant pour des relevés pas trop éloignés de l'échantillon initial leur indice de fertilité.

CHAINON VENTOUX-LURE

Relevés	Age	Hauteur	H80	E.T.H80
L01	92	15,83	14,98	0,4623
L02	89	22,5	21,36	0,4149
L03	87	16,66	16,06	0,3543
L04	64	15,66	17,93	0,7843
L05	86	17,73	17,15	0,3347
L06	75	19,96	20,67	0,3425
L07	80	20,9	20,89	0,2627*
L08	65	15,73	17,81	0,7369
L09	87	17	16,37	0,3551
L10	78	17,2	17,43	0,2785

Indice de fertilité issu du modèle HERVÉ pour les 10 relevés de la Montagne de Lure

Age (ans)

Hauteur de la placette (en mètres)

H80 : hauteur à 80 ans, modèle J.-Ch. HERVÉ

E.T.H80 : écart-type sur la valeur H_{80}

*écart-type provenant du modèle de J.-Ch. HERVÉ

Le tableau précédent rassemble les valeurs de l'indice de fertilité recueillies sur le terrain dans le versant nord de la Montagne de Lure. Le modèle de "Chapman-Richards" adapté par J.-Ch. HERVÉ, reprend la hauteur et l'âge d'une placette pour en déduire un " H_{80} ". Cette grandeur peut être alors comparée avec celle obtenue en utilisant les modèles élaborés dans le Ventoux que l'on suppose vrais sur le versant nord de la Montagne de Lure.

L'élaboration des expressions reliant le milieu à la production, pour le versant nord du Ventoux, nous a conduit à conserver trois modèles emboîtés, établis à partir de huit variables milieu. Il y a :

- * la pente,
- * le pourcentage en éléments grossiers des horizons autre que "A1",
- * la réserve utile du profil pédologique,
- * les éboulis vifs,
- * les calcaires durs fissurés,
- * les calcaires marneux,
- * le bilan hydrique positif : pertes inférieures aux apports en eau,
- * l'épaisseur du profil pédologique inférieure à 50 cm.

A l'échelle intermédiaire

On peut dès à présent noter que la situation "éboulis vifs" observée dans le versant nord du Ventoux n'a pas été retrouvée sur la Montagne de Lure, peuplé en *Pin noir* d'Autriche. Cette variable de fait est donc exclue du modèle.

Par ailleurs, après avoir estimé l'indice de fertilité de la Montagne de Lure à l'aide des trois expressions du Ventoux, il est apparu qu'une différence significative existe entre la série des H_{80} "vrais" et les séries des " H_{80} mod" issus du modèle n°2 et n°3, avec présence d'un biais. Ces résultats, nous ont conduit à éliminer les modèles n°2 et n°3 en tant qu'expressions susceptibles de nous fournir une valeur pour H_{80} ; Les résultats proposés ne concernent que le modèle n°1, seule expression pouvant estimer de façon satisfaisante un indice de fertilité.

Le tableau suivant rassemble les variables écologiques, qui participent dans le modèle n°1 au calcul de l'indice de fertilité " H_{80} mod" pour chaque relevé. Le calcul final de l'indice de fertilité se fait en sommant l'ensemble des valeurs prises par les différents éléments du milieu avec une constante, estimée sur le versant nord du Ventoux à 17,85 m.

Variables du milieu retenues pour exprimer H_{80} mod ; Indice de fertilité estimé pour la Montagne de Lure grâce au modèle n°1 du Ventoux.

Relevé	pent	caiBC	RUP	P<A	calmar	caldur	epai1
L01	18	25	35,58	0	1	0	1
L02	40	35	77,4	1	1	0	0
L03	35	50	46,9	0	1	0	0
L04	28	20	49,35	0	1	0	1
L05	40	10	51,45	0	1	0	0
L06	63	45	45,2	0	0	1	0
L07	65	25	54,6	0	0	1	0
L08	33	40	44,45	0	1	0	0
L09	80	40	62	0	1	0	0
L10	44	40	47,1	0	0	0	1
Coeff.	-0,05	-0,006	0,068	2,59	-1,86	3,03	-1,27

modèle n°1 : 8 variables

$H_{80} = 17,85 - 0,05 \text{ pent}$
 $-0,006 \text{ caiBC} + 0,068 \text{ RUP}$
 $+ 2,59 \text{ P<A} - 1,86 \text{ calmar}$
 $+ 3,03 \text{ caldur} - 1,27 \text{ epai1}$
 (en mètres)

Test pour comparer le H_{80} vrai avec le H_{80} issu du modèle n°1

Relevés	H80m	H80mod	différence
L01	14,98	16,03	-1,053
L02	21,36	21,51	-0,153
L03	16,06	17,02	-0,962
L04	17,93	16,47	1,460
L05	17,15	17,30	-0,157
L06	20,67	20,35	0,320
L07	20,89	21,00	-0,113
L08	17,81	17,02	0,788
L09	16,37	15,72	0,646
L10	17,43	17,21	0,216
Effectif	10	10	
Moyenne	18,065	17,966	
Variance	4,818	4,586	
Std. devi.	2,195	2,141	
Médiane	17,62	17,12	

Deux séries des H_{80} de la Montagne de Lure à comparer.

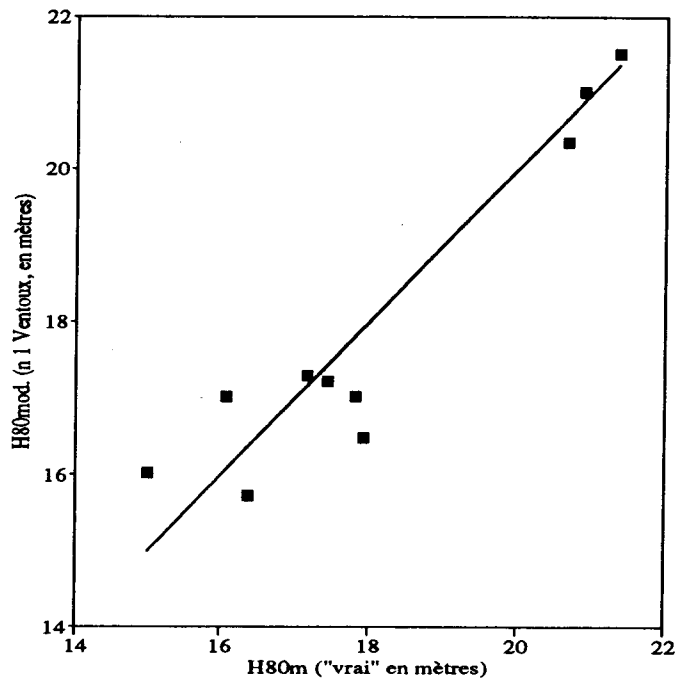
Test : la moyenne des différences est nulle
sur la différence :
"m" = 0,099 et "s" = 0,769

"r" = 0,408 < 2,262 au risque 5 %, d.d.l. = 9

absence de biais

$H_{80} - H_{80}\text{mod} > 0 = 5$

$H_{80} - H_{80}\text{mod} < 0 = 5$



Le versant nord de la Montagne de Lure est un exemple parfait de la répartition des étages de végétation. La succession de ces étages de végétation se compose de la manière suivante : au bas du versant le *Pin noir* d'Autriche prospère, bien souvent en mélange avec le *Pin sylvestre* ; assez rapidement en progressant vers le sommet, il laisse la place au *Pin sylvestre*, au Mélèze puis au Hêtre, vient enfin l'aire du *Pin à crochets*. Les futaies de *Pin noir*, pouvant être qualifiées de régulières et pures sur ce versant, sont peu abondantes et cantonnées à peu de types de milieux ; ce fait, traduit certainement une volonté, des forestiers à l'époque des plantations en *Pin noir*, de combler certains espaces vides, assez défavorisés et offrant les mêmes caractéristiques écologiques.

Cette description du versant nord de la Montagne de Lure, explique totalement l'échantillon que nous avons tiré au hasard. En effet, les dix relevés de Lure se répartissent pour l'essentiel en deux sous-groupes, les relevés sur **calcaires marneux et faible épaisseur de sol (< 50 cm)**, d'une part et trois relevés bénéficiant d'une **épaisseur de sol convenable (> 50 cm)**, d'autre part. Par suite, la variance de cet échantillon de Lure est de 4,82, c'est-à-dire bien plus réduite que celle de l'échantillon Ventoux (variance = 15,10).

Cet échantillon de Lure n'offre que trois types de milieu, correspondant à trois unités géo-pédologiques du Ventoux. On note que dans 9 relevés sur les 10 effectués, l'indice de fertilité de la placette est supérieur à la valeur moyenne de H_{80} de l'unité géo-pédologique correspondante. En moyenne la hauteur à 80 ans sur le versant nord du Ventoux atteint pour les 50 relevés une valeur de 17,97 m ; si on considère à présent l'échantillon "Ventoux-Lure", soit 60 relevés, cette moyenne demeure stable 17,98 m. Le *Pin noir* d'Autriche semble réagir au milieu de façon assez comparable dans le Ventoux et dans Lure.

Le modèle n°1 construit dans le Ventoux, s'ajuste bien aux données de la Montagne de Lure ; il fournit une prédiction correcte de l'indice de fertilité pour les trois milieux, identiques à ceux observés dans le Ventoux, qui ont été inventoriés dans ce massif forestier satellite.

DIOIS-NYONSAIS

Relevés	Age	Hauteur	H80	E.T.H80
N01	73	18,36	19,31	0,4047
N02	57	16,26	20,19	1,1430
N03	65	18,10	20,45	0,7373
N04	59	15,60	18,91	1,0350
N05	84	17,70	17,30	0,2962
N06	76	14,60	15,00	0,3160
N07	79	15,73	15,84	0,2676
N08	75	14,00	14,49	0,3415
N09	60	15,63	18,72	0,9829
N10	76	18,56	19,08	0,3166
N11	74	18,90	19,71	0,3721
N12	76	18,43	18,94	0,3166
N13	83	16,20	15,93	0,2805

Tableau n°1

Indice de fertilité issu du modèle HERVÉ pour les 13 relevés du Nyonsais

Age (ans)

Hauteur de la placette (en mètres)

H80 : hauteur à 80 ans, modèle J.-Ch. HERVÉ

E.T.H80 : écart-type sur la valeur H₈₀

Comme dans le Ventoux, le H₈₀ présenté dans le tableau précédent est obtenu grâce au modèle de "Chapman-Richards", adapté par J.-Ch. HERVÉ. Cette valeur est comparée avec celle obtenue en utilisant les modèles élaborés dans le Diois, que l'on suppose vrais à une faible distance, plus au sud dans la fosse Vocontienne.

Le tableau suivant permet de déterminer l'indice de fertilité pour chaque relevé du Nyonsais, grâce aux variables écologiques les plus significatives ; on y retrouve :

- *"altitude",
- *"RUP" : réserve utile du profil,
- *"S" : l'exposition sud,
- *"pier1" : 10 % de pierrosité,
- *"pier23" : 20 à 30 % de pierrosité,
- *"P<A" : pertes inférieures aux apports,
- *"Vconc" : mi-versant concave,
- *"Vrect" : mi-versant rectiligne,
- *"Vconv" : mi-versant convexe,
- *"grèze" : roche, la grèze,
- *"caldur" : roche, le calcaire dur.

Les trois modèles mis au point dans le Diois et utilisés ici pour prédire "H₈₀mod" dans le Nyonsais sont les suivants (à titre de rappel) :

modèle n°1 : 8 variables

$$H_{80} = 3,896 + 0,007 \text{ alti} + 0,096 \text{ RUP} - 2,42 \text{ S} + 3,13 \text{ Vconc} + 1,52 \text{ Vconv} + 2,48 \text{ pier1} + 2,77 \text{ pier23} + 2,60 \text{ caldur}$$

(en mètres)

modèle n°2 : 8 variables

$$H_{80} = 1,716 + 0,009 \text{ alti} + 0,095 \text{ RUP} + 4,63 \text{ Vconc} + 2,49 \text{ Vrect} + 1,56 \text{ Vconv} + 2,68 \text{ pier1} + 2,40 \text{ pier23} - 2,98 \text{ grèze}$$

(en mètres)

modèle n°3 : 8 variables

$$H_{80} = 0,338 + 0,01 \text{ alti} + 0,116 \text{ RUP} + 4,01 \text{ Vconc} + 3,22 \text{ Vrect} + 2,24 \text{ Vconv} - 1,55 \text{ S} + 2,51 \text{ P<A} - 2,32 \text{ grèze}$$

(en mètres)

Tableau n°2

Descripteurs du milieu les plus pertinents,
pour calculer H₈₀mod

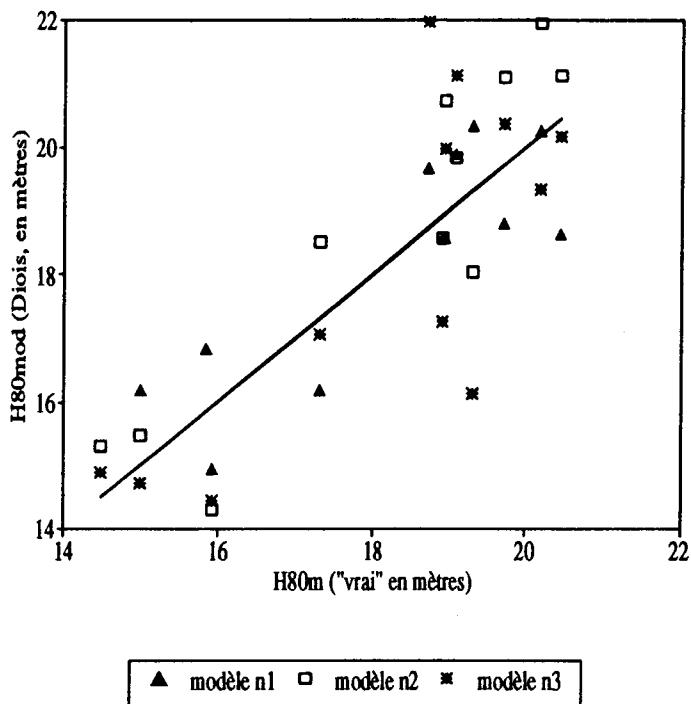
Relevés	altitude	RUP	S	pier1	pier23	Vconc	Vrect	Vconv	P<A	grèze	caldur
N01	1000	45,6	0	1	0	0	0	0	0	0	1
N02	950	43,13	0	1	0	1	0	0	0	0	0
N03	880	63,7	0	1	0	0	1	0	0	0	0
N04	850	49,7	0	1	0	0	0	1	0	0	0
N05	790	44,95	0	1	0	0	1	0	0	0	0
N06	780	45,5	0	1	0	0	1	0	0	1	0
N07	800	34,88	0	1	0	0	0	1	0	1	0
N08	780	40,4	1	0	0	0	1	0	0	0	0
N09	1120	57,35	0	1	0	0	1	0	0	0	0
N10	1110	58	0	0	1	0	0	0	1	0	0
N11	1050	50	0	0	1	0	1	0	0	0	0
N12	980	52,8	0	0	1	0	1	0	0	0	0
N13	590	46,5	0	1	0	0	0	0	1	0	0
mod. n°1	0,007	0,096	-2,42	2,48	2,77	3,13	-	1,52	-	-	2,60
mod. n°2	0,009	0,095	-	2,68	2,40	4,63	2,49	1,56	-	-2,98	-
mod. n°3	0,01	0,116	-1,55	-	-	4,01	3,22	2,24	2,51	-2,32	-

Le calcul final de l'indice de fertilité se fait en sommant l'ensemble des valeurs prises par les différents éléments du milieu à une constante près. Les résultats concernant la prédiction de l'indice de fertilité dans le Nyonsais grâce aux modèles du Diois sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Estimation des grandeurs H₈₀ en vue d'une comparaison
entre les valeurs vraies et les valeurs estimées

Relevés	H80m	H80mod1	H80mod2	H80mod3	diff1	diff2	diff3
N01	19,31	20,32	18,02	16,12	-1,005	1,291	3,191
N02	20,19	20,26	21,95	19,32	-0,073	-1,761	0,869
N03	20,45	18,62	21,12	20,17	1,834	-0,671	0,276
N04	18,91	18,58	18,57	17,25	0,335	0,339	1,664
N05	17,30	16,19	18,50	17,06	1,109	-1,201	0,242
N06	15,00	16,17	15,49	14,70	-1,174	-0,485	0,299
N07	15,84	16,81	13,73	12,70	-0,975	2,109	3,139
N08	14,49	10,79	15,29	14,88	3,700	-0,802	-0,385
N09	18,72	19,68	22,74	21,96	-0,960	-4,023	-3,239
N10	19,08	19,89	19,84	21,12	-0,814	-0,760	-2,037
N11	19,71	18,78	21,11	20,37	0,932	-1,396	-0,663
N12	18,94	18,56	20,72	19,96	0,382	-1,783	-1,022
N13	15,93	14,95	14,30	14,43	0,984	1,630	1,500
Effectif	13	13	13	13			
Moyenne	17,99	17,66	18,57	17,70			
Variance	4,133	7,196	9,188	8,884			
Std. devi.	2,033	2,682	3,031	2,981			
Médiane	18,91	18,58	18,57	17,25			

Tableau n°3



Il reste à comparer ces "H₈₀" du Nyonsais, qui sont soit issus du modèle de J.-Ch. HERVÉ ("vrai" valeur), soit des trois modèles "milieu" du Diois. Cette comparaison nous permettra de conclure sur l'efficacité des modèles mis au point dans le Diois, lorsqu'ils sont utilisés dans le Nyonsais et donc sur leur *pouvoir de prédiction*.

Pour chaque modèle du Diois, on teste l'hypothèse "H₀" la moyenne des différences est nulle et on calcule une valeur pour "t". Disposant de trois modèles dans le Diois, trois valeurs de "t" sont calculées. le tableau ci-dessous rassemble les résultats.

Tableau n°4

**Test pour comparer
le H₈₀ vrai avec les H₈₀ issus
des modèles n°1, n°2, n°3**

	diff1	diff2	diff3
"m"	0,329	-0,578	0,295
"s"	1,411	1,641	1,852
"t"	0,840	-1,270	0,574
au risque 5 % et d.d.1. = 12, table = 2,179 Dans les trois cas la différence est nulle Les modèles "Diois" ont un sens dans le Nyonsais			
diff > 0	7	4	8
diff < 0	6	9	5

Les trois tests précédents indiquent que les trois modèles du Diois permettent de déterminer l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche dans une zone située dans la partie sud de la fosse Vocontienne. En effet, dans ces trois cas, aucune différence significative ne peut être enregistrée entre la série "vraie" et celle calculée grâce aux modèles "milieu". Cependant, on constate que seul le modèle n°1 n'induit pas de biais, alors que le modèle n°2 a tendance à

sur-estimer la valeur de H_{80} et le modèle n°3 a tendance à sous-estimer cette même valeur. Finalement, le modèle n°1, élaboré dans le Diois (ensemble des forêts de Solaure et de Glandasse), est le seul à pouvoir être retenu afin de déterminer H_{80} dans le Nyonsais.

En observant le tableau n°3 et sachant que la variance totale, enregistrée pour l'échantillon des " H_{80} " observés dans le Diois, est de 12,59, on constate que le domaine initial des relevés du Nyonsais est plus réduit que celui sélectionné dans le Diois (variance totale = 4,13). L'amplitude des relevés du Nyonsais se répartit de 14,49 à 20,45 m, alors que dans l'ensemble Diois les hauteurs à 80 ans s'étalent de 7,43 à 23,93 m ; les situations les pires et les meilleures font défaut dans le Nyonsais, soit parce qu'elles n'existent pas en peuplement de *Pin noir*, soit parce qu'elles appartiennent à d'autres forêts domaniales que celles qui ont été retenues.

Par ailleurs, pour l'échantillon "Nyonsais", il faut signaler que la variance des " H_{80} " prédits par le modèle n°1 (tableau n°3) est égale à 7,2, soit une valeur plus forte que celle de l'échantillon des observations de terrain (variance = 4,13). Ce résultat dépend d'un unique relevé : "N08", mal estimé par le modèle n°1. Pour ce cas particulier, le modèle prédit une hauteur à 80 ans inférieure de 3,7 m à la réalité ; on peut supposer qu'une erreur s'est notamment glissée dans l'estimation de la réserve utile. Si on prend la liberté de supprimer ce relevé "N08", la variance des " H_{80} " sur l'échantillon "Nyonsais" des 12 relevés estimés par le modèle n°1 devient 3,2, c'est-à-dire inférieure à celle de l'échantillon des observations. Un tel résultat semble plus logique dans la mesure où la modélisation s'ajuste en priorité à la partie centrale du nuage des relevés (au plus grand nombre), de telle sorte que les situations les meilleures sont généralement sous-estimées par le modèle et les situations les pires sont sur-estimées, cet effet a pour conséquence une réduction de la variance sur les estimations modélisées par rapport aux valeurs sources.

Le modèle n°1 établi dans le Diois, nous semble satisfaisant pour déterminer les H_{80} du Nyonsais, soit à 40 km plus au sud. Ce modèle ne présente pas de biais, comme nous l'avons signalé plus haut et l'écart entre la valeur réelle de H_{80} et sa valeur prédite par le modèle n°1 est :

- * dans 8 cas sur 13 inférieur à 1 m,
- * dans 3 cas sur 13 entre 1 m et 1,2 m,
- * dans 1 cas sur 13 égal à 1,8 m (N03),
- * dans 1 cas sur 13 égal à 3,7 m (N08).

L'observation des indices de fertilité recueillis sur le terrain montre que dans onze cas sur treize cette valeur est supérieure au H_{80} moyen caractéristique de l'unité géo-pédologique, à laquelle appartient le relevé. On peut conclure que dans cette région du Nyonsais, une unité géo-pédologique quelconque offre une production plus forte pour le *Pin noir*, que dans le Diois.

DIOIS-GAPENÇAIS

L'autre massif satellite choisi dans la fosse Vocontienne est l'ensemble des forêts domaniales de "Bonsecours et Saint-Genis" (Hautes-Alpes), constituant un synclinal perché identique au massif forestier test du Diois : synclinal de "Solaure et Glandasse". Ce massif du Gapençais se situe à 50 km plus au sud-est du Diois.

Vient ensuite, la même succession de tableaux que pour le massif du Nyonsais, fournissant les différentes valeurs de l'indice de fertilité : soit H_{80} "vrai", soit " H_{80} mod" issus des modèles Diois. Ces grandeurs sont ensuite comparées dans un test sur la moyenne des différences, comme il s'agit de séries appariées.

A l'échelle intermédiaire

Relevés	Age	Hauteur	H80	E.T.H80
G01	86	12,80	12,48	0,3169
G02	81	18,20	18,09	0,2636
G03	83	21,17	20,77	0,2819
G04	91	21,73	20,45	0,4634
G05	81	13,83	13,78	0,2633
G06	88	15,80	15,18	0,3733
G07	93	11,20	10,81	0,3811
G08	77	21,23	21,66	0,2951
G09	79	16,23	16,35	0,2676
G10	89	24,33	23,07	0,4134
G11	73	23,43	24,62	0,4049
G12	83	20,53	20,15	0,2818
G13	71	19,27	20,59	0,4777

Tableau n°1

Indice de fertilité issu du modèle HERVÉ pour les 13 relevés du Gapençais

Age (ans)

Hauteur de la placette (en mètres)

H80 : hauteur à 80 ans, modèle J.-Ch. HERVÉ

E.T.H80 : écart-type sur la valeur H₈₀

Tableau n°2

Descripteurs du milieu les plus pertinents, pour calculer H_{80mod}

Relevés	altitude	RUP	S	pier1	pier23	Vconc	Vrect	Vconv	P<A	grèze	caldur
G01	880	49,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G02	850	48,02	1	1	0	1	0	0	1	0	0
G03	760	52,7	0	1	0	1	0	0	1	0	0
G04	1180	63,3	0	1	0	0	1	0	0	0	1
G05	1200	28,4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
G06	1110	32,2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
G07	1010	34,3	1	0	0	0	1	0	0	0	0
G08	880	75,6	0	1	0	0	1	0	0	0	0
G09	880	42,6	0	1	0	0	1	0	0	0	0
G10	930	93,6	1	1	0	1	0	0	1	0	0
G11	900	52,6	0	1	0	1	0	0	1	0	1
G12	900	43,0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
G13	880	53,0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
mod. n°1	0,007	0,096	-2,42	2,48	2,77	3,13	-	1,52	-	-	2,60
mod. n°2	0,009	0,095	-	2,68	2,40	4,63	2,49	1,56	-	-2,98	-
mod. n°3	0,01	0,116	-1,55	-	-	4,01	3,22	2,24	2,51	-2,32	-

Les trois modèles, mis au point dans le Diois et utilisés ici pour prédire "H_{80mod}" dans le Gapençais, sont les suivants (à titre de rappel) :

modèle n°1 : 8 variables

$$H_{80} = 3,896 + 0,007 \text{ alti} + 0,096 \text{ RUP} - 2,42 \text{ S} + 3,13 \text{ Vconc} + 1,52 \text{ Vconv} + 2,48 \text{ pier1} + 2,77 \text{ pier23} + 2,60 \text{ caldur}$$

(en mètres)

modèle n°2 : 8 variables

$$H_{80} = 1,716 + 0,009 \text{ alti} + 0,095 \text{ RUP} + 4,63 \text{ Vconc} + 2,49 \text{ Vrect} + 1,56 \text{ Vconv} + 2,68 \text{ pier1} + 2,40 \text{ pier23} - 2,98 \text{ grèze}$$

(en mètres)

modèle n°3 : 8 variables

$$H_{80} = 0,338 + 0,01 \text{ alti} + 0,116 \text{ RUP} + 4,01 \text{ Vconc} + 3,22 \text{ Vrect} + 2,24 \text{ Vconv} - 1,55 \text{ S} + 2,51 \text{ P<A} - 2,32 \text{ grèze}$$

(en mètres)

Estimation des grandeurs H_{80} en vue d'une comparaison entre les valeurs vraies et les valeurs estimées

Relevés	H80m	H80mod1	H80mod2	H80mod3	diff1	diff2	diff3
G01	12,48	14,79	14,60	15,32	-2,305	-2,124	-2,842
G02	18,09	17,62	21,49	19,80	0,470	-3,399	-1,709
G03	20,77	19,86	21,10	20,95	0,913	-0,329	-0,177
G04	20,45	23,27	23,87	23,28	-2,817	-3,417	-2,828
G05	13,78	15,05	18,24	14,68	-1,266	-4,458	-0,896
G06	15,18	14,72	17,57	18,94	0,460	-2,394	-3,762
G07	10,81	11,81	16,85	16,58	-0,999	-6,036	-5,774
G08	21,66	19,76	22,25	21,55	1,903	-0,594	0,108
G09	16,35	16,59	19,11	17,73	-0,243	-2,762	-0,138
G10	23,07	22,55	26,57	25,92	0,522	-3,500	-2,847
G11	24,62	23,42	22,39	22,41	1,198	2,231	2,215
G12	20,15	19,37	19,34	17,99	0,781	0,814	2,163
G13	20,59	20,19	20,10	18,94	0,402	0,488	1,655
Effectif	13	13	13	13			
Moyenne	18,31	18,38	20,27	19,54			
Variance	18,113	13,283	10,058	10,462			
Std. devi.	4,256	3,645	3,171	3,234			
Médiane	20,15	19,37	20,10	18,94			

Tableau n°3

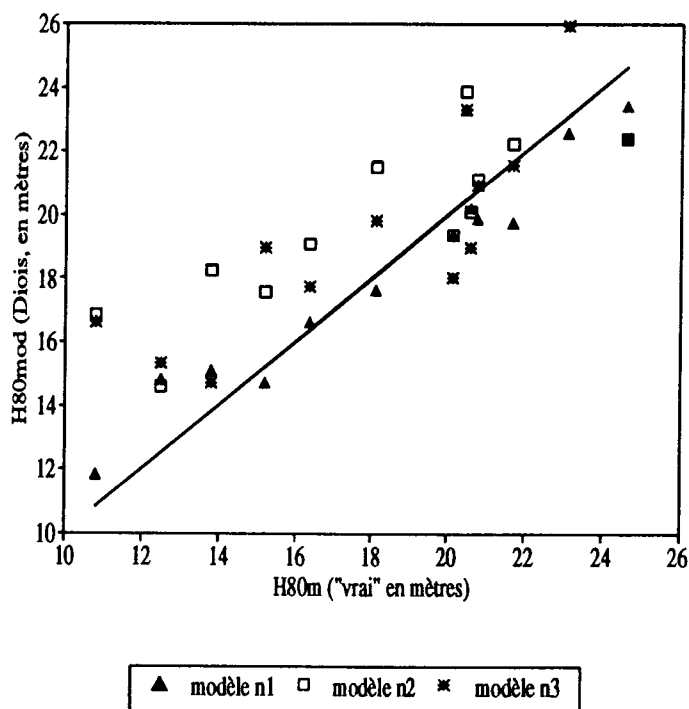


Tableau n°4

Test pour comparer
le H_{80} vrai avec les H_{80} issus
des modèles n°1, n°2, n°3

	diff1	diff2	diff3
"m"	-0,076	-1,960	-1,236
"s"	1,390	2,346	2,411
"t"	-0,196	-3,012	-1,849
au risque 5 % et d.d.l. = 12, table = 2,179 Les différences entre H_{80} vrai et H_{80} mod n°1 et n°3 sont nulles, diff2 = $H_{80m} - H_{80mod2}$ est non nulle, les deux séries ne sont pas identiques			
diff > 0	8	3	4
diff < 0	5	10	9

Le test précédent concernant la moyenne des différences montre que cette moyenne est non nulle si on compare la série des H_{80} vrais aux H_{80} prédits par le modèle n°2 ; de plus ce modèle n°2 présente un fort biais qui sur-estime la valeur de H_{80} (huit différences positives). Ce modèle du Diois n'est donc pas valable pour prédire la production du *Pin noir* d'Autriche dans le Gapençais. Par contre, les modèles n°1 et n°3 peuvent être acceptés pour prédire H_{80} , puisque la moyenne des différences entre valeurs vraies et valeurs prédictives est nulle ; cependant ces deux modèles ont tendance à introduire un biais dans l'estimation de H_{80} . Malgré cette remarque, le modèle n°1 reste le meilleur, car le biais observé dans ce cas, est plus une tendance à sous-estimer la valeur de H_{80} , ce qui s'explique assez facilement, comme nous le verrons plus loin. Pour la suite, nous considérons le seul modèle n°1, en tant que modèle optimal de prédiction.

Ce massif satellite du Gapençais, à l'inverse du Nyonsais, offre des potentialités de milieu presque plus importantes que celles du Diois. On constate que l'amplitude de l'indice de fertilité observé dans le Diois va de 7,43 à 23,42 m, alors que dans le Gapençais les hauteurs à 80 ans s'étagent de 10,80 à 24,62 m, soit un débordement par rapport au Diois pour les valeurs les plus fortes ; ceci se traduit par une variance plus forte dans le Gapençais (variance = 18,31) que dans le Diois (variance = 12,59). (tableau n°3).

Un des effets de la régression est de réduire la variance des estimations par rapport à celle des observations. Le modèle est plus stable et plus juste dans la partie centrale du nuage des points ; à l'inverse, il est peu précis et flou dans les parties extrêmes du nuage. Il a tendance à sur-estimer la valeur de H_{80} pour les H_{80} les plus faibles et par contre, il est moins optimiste que la réalité pour les valeurs les meilleures ; cet effet resserre donc l'amplitude des indices de fertilité. Dans le cas du Gapençais, l'amplitude des valeurs étant décalée vers les hauteurs les plus fortes, logiquement le modèle réduira cet effet, d'où une tendance à sous-estimer les valeurs de H_{80} , ce qui explique le biais observé dans le cas du modèle n°1.

Les points "G10" et "G11" exceptionnellement bons ont une valeur de H_{80} sous-estimée par rapport à la réalité. Le relevé "G10" est dans une situation nouvelle, non observée dans le Diois correspondant à la ripisylve ; ce point ne sera pas introduit dans une unité géopédologique. Dans une telle situation, tous les paramètres du milieu sont favorables. La réserve utile est la meilleure que l'on ait observé dans les relevés de la fosse Vocontienne, il s'y ajoute une topographie très favorable à l'échelle du versant et de la station. Les 23,07 m mesurés pour l'indice de fertilité sur cette placette sont réduits à 22,55 m par l'estimation du modèle ; il s'agit au demeurant d'une bonne estimation.

Par contre, pour le relevé "G11" l'estimation par le modèle est moins bonne, car ce peuplement est plus haut que le précédent : $H_{80} = 24,62$ m estimé 23,42 m. Cette placette

se situe à l'intérieur du synclinal, c'est-à-dire en milieu plat, à bilan hydrique positif, et à topographie de versant favorable, forme concave. La réserve utile y est moyenne (52,6 mm), mais sous-estimée car le relevé est sur des calcaires durs fissurés, où le volume de sol dans la fissure n'est pas pris en compte. Ce relevé correspond bien à l'unité géo-pédologique des "Calcaires durs du plateau" décrite dans le Diois, tout en offrant un indice de fertilité meilleur.

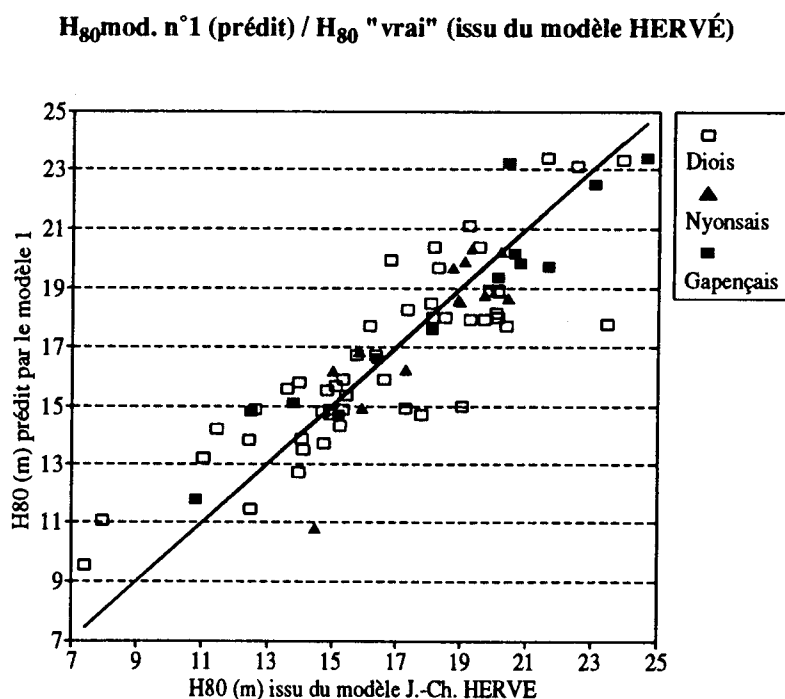
Les treize relevés du Gapençais complètent cinq des huit unités géo-pédologiques inventoriées dans le Diois. Si on isole le relevé "G10", hors unités géo-pédologiques, on note que sept relevés sur les douze considérés disposent d'une valeur de H_{80} supérieure à la moyenne des H_{80} dans l'unité géo-pédologique correspondante. On peut en conclure qu'en s'éloignant vers l'est de la fosse Vocontienne, pour un même milieu la réponse en terme de production du *Pin noir* d'Autriche a tendance à être meilleure. Ce résultat figurait déjà dans le cas de l'axe Ventoux-Lure, on peut donc supposer que cette tendance à l'amélioration de la production, dans la direction ouest-est pour le *Pin noir* d'Autriche, s'explique par un facteur macro-climatique : les précipitations, qui augmentent régulièrement d'ouest en est, pour une latitude donnée.

Le Nyonsais et le Gapençais offrent une conclusion identique : la production prise comme la hauteur à 80 ans est meilleure dans ces deux massifs forestiers satellites que dans le Diois, massif forestier test. Or ce résultat nous est également donné par des chiffres de l'Inventaire Forestier National échelon de Montpellier (I.F.N.). Cet organisme classait par ordre croissant de production le Diois, puis le Nyonsais et le Gapençais. A titre de rappel, l'I.F.N. affichait comme hauteur moyenne à un âge de référence (80 ans), grâce au second cycle d'inventaire :

- * Diois (Drôme) $H_{80} = 15,58$ m
- * Nyonsais (Drôme) $H_{80} = 16,88$ m
- * Gapençais (Hautes-Alpes) $H_{80} = 16,95$ m

EN CONCLUSION

Ce graphique en guise de conclusion pour visualiser à la fois l'espace couvert par les trois jeux de données de la fosse Vocontienne et la bonne prédiction de H_{80} grâce au modèle n°1.



Par ailleurs, chaque région climato-géologique est issue d'un découpage du milieu en fonction de la géologie et de la pédologie ; afin de mesurer la valeur prédictive du milieu sur la production, dans chaque région climato-géologique, nous avons effectué certains regroupements parmi les relevés des massifs forestiers tests et les relevés des massifs forestiers satellites. Ces regroupements interviennent aussi bien dans une approche synthétique que dans une approche analytique ; ils se présentent de la façon suivante :

- * Chaînon Ventoux-Lure,
- * Diois-Nyonsais,
- * Diois-Gapençais,
- * Fosse Vocontienne : Diois-Nyonsais-Gapençais.

2) APPROCHE SYNTHETIQUE : RELATIONS UNITES GEO-PEDOLOGIQUES/PRODUCTION

Les relevés effectués dans Lure, le Nyonsais et le Gapençais prennent place dans le découpage initial en unités géo-pédologiques, réalisé soit dans le Ventoux, soit dans les forêts domaniales de Solaure et de Glandasse. Cette approche synthétique, nous permet d'une part, de tester si la liaison entre les unités géo-pédologiques et la production existe toujours, et d'autre part, d'observer dans quelle mesure cette stratification permet d'exprimer la production et avec quelle précision. Cela revient à estimer la valeur prédictive d'une telle stratification, établie a priori pour un massif forestier test, et étendue à une échelle plus petite.

Les quatre tableaux ci-dessous, correspondant aux quatre regroupements de relevés signalés précédemment, présentent l'indice de fertilité "H₈₀" moyen pour les différentes unités géo-pédologiques inventoriées dans les massifs forestiers, à une échelle intermédiaire (légende page 110).

CHAINON VENTOUX-LURE

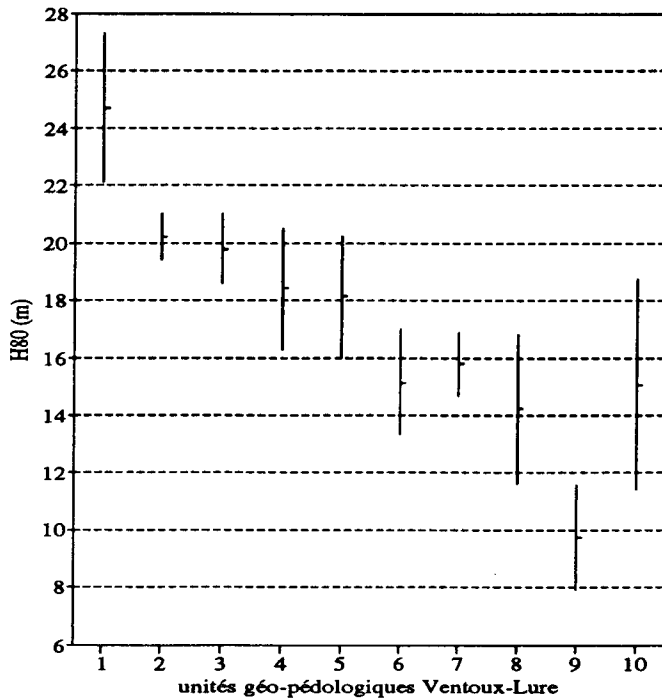
Résultats de l'analyse de variance :

- * F-ratio = 20,467
- * Variance inter-groupes = 616,225 ddl = 9
- * Variance intra-groupes = 167,265 ddl = 50
- * R² = 0,787
- * SE = 1,83 m, soit 1,83/H₈₀moyen = 10,18 %

Moyenne de l'indice de fertilité pour chaque unité géo-pédologique

unités géo-pédologiques	effectif	moyenne H80 (m)	écart type (m)	écart population (m)	intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %	
Zones d'atterrissement	2	24,70	0,89	1,293	22,102	27,298
Profondeur > 50 cm	21 (+3)	20,216	0,352	0,399	19,414	21,018
Cal. durs < 50 cm	9	19,797	0,379	0,610	18,572	21,022
Cal. gréseux < 50 cm	3	18,413	1,578	1,056	16,292	20,535
Brèche < 50 cm	3	18,127	0,548	1,056	16,005	20,248
Grèze < 50 cm	4	15,175	1,062	0,915	13,338	17,012
Cal. marneux < 50 cm	11 (+6)	15,815	0,645	0,551	14,708	16,923
Marnes < 50 cm	2 (+1)	14,235	1,825	1,293	11,637	16,833
Eboulis vifs	4	9,748	1,309	0,915	7,910	11,585
Cône torrentiel	1	15,08	0	1,829	11,405	18,755
Total	60	17,982	0,236	0,236	17,508	18,457

Représentation de la moyenne et de son écart-type de l'indice de fertilité H_{80}



- "1" : Zones d'atterrissement
- "2" : Profondeur > 50 cm
- "3" : Cal. durs < 50 cm
- "4" : Cal. gréseux < 50 cm
- "5" : Brèche < 50 cm
- "6" : Grèze < 50 cm
- "7" : Cal. marneux < 50 cm
- "8" : Marnes < 50 cm
- "9" : Eboulis vifs
- "10" : Cône torrentiel

DIOIS-NYONSAIS

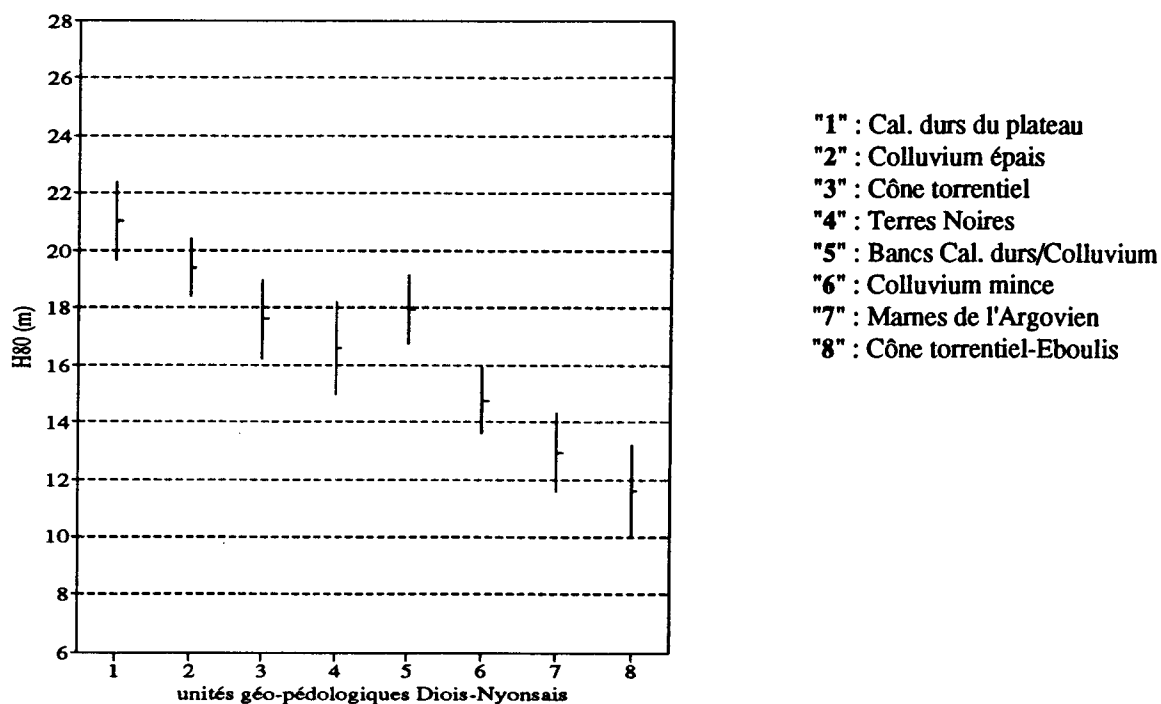
Résultats de l'analyse de variance :

- * F-ratio = 22,102
- * Variance inter-groupes = 506,672 ddl = 7
- * Variance intra-groupes = 180,116 ddl = 55
- * $R^2 = 0,738$
- * SE = 1,81 m, soit $1,81/H_{80} \text{moyen} = 10,72 \%$

Moyenne de l'indice de fertilité pour chaque unité géo-pédologique

unités géo-pédologiques	effectif	moyenne H_{80} (m)	écart type (m)	écart population (m)	intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %	
Cal. durs du plateau	7	21,016	0,946	0,684	19,645	22,387
Colluvium épais	13 (+4)	19,401	0,313	0,502	18,395	20,407
Cône torrentiel	7	17,599	0,863	0,684	16,228	18,970
Terres Noires	5 (+1)	16,592	0,699	0,809	14,970	18,214
Bancs Cal. durs/Colluvium	9 (+5)	17,929	0,377	0,603	16,720	19,138
Colluvium mince	10 (+2)	14,782	0,314	0,572	13,635	15,929
Marnes de l'Argovien	7 (+1)	12,957	1,042	0,684	11,586	14,328
Cône torrentiel-Eboulis	5	11,614	1,036	0,809	9,992	13,236
Total	63	16,880	0,228	0,228	16,423	17,337

Représentation de la moyenne et de son écart-type
de l'indice de fertilité H₈₀



DIOIS-GAPENÇAIS

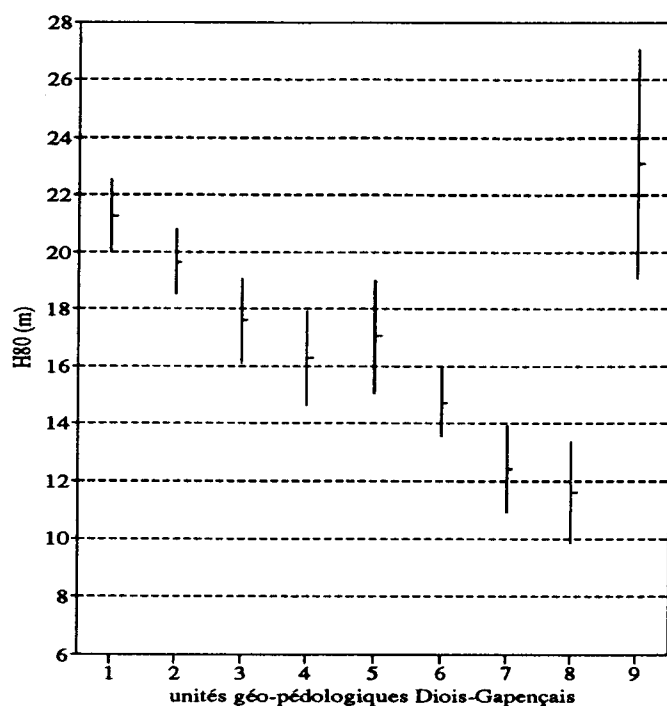
Résultats de l'analyse de variance :

- * F-ratio = 20,811
- * Variance inter-groupes = 652,972 ddl = 8
- * Variance intra-groupes = 211,793 ddl = 54
- * R² = 0,755
- * SE = 1,98 m, soit 1,98/H₈₀moyen = 11,68 %

Moyenne de l'indice de fertilité pour chaque unité géo-pédologique

unités géo-pédologiques	effectif	moyenne H80 (m)	écart type (m)	écart population (m)	intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %	
Cal. durs du plateau	10 (+3)	21,247	0,753	0,626	19,991	22,503
Colluvium épais	12 (+3)	19,638	0,396	0,572	18,492	20,785
Cône torrentiel	7	17,599	0,863	0,749	16,098	19,100
Terres Noires	6 (+2)	16,267	0,964	0,809	14,645	17,888
Bancs Cal. durs/Colluvium	4	17,045	0,430	0,990	15,059	19,031
Colluvium mince	11 (+3)	14,754	0,321	0,597	13,556	15,951
Marnes de l'Argovien	7 (+1)	12,431	1,046	0,749	10,930	13,932
Cône torrentiel-Eboulis	5	11,614	1,036	0,886	9,838	13,390
Ripisylve	1 (+1)	23,07	0	1,980	19,099	27,041
Total	63	16,945	0,250	0,250	16,445	17,446

Représentation de la moyenne et de son écart-type
de l'indice de fertilité H_{80}



- "1" : Cal. durs du plateau
- "2" : Colluvium épais
- "3" : Cône torrentiel
- "4" : Terres Noires
- "5" : Bancs Cal. durs/Colluvium
- "6" : Colluvium mince
- "7" : Marnes de l'Argovien
- "8" : Cône torrentiel-Eboulis
- "9" : Ripisylve

FOSSE VOCONTIENNE : DIOIS-NYONSAIS-GAPENÇAIS

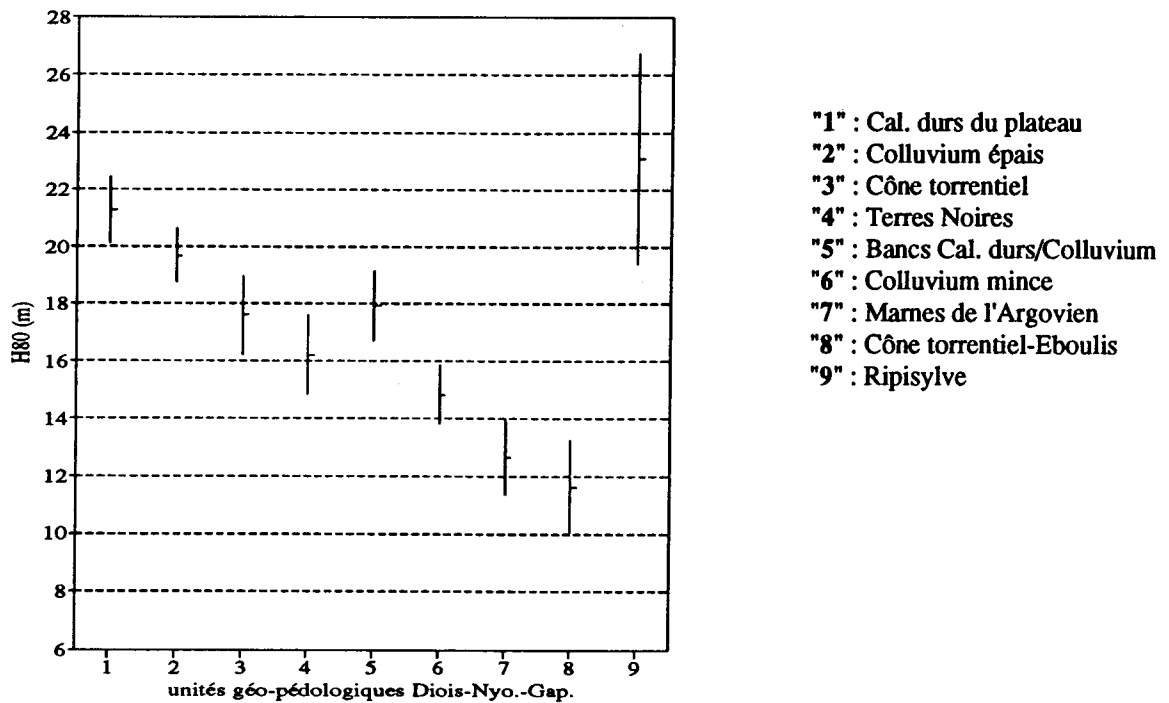
Résultats de l'analyse de variance :

- * F-ratio = 25,949
 - * Variance inter-groupes = 700,149
 - * Variance intra-groupes = 225,974
 - * $R^2 = 0,869$
 - * SE = 1,84 m, soit $1,84/H_{80} \text{moyen} = 10,75 \%$
- ddl = 8
ddl = 67

Moyenne de l'indice de fertilité pour chaque unité géo-pédologique

unités géo-pédologiques	effectif	moyenne H_{80} (m)	écart type (m)	écart population (m)	intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %	
Cal. durs du plateau	10	21,247	0,753	0,581	20,088	22,406
Colluvium épais	16	19,693	0,303	0,459	18,776	20,610
Cône torrentiel	7	17,599	0,863	0,694	16,213	18,984
Terres Noires	7	16,219	0,816	0,694	14,833	17,604
Bancs Cal. durs/Colluvium	9	17,929	0,377	0,612	16,707	19,151
Colluvium mince	13	14,856	0,282	0,509	13,839	15,873
Marnes de l'Argovien	8	12,689	0,941	0,649	11,392	13,985
Cône torrentiel-Eboulis	5	11,614	1,036	0,821	9,974	13,254
Ripisylve	1	23,07	0	1,837	19,403	26,737
Total	76	17,124	0,211	0,211	16,703	17,544

Représentation de la moyenne et de son écart-type
de l'indice de fertilité H_{80}



EN CONCLUSION

Les relevés des massifs forestiers satellites viennent grossir les unités géo-pédologiques, ce qui se traduit par une augmentation du test "F", qui indique une forte liaison entre la stratification du milieu et l'indice de fertilité H_{80} , en fonction de l'effectif. Ce qui aurait tendance à démontrer que :

- * le découpage en régions climato-géologiques correspond bien à des entités homogènes, dans lesquelles les massifs forestiers satellites peuvent être confondus au massif forestier test ;
- * le milieu, tel qu'il a été décrit au travers des unités géo-pédologiques est un outil stable et pertinent pour décrire l'indice de fertilité ;
- * la liaison entre le milieu et la production demeure vraie et inchangée à deux échelles de perception différentes :
 - ◆ Pour le Ventoux, $R^2 = 0,82$ et $SE = 1,84$ m, ces chiffres deviennent pour l'axe Ventoux-Lure, $R^2 = 0,79$ et $SE = 1,83$ m ;
 - ◆ Pour le Diois, $R^2 = 0,73$ et $SE = 1,98$ m, ces chiffres deviennent pour :
 - Diois-Nyonsais, $R^2 = 0,74$ et $SE = 1,81$ m,
 - Diois-Gapençais, $R^2 = 0,76$ et $SE = 1,98$ m,
 - Diois-Nyonsais-Gapençais, $R^2 = 0,87$ et $SE = 1,84$.

L'observation des chiffres de l'axe Ventoux-Lure montre bien qu'il y a similitude entre le versant nord du Ventoux et le versant nord de la Montagne de Lure. Par contre, pour le fosse Vocontienne, les résultats du "SE" sont inchangés quelque soit l'échelle, alors que ceux du "R²" sont très améliorés par le passage du massif forestier test à la fosse Vocontienne, proprement dite. Par ailleurs, les régions climato-géologiques correspondent à des entités homogènes et de même niveau, puisque les chiffres obtenus dans le "chaînon Ventoux-Lure" et dans la "fosse Vocontienne" sont du même ordre de grandeur.

A l'échelle intermédiaire

Cette grande stabilité dans l'ensemble indique que le maximum d'explication, pouvant être fournie par le milieu est atteint, lorsqu'il s'agit de caractériser l'indice de fertilité. Cette approche synthétique, mettant en relation les unités géo-pédologiques et la production, fournit 80 % d'information sur l'indice de fertilité, accompagnée d'une erreur standard inférieure à 2 m, à l'échelle du massif forestier comme à l'échelle intermédiaire.

Les unités géo-pédologiques, en tant qu'outil de diagnostic de la fertilité, présentent le même pouvoir d'explication à grande échelle et à échelle intermédiaire ; elles sont tout aussi pertinentes à ces deux échelles, pour exprimer la liaison entre le milieu et la production du *Pin noir* d'Autriche, que l'approche analytique, qui va être exposée à présent.

3) APPROCHE ANALYTIQUE : EXPRESSIONS DE LA FERTILITE A L'ECHELLE INTERMEDIAIRE

Une autre manière d'aborder cette phase d'extrapolation, du massif forestier test vers le massif forestier satellite, peut consister en la recherche d'une nouvelle expression de la fertilité grâce aux variables du milieu, en rassemblant la totalité des relevés réalisés dans chaque région climato-géologique. Nous reprenons les mêmes regroupements que précédemment :

- * Chaînon Ventoux-Lure,
- * Diois-Nyonsais,
- * Diois-Gapençais,
- * Fosse Vocontienne : Diois-Nyonsais-Gapençais.

Afin de construire ces nouvelles expressions caractéristiques de l'échelle intermédiaire, la chaîne de traitements utilisée est la même qu'à l'échelle du massif forestier test ; seul le résultat final est fourni, ici.

CHAINON VENTOUX-LURE

L'association de 50 relevés du versant nord du Ventoux et des 10 relevés du versant nord de la Montagne de Lure, correspond à un jeu de 60 données pour illustrer l'axe Ventoux-Lure. L'expression linéaire retenue est la suivante :

$$H_{80} = 17,682 - 0,051 \text{ pent} - 0,006 \text{ caiBC} + 0,069 \text{ RUP} + 2,551 \text{ P<A} \\ - 3,987 \text{ eboulis} - 1,819 \text{ calmar} + 3,013 \text{ caldur} - 1,24 \text{ epai1} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 33,148 \\ R^2 = 0,839 \\ R^2_{\text{adj}} = 0,813 \\ SE = 1,57 \text{ m, soit } 1,57/H_{80\text{moyen}} = 8,73 \%$$

Cette expression, obtenue par régression linéaire multiple ascendante ou descendante, reprend les huit variables écologiques, qui servaient au modèle n°1 du Ventoux. Pour chacune de ces variables, le coefficient associé a subi un ajustement, mais il reste très proche des valeurs proposées dans l'équation du Ventoux. Le test de Fisher demeure significatif ; la corrélation entre les variables du milieu et la fertilité reste stable " R^2 " = 0,84, car cette liste des variables optimales coïncide avec le maximum d'information que peut fournir le milieu, pour expliquer la production ; enfin, l'erreur standard sur l'indice de fertilité est légèrement réduite, elle est la meilleure valeur rencontrée dans cette étude.

Pour le seul versant nord du Ventoux, nous avons construit dans un second temps, une expression non linéaire, avec pour objectif de mieux cerner la variable réserve

A l'échelle intermédiaire

utile. En effet, cette variable exprime mieux la fertilité sous une forme multiplicative que sous une forme linéaire, comme nous l'avons observé sur le versant nord du Ventoux. Il est possible de reprendre le même genre d'expression dans le cas de l'axe "Ventoux-Lure". L'équation finale est la suivante :

$$H_{80} = 6,738 \text{ RUP}^{0,286} - 0,057 \text{ pent} + 3,410 \text{ caldur} + 1,834 \text{ P<A} - 1,742 \text{ calmar}$$

(en mètres)

$$F = 1084,636$$

$$R^2 = 0,788$$

$$SE = 1,75 \text{ m}$$

Cette expression reprend les termes qui servent à caractériser le Ventoux et il s'y ajoute un nouveau paramètre, déjà présent dans l'expression linéaire : les calcaires marneux. On peut expliquer l'apparition de ce nouvel élément par le fait que 6 relevés sur les 10 de Lure sont sur calcaire marneux, associé à une faible épaisseur (< 50 cm). Cette expression montre que cinq variables du modèle linéaire suffisent à fournir 79 % de l'information sur H_{80} avec une erreur standard en-dessous de 2 m.

Comme pour le versant nord du Ventoux, dans le chaînon Ventoux-Lure, la fertilité du *Pin noir* d'Autriche est sous la dépendance de facteurs exprimant :

- * la teneur en eau : "RUP", "caiBC", "epail" ;
- * la topographie du versant ou de la station : "pent", "Vconc", "Vrect", "Vconv", "epail" ;
- * la nature de la roche sous-jacente : "eboulis", "caldur", "calmar".

Ces variables écologiques constituent une liste minimum et pertinente pour pouvoir prédire l'indice de fertilité de cette essence, qui demeure valable lorsque l'on passe de l'échelle du massif forestier test à l'échelle intermédiaire de la région climato-géologique. Ces variables du milieu permettent d'expliquer 80 % de la variabilité totale contenue dans l'indice de fertilité.

DIOIS-NYONSAIS

Dans ce cadre, nous avons rassemblé les 50 relevés de "Solaure-Glandasse" avec les 13 relevés du Nyonsais, soit un total de 63 relevés. Sur ce nouvel ensemble, la **construction pas à pas d'expressions linéaires de la fertilité**, nous a permis de retrouver les mêmes variables écologiques que celles sélectionnées dans les modèles n°1, n°2 et n°3, établis sur le massif forestier test du Diois. Les deux expressions, qui suivent, sont emboîtées, elles offrent la liste minimum des variables du milieu indispensables pour décrire H_{80} :

modèle à 11 variables (régression linéaire multiple descendante)

$$H_{80} = 4,583 + 0,007 \text{ alti} + 0,099 \text{ RUP} - 1,319 \text{ S} + 3,147 \text{ Vconc} + 1,750 \text{ Vrect}$$
$$+ 2,473 \text{ Vconv} - 1,380 \text{ P>A} + 2,669 \text{ pier1} + 2,164 \text{ pier23}$$
$$+ 1,631 \text{ caldur} - 1,931 \text{ greze}$$

(en mètres)

$$F = 15,345$$

$$R^2 = 0,768$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,718$$

$$SE = 1,77 \text{ m, soit } 1,77/H_{80\text{moyen}} = 10,49 \%$$

modèle à 8 variables (assimilable au modèle n°1 du Diois)

$$H_{80} = 4,493 + 0,007 \text{ alti} + 0,094 \text{ RUP} - 2,119 \text{ S} + 2,953 \text{ Vconc} + 1,261 \text{ Vconv} \\ + 2,411 \text{ pier1} + 2,713 \text{ pier23} + 2,434 \text{ caldur} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 17,630$$

$$R^2 = 0,723$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,682$$

$$SE = 1,88 \text{ m, soit } 1,88/H_{80} \text{moyen} = 11,14 \%$$

A titre indicatif, nous avons cité la première expression, puisque elle reprend la totalité des variables significatives, sélectionnées dans le Diois. Par contre, la seconde expression qui correspond au modèle n°1, mis au point dans le Diois, est celle qui sera retenue pour prédire l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche dans la direction nord-sud de la fosse Vocontienne. On note que les variables du milieu dans ce second modèle ont subi un simple ajustement de leur coefficient respectif.

Ces deux modèles étant emboîtés, un test de Fisher sur les sommes des carrés des écarts permet d'éliminer la première expression au risque 1 %, car :

$F_{\text{calculé}} = 3,50 > F(3,51) = 2,80 \text{ au risque } 5 \%$ $F_{\text{calculé}} = 3,50 < F(3,51) = 4,40 \text{ au risque } 1 \%$
--

La relation à 11 variables apporte davantage d'informations sur l'indice de fertilité que l'expression à 8 variables pour un risque de 5 %, ce qui n'est plus le cas pour un risque à 1 %. La seconde expression, considérée comme optimale et pertinente, sera conservée, car elle nécessite un nombre moins important de variables à collecter, ce qui peut avoir son importance pour le gestionnaire de terrain. En effet, un modèle simplifié (moins de variables) est plus facilement utilisable sur le terrain et ces variables présentent généralement un bon pouvoir explicatif, d'un point de vue biologique. Les remarques suivantes concernent le seul modèle à huit variables. Cependant, il ne faut pas oublier que la *topographie stationnelle* ("P>A") conditionne également la croissance en hauteur du *Pin noir* et que la *roche* ("greze") et la *topographie du versant* ("Vrect") figurent dans l'expression à huit variables sous une autre forme.

L'expression reposant sur un effectif plus important, le test du "F" est plus significatif que celui enregistré à partir d'un échantillon de 50 relevés du Diois ("F" = 13,775). D'autre part, il faut noter aucune amélioration ou diminution sur le "R²" et une légère amélioration sur l'erreur standard. Il semble donc que cette phase d'extrapolation, conduisant à associer des espaces éloignés (Nyonsais situé à 45 km plus au sud), n'ait pas entraîné une perte d'information sur la connaissance et l'estimation de H₈₀. Ceci permet de conclure à une grande homogénéité dans un sens nord-sud, à l'intérieur d'une même région climatogéologique, telle que la fosse Vocontienne, lorsqu'il s'agit de prédire l'indice de fertilité.

Dans cette expression les variables du milieu sont inchangées et les coefficients qui les accompagnent n'ont subi qu'un ajustement par rapport à la valeur qu'ils présentaient dans l'expression du Diois. Ces huit variables du milieu peuvent être retenues comme incontournables pour prédire la fertilité du *Pin noir* d'Autriche ; elles expriment comme nous l'avions déjà précisé, la teneur en eau et des contraintes concernant le support géopédologique.

DIOIS-GAPENÇAIS

Il s'agit dans cette nouvelle direction ouest-est, d'observer la stabilité des variables du milieu qui décrivent la fertilité, afin de conclure sur la prédiction de l'indice de fertilité, qu'elles apportent. Ce nouveau jeu de données réuni les 50 relevés du Diois aux 13

A l'échelle intermédiaire

relevés des forêts domaniales de Bonsecours et de Saint-Genis. Les expressions linéaires obtenues sont les suivantes :

modèle à 9 variables (régression linéaire multiple ascendante)

$$H_{80} = 5,519 + 0,006 \text{ alti} + 0,096 \text{ RUP} - 2,351 \text{ S} + 2,634 \text{ Vconc} + 2,363 \text{ Vconv} \\ - 1,409 \text{ P>A} + 2,740 \text{ pier1} + 2,717 \text{ pier23} + 3,134 \text{ caldur} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 23,953$$

$$R^2 = 0,803$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,769$$

$$SE = 1,79 \text{ m, soit } 1,79/H_{80\text{moyen}} = 10,56 \%$$

modèle à 8 variables (assimilable au modèle n°1 du Diois)

$$H_{80} = 4,585 + 0,006 \text{ alti} + 0,096 \text{ RUP} - 2,566 \text{ S} + 3,491 \text{ Vconc} + 1,637 \text{ Vconv} \\ + 2,558 \text{ pier1} + 2,762 \text{ pier23} + 2,746 \text{ caldur} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 24,318$$

$$R^2 = 0,783$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,751$$

$$SE = 1,87 \text{ m, soit } 1,87/H_{80\text{moyen}} = 11,04 \%$$

Une nouvelle fois ces expressions sont emboîtées et se différencient par une variable : "P>A" (pertes en eau supérieures aux apports) ; cette variable apporte 2 % d'information supplémentaire et une erreur standard réduite, qui passe de 1,87 m à 1,79 m. Or le test de Fisher sur les sommes des carrés des écarts montre que le gain n'est pas suffisamment important pour retenir le modèle à 9 variables au risque 1 %.

$F_{\text{calculé}} = 5,93 > F(1,53) = 4,03 \text{ au risque } 5 \%$ $F_{\text{calculé}} = 5,93 < F(1,53) = 7,15 \text{ au risque } 1 \%$
--

Nous nous en tiendrons au modèle à huit variables, qui correspond au modèle n°1 élaboré initialement dans le Diois, sans oublier que la *topographie stationnelle* ("P>A") influence la production. Ce modèle comme pour la phase d'extrapolation dans le massif satellite du Nyonsais subit un ajustement au niveau des coefficients de chaque variable. Mais l'observation de ces coefficients par rapport à leur valeur dans le Diois montre une grande stabilité. La conclusion est la même que pour l'axe Diois-Nyonsais, on note une grande homogénéité dans le sens ouest-est à l'intérieur de la fosse Vocontienne, pour prédire H_{80} . L'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche est donc fixé grâce à l'altitude et à la réserve utile, il est ensuite ajusté en fonction de critères qualitatifs exprimant la position de la station (topographie, roche, pédologie, exposition). Ces variables traduisent les apports en eau, puis la teneur en eau du milieu, avec quelques restrictions pour les milieux particuliers.

FOSSÉ VOCONTIENNE : DIOIS-NYONSAIS-GAPENÇAIS

Ce dernier regroupement, malgré le petit nombre de relevés correspondant (76), a pour objectif d'estimer l'indice de fertilité sur une région climato-géologique : la fosse Vocontienne. La phase d'extrapolation pour aborder les liaisons entre le milieu et la production à cette échelle, consiste à associer le massif forestier test et les massifs forestiers satellites ; cette méthode introduit certaines incertitudes à l'échelle de la fosse Vocontienne, puisque ce type d'échantillonnage est localisé et irrégulier à l'intérieur d'un espace global. Ainsi, aucun relevé n'a été réalisé dans le Haut-Diois, les Baronnies, le Rosannais, le

A l'échelle intermédiaire

Bochaine, faute de temps et pourtant les résultats suivants se veulent une généralisation à l'espace géographique de la fosse Vocontienne.

La liste de variables écologiques que nous avons tirée des traitements reste stable pour les différents massifs étudiés : "Diois", "Diois-Nyonsais", "Diois-Gapençais" ; elle est rassemblée sous la forme d'une expression donnant la fertilité en fonction du milieu (modèle n°1). Si on s'adresse à la fosse Vocontienne, ces variables conservent un sens et permettent encore d'expliquer l'indice de fertilité. Les 76 relevés se répartissent de la façon suivante :

- * forêt domaniale de Solaure : 40 relevés,
- * forêt domaniale de Glandasse : 10 relevés,
- * forêts domaniales du Nyonsais : 13 relevés,
- * forêts domaniales de Bonsecours et de Saint-Genis, Gapençais : 13 relevés.

Les deux **expressions linéaires** suivantes ont été établies sur cet échantillon de la fosse Vocontienne et regroupent un ensemble stable de variables :

modèle à 11 variables (régression linéaire multiple ascendante et descendante)

$$H_{80} = 5,662 + 0,005 \text{ alti} + 0,097 \text{ RUP} - 1,714 \text{ S} - 1,535 \text{ P>A} + 2,200 \text{ caldur} - 1,484 \text{ greze} \\ + 3,077 \text{ Vconc} + 1,495 \text{ Vrect} + 2,689 \text{ Vconv} + 2,629 \text{ pier1} + 2,373 \text{ pier23} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 23,932 \\ R^2 = 0,804 \\ R^2_{\text{adj}} = 0,771 \\ SE = 1,68 \text{ m, soit } 1,68/H_{80\text{moyen}} = 9,81 \%$$

modèle à 8 variables (assimilable au modèle n°1 du Diois)

$$H_{80} = 4,919 + 0,006 \text{ alti} + 0,097 \text{ RUP} - 2,275 \text{ S} + 2,808 \text{ Vconc} + 1,243 \text{ Vconv} \\ + 2,592 \text{ pier1} + 2,737 \text{ pier23} + 2,336 \text{ caldur} \\ \text{(en mètres)}$$

$$F = 24,497 \\ R^2 = 0,745 \\ R^2_{\text{adj}} = 0,715 \\ SE = 1,88 \text{ m, soit } 1,88/H_{80\text{moyen}} = 10,98 \%$$

Ces deux expressions concernant la fosse Vocontienne, nous offrent la même liste de variables qu'à l'échelle du massif du Diois, pour définir l'indice de fertilité du *Pin noir*. Cette liste de variables se révèle encore judicieuse pour estimer "H₈₀" à l'échelle d'un massif forestier comme à l'échelle d'une région climato-géologique, telle que la fosse Vocontienne. Suivant une direction nord-sud ou ouest-est, ces variables demeurent optimales pour définir "H₈₀".

Un test de Fisher sur les sommes des carrés des écarts effectué entre ces deux modèles emboîtés permet de vérifier que l'expression à onze variables est la plus pertinente à cette échelle de la région climato-géologique, quelque soit le pourcentage du risque retenu.

$F_{\text{calculé}} = 6,63 > F(3,64) = 2,76 \text{ au risque } 5 \%$ $F_{\text{calculé}} = 6,63 > F(3,64) = 4,13 \text{ au risque } 1 \%$
--

Le test "F" est significatif, le pourcentage de variabilité expliquée par le milieu passe de 73 % dans le massif du Diois à 80,4 % dans la fosse Vocontienne, et enfin l'erreur standard est améliorée : 2,02 m dans le Diois à 1,68 m dans la fosse Vocontienne.

A l'échelle intermédiaire

Ces résultats prouvent une grande similitude à l'intérieur de la fosse Vocontienne entre les différents massifs forestiers, puisque l'augmentation de l'effectif entraîne une amélioration et non une diminution de l'information que peut fournir le milieu sur la fertilité. De plus, le pourcentage de variabilité expliquée étant encore plus élevé, on peut penser que ce pourcentage correspond au maximum d'information qu'offre le milieu pour déterminer l'indice de fertilité ; le milieu explique donc 80 % de l'indice de fertilité dans la fosse Vocontienne.

Ce résultat très élevé pourrait certainement être modifié à la baisse, si l'échantillon était encore renforcé en sélectionnant de nouveaux massifs forestiers satellites, porteurs de nouvelles unités géo-pédologiques non inventoriées. Il n'en demeure pas moins, qu'ayant sillonné la majorité des espaces de la fosse Vocontienne, peuplés en *Pin noir* d'Autriche, nous avons noté une grande homogénéité de paysages, adoptant un agencement stratigraphique identique dans chaque massif forestier, et donc que ces conclusions ont un sens.

EN CONCLUSION

	Variables	F-ratio	R2	R2adj	SE
Chaînon Ventoux-Lure (60)	RUP, pent, caiBC P<A, epail eboulis, calmar, caldur	33,15	0,839	0,813	1,57
fosse Vocontienne (76)	RUP, alti S, Vconc, Vconv pie1, pie23, caldur	24,50	0,745	0,715	1,88

Pour les deux régions climato-géologiques étudiées, il faut conclure à une grande homogénéité, puisque la liste des variables efficaces pour décrire H_{80} est la même à l'échelle du massif forestier qu'à celle de la région climato-géologique. De plus à cette homogénéité s'ajoute une forte stabilité, car les expressions, modélisant l'indice de fertilité, voient leurs coefficients à peine modifiés par un changement d'échelle, et leurs paramètres ("F", "R²" et "SE") restent quasiment constants.

En observant le tableau ci-dessus, on peut constater tout de même une meilleure adéquation dans le cas de l'axe "Ventoux-Lure" que dans le cas de la fosse Vocontienne, entre l'essence et le milieu ; ainsi, la fertilité y est un peu mieux appréhendée par les descripteurs simples du milieu, qui ont été sélectionnés et la précision sur l'estimation de H_{80} y est plus grande.

Dans le cas de la fosse Vocontienne, le milieu rend moins bien compte de l'indice de fertilité que dans l'axe Ventoux-Lure. On peut émettre les hypothèses suivantes :

- * Certaines variables écologiques plus pointues et sous-jacentes ont été négligées et leur absence entraîne une perte d'information sur l'indice de fertilité, d'où une diminution de la part expliquée par le milieu. Par exemple, le calcaire actif n'a pas été estimé sur les massifs forestiers satellites et il fait défaut dans cette démarche.
- * Dans la mesure où la liste des variables écologiques relevées est identique dans la fosse Vocontienne et dans l'axe Ventoux-Lure, l'écart enregistré entre les deux situations montre que l'indice de fertilité s'explique pour près de 25 % par des descripteurs non écologiques ; dans ce cas, il faut considérer que la sylviculture a été plus diversifiée dans la fosse Vocontienne, dans la mesure où elle a été inexistante jusqu'à présent dans le Ventoux.

4) CONCLUSION

La phase d'extrapolation, qui vient d'être exposée, nous permet d'affirmer un certain nombre de résultats :

- * Les modèles développés dans un massif forestier test, soit à grande échelle, permettent de **prédire** l'indice de fertilité dans des massifs forestiers satellites, se situant soit plus au sud, soit plus à l'est. Malgré cette translation géographique, nous n'avons pas pu noter une variation de la production, imputable à des influences climatiques.
- * L'explication de la fertilité par le milieu demeure stable lorsque l'on passe d'une grande échelle à l'échelle intermédiaire, des régions climato-géologiques. **80 % de la variabilité sur H_{80} est expliquée par le milieu.**
- * Les deux approches soit **synthétique**, soit **analytique** sont toutes aussi pertinentes pour définir ces relations entre le milieu et la production.

Après avoir exprimé la production du *Pin noir* d'Autriche à grande échelle et à échelle intermédiaire, notre exposé s'oriente à présent vers l'échelle la plus petite de cette étude : les **Alpes externes méridionales**. Le chapitre suivant (PARTIE V) va essayer d'exprimer les relations entre le milieu et la production pour l'échelle la plus petite.

PARTIE V

**RELATIONS MILIEU-PRODUCTION
A L'ECHELLE DES ALPES EXTERNES MERIDIONALES**

A petite échelle, soit à l'échelle des Alpes externes méridionales, nous avons sélectionné les cinq départements (Alpes des Haute-Provence, Hautes-Alpes, Alpes maritimes, Drôme, Vaucluse) concernés par les reboisements en *Pin noir* d'Autriche, au siècle dernier. Ces différents départements sont stratifiés en "régions forestières" par le service de l'Inventaire Forestier National ; seules ont été retenues les régions forestières disposant de plus de 1000 hectares en futaie régulière de *Pin noir* d'Autriche. Soit un total de 14 régions forestières I.F.N., dans les Alpes externes méridionales, représentant plus de 44 000 hectares de futaie régulière de *Pin noir* d'Autriche, d'après leurs chiffres.

- * Peut-on, à cette échelle, décrire la production du *Pin noir* d'Autriche par des descripteurs écologiques ?
- * Quel est la précision de ces relations entre le milieu et la production ?

A cette échelle, la plus petite de notre étude, nous disposons pour répondre aux questions précédentes de trois jeux de données. Ces trois jeux de données se décomposent en :

- * données préexistantes :
 - ◆ données de l'I.F.N. : 548 relevés,
 - ◆ données de l'I.N.R.A. : 90 relevés,
- * données récoltées durant le thèse : 136 relevés.

Ces données ont été décrites dans la partie II, concernant les "DONNEES ET METHODES". Les résultats des traitements, qui leurs ont été appliqués, vont être exposés ci-dessous.

I) RELATIONS MILIEU-PRODUCTION : UTILISATION DE DONNEES PREEXISTANTES

Essai d'expression de la fertilité grâce aux variables du milieu récoltées sur les placettes I.F.N. et I.N.R.A.

1) ECHANTILLON PROPOSE PAR L'I.F.N.

1.1) Résultats de l'I.F.N.

Dans le chapitre "DONNEES ET METHODES", nous avons signalé que ce service du Ministère de l'Agriculture réalise un découpage naturel de l'espace suivant des **régions forestières**. Cette stratification en régions forestières s'appuie sur une documentation préexistante de photos aériennes, de cartes topographiques ou thématiques (géologie, climatologie, végétation, pédologie, etc.). Ces entités servent à l'I.F.N. lors de la présentation des résultats, afin d'exposer des divisions homogènes d'un point de vue écologique, ce qui est plus satisfaisant qu'un découpage administratif, lorsque l'on parle de peuplements forestiers.

Dans cette approche à l'échelle des Alpes externes méridionales, il nous a paru intéressant d'observer ces régions forestières I.F.N. par rapport au peuplement de *Pin noir* d'Autriche. En ce sens, on peut considérer cette nouvelle *variable synthétique* du milieu : la région forestière I.F.N., comme équivalente aux unités géo-pédologiques, à l'échelle du massif forestier.

Il faut signaler qu'un tel découpage est pratiqué par département avant d'amorcer un passage de l'Inventaire. Par suite deux départements contigus, ce qui est notre cas, peuvent disposer de deux régions forestières I.F.N. semblables d'un point de vue milieu. A titre

A l'échelle des Alpes externes méridionales

d'exemple, on peut citer le "Gapençais" (dept. 04) et le "Gapençais-Laragnais" (dept. 05). La définition I.F.N. pour ces deux régions forestières nationales est la suivante :

Gapençais (04) : (Prolongement d'une région forestière des Hautes-Alpes)

- * basse et moyenne montagne (500 à 2500 m),
- * sols de calcaires et de marnes (Terres Noires), avec des terrains glaciaires,
- * climat à caractère montagnard, assez humide ; pluviométrie de 800 à 1000 mm,
- * végétation forestière Pin sylvestre, hêtre, chêne pubescent, mélèze et séries R.T.M. Pin noir.

Gapençais-Laragnais (05) :

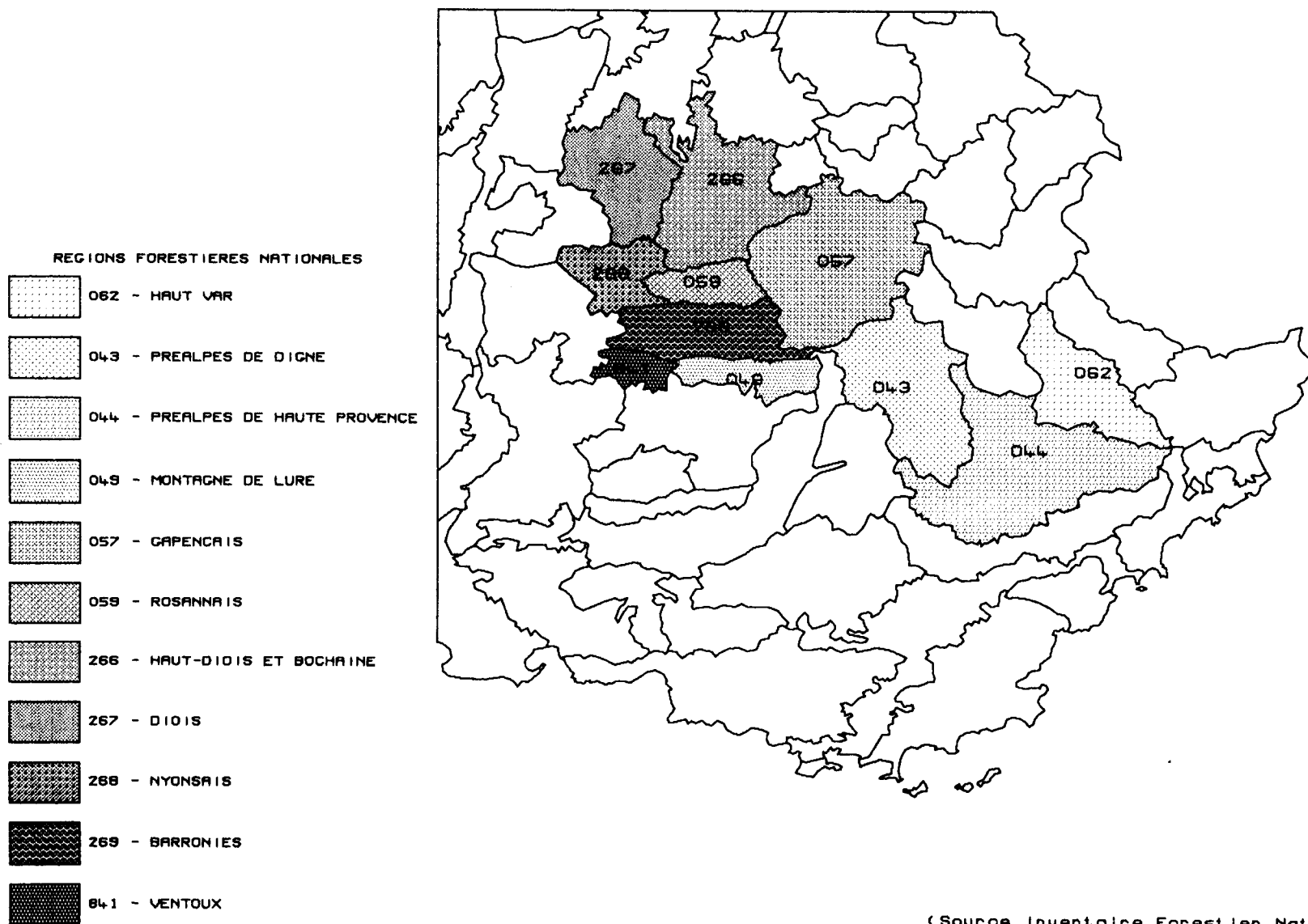
- * basse et moyenne montagne,
- * géologie variée : calcaires, marnes (Terres Noires) et dépôts glaciaires,
- * climat basse montagne, assez humide ; pluviométrie de 800 à 1000 mm,
- * végétation forestière Pin sylvestre, hêtre, chêne pubescent, un peu de sapin, mélèze et séries R.T.M. Pin noir. taux de boisement 31 %.

Ces deux régions totalement assimilables en ce qui concerne le milieu, disposent d'un indice de fertilité "H₈₀" similaire, comme le montre le tableau suivant. Pour chaque région forestière I.F.N., on peut y lire la valeur moyenne H₈₀ (m), ainsi que l'écart-type sur la moyenne des "H₈₀", l'écart-type sur la population (racine carrée du rapport de la variance intra-groupes sur l'effectif de la région forestière I.F.N. considérée) et l'intervalle de confiance sur la moyenne à 95 % :

régions forestières I.F.N.	effectif	moyenne H80 (m)	écart type (m)	écart popul. (m)	intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %	
Montagne de Lure (04)	19	18,97	1,03	0,89	17,22	20,72
Haut-Var et Var moyen (06)	10	18,72	1,33	1,23	16,31	21,12
Plateaux et Monts du Vaucluse (04)	12	18,46	1,35	1,12	16,26	20,65
Préalpes de Digne (04)	77	17,93	0,51	0,44	17,06	18,79
Baronnies (26)	18	17,86	1,00	0,91	16,07	19,66
Préalpes de Castellane (04)	36	17,80	0,56	0,65	16,53	19,07
Nyonsais (26)	21	17,71	1,03	0,85	16,05	19,37
Ventoux (84)	139	17,64	0,30	0,33	17,00	18,29
Rosannais (05)	21	17,33	0,87	0,85	15,67	19,00
Gapençais-Laragnais (05)	22	17,31	0,58	0,83	15,69	18,93
Gapençais (04)	24	16,80	0,82	0,79	15,24	18,35
Bochaine (05)	14	16,22	1,15	1,04	14,18	18,25
Diois (26)	77	15,58	0,44	0,44	14,71	16,45
Haut-Diois (26)	58	14,79	0,45	0,51	13,79	15,79
Total	548	17,10	0,17	0,17	16,77	17,42

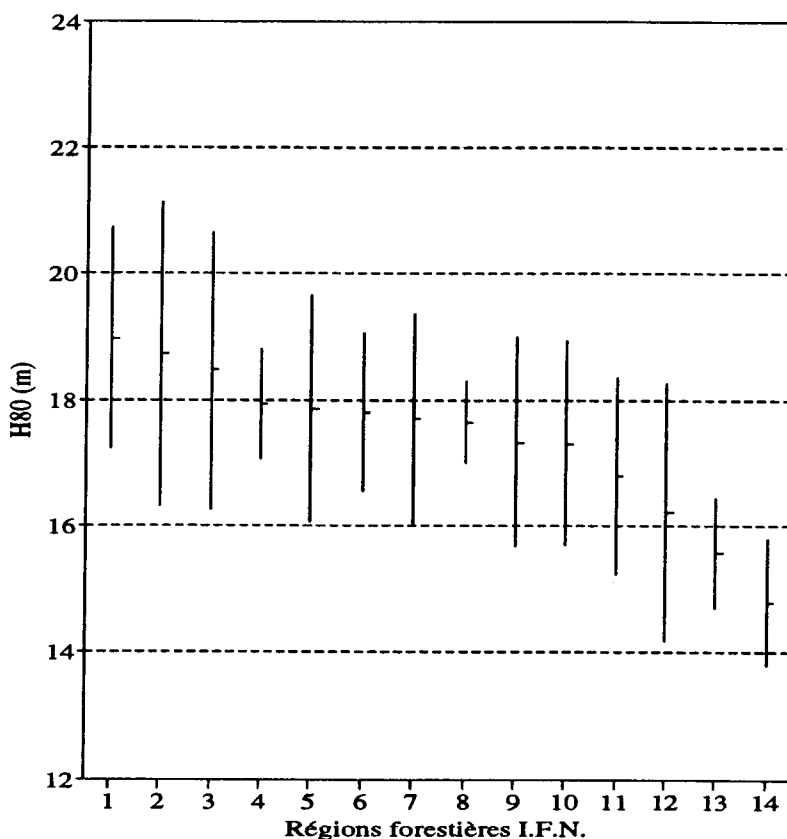
Ce tableau donne lieu à la représentation graphique suivante :

CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE



(Source Inventaire Forestier National)

Représentation de la moyenne de l'indice de fertilité H_{80}
et de son écart-type pour
les 14 régions forestières I.F.N.



- | | |
|---|---|
| * 1 : Ventoux (84) 139 rel. | * 8 : Nyonsais (26) 21 rel. |
| * 2 : Haut-Var et Var moyen (06) 10 rel. | * 9 : Baronnies (26) 18 rel. |
| * 3 : Préalpes de Digne (04) 77 rel. | * 10 : Plateaux et Monts du Vaucluse (04) 12 rel. |
| * 4 : Préalpes de Castellane (04) 36 rel. | * 11 : Montagne de Lure (04) 19 rel. |
| * 5 : Gapençais (04) 24 rel. | * 12 : Gapençais/Laragnais (05) 22 rel. |
| * 6 : Haut-Diois (26) 58 rel. | * 13 : Bochaine (05) 14 rel. |
| * 7 : Diois (26) 77 rel. | * 14 : Rosannais (05) 21 rel. |

Ces résultats, tirés du tableau et illustrés par le graphique précédent, montrent que pour chaque région forestière, les intervalles de confiance sur la moyenne sont assez larges, malgré des effectifs importants en général ; de plus, la répartition des données elles-mêmes est encore plus étalée, on peut en conclure immédiatement que les régions forestières I.F.N. constituent un premier découpage du milieu grâce à des macro-descripteurs, mais qu'elles suscitent une nouvelle stratification plus fine, afin d'aborder une échelle plus grande. Il faut rappeler que ce découpage de l'I.F.N. a servi de base à l'élaboration de catalogues des stations, c'est-à-dire à l'inventaire des stations homogènes d'un point de vue milieu (à une région forestière I.F.N. correspond un catalogue des stations).

Cependant, quelques remarques concernant la répartition du *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales peuvent être formulées.

En considérant les différents départements, on peut noter que les Alpes de Haute-Provence disposent certainement de milieux pas trop défavorables, permettant aux peuplements de *Pin noir* de prospérer correctement ; mis à part, la région "Gapençais"

assimilable au "Gapençais-Laragnais" des Hautes-Alpes, qui présente des séries R.T.M. de *Pin noir* d'Autriche. A l'opposé, le centre-est de la Drôme ("Diois" et "Haut-Diois") correspond aux productions les plus faibles pour cette essence, le milieu étant marqué par la sécheresse et de nombreuses étendues de "marnes".

Concernant les Hautes-Alpes, l'effectif réduit montre que la majorité des peuplements de *Pin noir* sont exploités et qu'à ce jour les peuplements restants atteignent une production moyenne. Pour le Vaucluse, le *Pin noir* d'Autriche est localisé presque uniquement sur le versant nord du Ventoux et il présente une production moyenne à bonne. Ces peuplements, qui n'ont subi aucune sylviculture, sont âgés aujourd'hui (autour de 90 ans) et posent de nombreux problèmes aux aménagistes en vue de leur exploitation. Enfin, dans les Alpes-maritimes, le *Pin noir* a été introduit anecdotiquement, mais il atteint une hauteur correcte.

1.2) Résultats de nos traitements

En préambule, quelques remarques s'imposent à titre de rappel puisqu'elles ont déjà été signalées dans la partie II :

- * la fiche de relevés écologiques de l'I.F.N. est nettement plus importante que la simple liste de variables du milieu que nous citons plus loin. Or, entre les départements, durant le second cycle d'inventaire, cette fiche a évolué ; cela nous a donc imposé de ne retenir que les variables écologiques disponibles sur les 548 placettes initiales des Alpes externes méridionales ;
- * cette liste de 9 variables "milieu" relevées sur les 548 placettes I.F.N., est la suivante :
 - ◆ Altitude, "alti" (6 cl.)
 - ◆ Topographie, "topo" (10 cl.)
 - ◆ Exposition, "expo" (10 cl.)
 - ◆ Pente, "pent" (8 cl.)
 - ◆ Affleurement rocheux, "affl" (10 cl.)
 - ◆ pH, "pH" (7 cl.)
 - ◆ Géologie, "geol" (12 cl.)
 - ◆ Epaisseur des horizons A (A1, A3), "A" (9 cl.)
 - ◆ Epaisseur du profil pédologique, "P" (5 cl.)
- * les variables écologiques ont été mesurées sur le terrain de façon qualitative. Cependant, "l'altitude" correspond quasiment à une variable continue dans la mesure où pour l'altitude les intervalles varient de 50 en 50 m. L'utilisation des 27 catégories d'altitude ne s'étant pas avéré pertinente (catégorie à faible effectif), nous avons réduit à six le nombre des classes altitudinales et c'est ce découpage qui a servi à l'expression de H_{80} ;
- * à ces variables écologiques viennent s'ajouter les précipitations moyennes mensuelles fournies par la Météorologie Nationale, ainsi que le régime de ces précipitations, les précipitations moyennes, ou encore le cumul de certains mois de précipitation. Ces variables par contre sont toutes continues.

Après avoir sélectionné grâce à une analyse des correspondances sur la table de contingence [six classes de fertilité / 77 modalités des variables du milieu] les modalités les plus significatives pour décrire H_{80} , elles ont été ajoutées aux variables des précipitations en vue d'exprimer l'indice de fertilité. Les deux expressions ci-après correspondent à :

- * une expression de la fertilité construite à partir des seules variables écologiques,

A l'échelle des Alpes externes méridionales

- * une expression de la fertilité construite à partir des variables écologiques et des variables pluviométriques.

Dans les deux cas, l'expression obtenue est identique par régression linéaire multiple ascendante ou descendante.

Effectif	8 variables "milieu"		9 variables "milieu"+précipitations	
		signe		signe
Variables	Nord alti 300 à 600 m alti 1000 à 1200 m pente < 3 % cal. durs horizon "A" nul profil 20 à 40 cm profil 40 à 60 cm	+ - + + + - - -	Nord alti 1000 à 1200 m pente < 3 % cal.durs horizon "A" nul profil 20 à 40 cm précipitation : avril précipitation : mai précipi. : octobre	+ + + + - - + - +
F	12,83		14,37	
R ²	0,161		0,195	
R ² adj	0,148		0,181	
SE	3,70		3,63	

**Expressions de la fertilité
suivant le jeu de données
de l'I.F.N.**

Les objectifs premiers de l'Inventaire Forestier National, n'étant pas l'approche du milieu et plus précisément des relations entre le milieu et la production, il est logique que les résultats proposés ci-dessus ne soient pas totalement satisfaisants. Il faut noter cependant que pour une liste très réduite de variables "simples" du milieu de forme qualitative, à laquelle s'ajoute quelques variables pluviométriques, le pourcentage de variabilité expliqué sur H_{80} est de 20 %, ce qui n'est pas négligeable.

Les descripteurs retenus pour expliquer l'indice de fertilité sont en premier lieu des **variables stationnelles**. L'expression à 8 variables de type stationnel offre seulement 16 % de variabilité expliquée, ce chiffre pourrait être amélioré si l'altitude, la pente, l'épaisseur des horizons "A" et l'épaisseur du profil pédologique se présentaient sous une forme continue. Sur ces huit variables "milieu", il en est qui expriment le **climat local** (altitude, pente, exposition) et d'autres qui représentent des **variables géo-pédologiques** (épaisseur des horizons "A", épaisseur du profil pédologique, calcaires durs).

L'apport de la pluviométrie sous la forme de trois mois "avril", "mai", "octobre" fait passer le pourcentage de variabilité expliquée à 19,5 % ; soit 3 % d'information supplémentaire sur H_{80} en conservant les variables "milieu" décrites plus haut, complétées par des **grandeurs macro-climatiques**. L'expression obtenue à 9 variables se compose de descripteurs stationnels et de macro-descripteurs climatiques.

Cet échantillon de l'I.F.N. situé à l'échelle des Alpes externes méridionales indique que deux types de variables sont nécessaires pour expliquer l'indice de fertilité : les **variables stationnelles** (variables géo-pédologiques et variables exprimant le climat local) et les **variables macro-climatiques**. Ce résultat, correspondant à un faible pourcentage de variabilité expliquée, est peut-être simplement un artefact lié au petit nombre de variables explicatives de la fertilité. En effet, nous verrons plus loin sur l'échantillon I.N.R.A. que les macro-descripteurs ne participent pas à l'explication de la productivité du *Pin noir* d'Autriche. Cette remarque est valable dans la mesure où nous avons admis que les échantillons I.F.N. et I.N.R.A. couvrent une même aire de répartition. Le paragraphe suivant est consacré aux résultats obtenus sur l'échantillon de I.N.R.A..

2) ECHANTILLON PROPOSE PAR L'I.N.R.A.

Disposant d'un échantillon initial constitué de 111 placettes de production semi-permanentes, situées dans le sud de la France ; cet échantillon a été réduit de 8 placettes situées en Lozère, 1 située dans le Gard, et 12 placettes trop jeunes (< 40 ans), modélisables avec une trop grande incertitude. Les résultats suivants prennent effet, sur 90 placettes de relevés.

2.1) Résultats de nos traitements

Sur cet échantillon pour chaque placette de relevé, nous disposons d'un indice de fertilité "H₈₀" (continu), complété par six variables caractéristiques du peuplement (qualitatives), qui constituent l'ensemble des renseignements dendrométriques. A ces aspects dendrométriques sont associés 15 descripteurs du milieu de forme qualitative, auxquels viennent s'ajouter les précipitations moyennes mensuelles, des formes cumulées de ces précipitations ("mai-juin-juillet", "juin-juillet-août" et "mai-juin-juillet-août-septembre"), le régime pluviométrique et la moyenne des précipitations mensuelles, qui eux se présentent sous une forme continue. En effet, l'I.N.R.A. nous a proposé un fichier de variables "milieu" disjonctif complet, car les données d'origine, de forme continue et utilisées par TIMBAL J., TURREL M. et DUCREY M., 1985 pour la rédaction de leur article, ne sont plus disponibles.

La liste des six variables caractéristiques du peuplement (annexe n°2) :

- * Densité du peuplement, "denP"
- * Homogénéité du peuplement, "homP"
- * Nombre de tiges / hectares, "tige"
- * Surface terrière / hectares, "terr"
- * Classes de fertilité, "fer"
- * Age, "age"

La liste des variables écologiques retenues est la suivante :

- * Etage de végétation, "etage" (6 cl.)
- * Altitude, "alti" (7 cl.)
- * Topographie, "topo" (7 cl.)
- * Exposition, "expo" (8 cl.)
- * Pente, "pent" (5 cl.)
- * Indice de luminosité (BECKER), "lumi" (6 cl.)
- * Géologie, "geol" (12 cl.)
- * Epaisseur de la litière, "liti" (4 cl.)
- * Epaisseur de l'horizon A0, "A0" (4 cl.)
- * Epaisseur de l'horizon A1, "A1" (4 cl.)
- * Epaisseur de l'horizon C, "C" (6 cl.)
- * Abondance de la végétation herbacée, "herb" (4 cl.)
- * Abondance de la végétation arbustive, "arbu" (4 cl.)
- * Abondance des graminées, "gram" (5 cl.)
- * Profondeur des racines, "raci" (6 cl.)

Les variables dendrométriques citées précédemment n'ont pas été retenues dans nos traitements, à cause de la "première loi de EICHHORN", qui prévoit que "dans une région climatiquement homogène, pour une essence donnée et pour une large gamme de sylviculture, 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"; la production en volume traduite par l'indice de fertilité est donc indépendante de la sylviculture, exprimée par les six variables précédemment citées. Ce fichier I.N.R.A. a donc été réduit aux quinze variables "milieu", éclatées en modalités.

Une analyse des correspondances sur la table de contingence [six classes de fertilité / 82 modalités des variables du milieu], nous a permis de sélectionner les modalités les plus pertinentes pour décrire H_{80} . Cette liste vient alors s'ajouter aux variables caractéristiques des précipitations (de forme quantitative), afin de construire par régression linéaire multiple pas à pas, une expression de l'indice de fertilité en tant que fonction d'éléments simples du milieu.

Les deux expressions retenues sont rassemblées dans le tableau ci-dessous. L'expression à six variables est supposée "optimale", car elle reste inchangée par régression ascendante ou descendante. L'expression à sept variables est constituée à partir de la précédente en introduisant simplement la variable "juin", car le test "F" prend une valeur de 3,25, ce qui n'est pas trop éloigné du seuil que nous avons fixé à 4 :

Effectif	6 var.	signe	7 var.	signe
Variables	E	-	E	-
	SW	-	SW	-
	lit1	-	lit1	-
	rac2	-	rac2	-
	A01	-	A01	-
	calf	-	calf	-
			juin	+
F	8,69		8,12	
R ²	0,39		0,41	
R ² adj	0,34		0,36	
SE	3,29		3,25	

Expressions de la fertilité suivant le jeu de données de l'I.N.R.A.

- * E : exposition Est
- * SW : exposition sud-ouest
- * lit1 : litière peu abondante
- * rac2 : profondeur des racines 21 à 35 cm
- * A01 : horizon A0 absent
- * calf : dalles de calcaire fissuré
- * juin : précipitations de juin

Ce résultat n'est pas très satisfaisant puisqu'il repose sur des modalités de variables et non sur les variables elles-mêmes, sauf en ce qui concerne les précipitations du mois de "juin". On peut noter que les éléments significatifs tirés de l'expression "optimale" sont plutôt de vraies qualitatives, on retrouve l'exposition "E" et "SW", les calcaires fissurés, la litière peu abondante, l'horizon "A0" absent. Il semble donc que les variables initialement continues et certainement significatives pour décrire l'indice de fertilité, ont été éliminées du fait d'un découpage en classes, qui peut être mauvais. En effet, à l'issue de l'analyse des correspondances l'altitude, la pente, l'indice de luminosité, l'épaisseur des horizons "A1" et "C" figuraient parmi les modalités significatives pour décrire certaines classes de fertilité et ne se retrouvent pas dans l'expression finale. Les deux expressions finales proposées, privilégient les **variables stationnelles** au travers du sol ("lit1", "A01", "rac2"), de l'exposition ("E", "SW") et des calcaires durs fissurés mal identifiés en région méditerranéenne. Le mois de "juin" rajouté dans l'expression à sept variables donne peu d'information supplémentaire sur H_{80} ; TIMBAL et *al.* observent comme nous, que l'estimation de la pluviométrie sur ces placettes I.N.R.A. n'apporte rien de plus sur la connaissance de H_{80} .

Par suite, le milieu tel qu'il a été enregistré dans cet échantillon de l'I.N.R.A. n'est pas très convaincant pour décrire l'indice de fertilité. Cependant, 40 % de la variabilité sur H_{80} est expliquée par ces six ou sept descripteurs. Ce chiffre sera comparé à celui que nous obtiendront à partir de notre échantillon (136 rel.), mais dès à présent on peut noter qu'il est bien supérieur à celui issu de l'échantillon I.F.N., bien que ces deux échantillons se situent à une même échelle. Cet écart entre l'échantillon I.F.N. et l'échantillon I.N.R.A. s'explique par la liste des variables écologiques sélectionnées et certainement par une différence de qualité des mesures.

Ces quelques résultats peuvent être directement comparés à ceux rassemblés dans l'article de TIMBAL J., TURREL M. et DUCREY M., 1985 dans la mesure où ils ont observé ce même échantillon de relevés I.N.R.A..

2.2) Comparaison entre nos résultats et ceux issus de l'article de TIMBAL J., TURREL M. et DUCREY M., 1985

Avant de comparer nos résultats à ceux exposés par TIMBAL J. et *al.*, 1985, il faut signaler tout d'abord quelques différences :

- * Cette équipe de l'I.N.R.A. a travaillé sur les 111 placettes de production semi-permanentes, subdivisées en sous-échantillons, alors que nous avons réduit cet échantillon à 90 placettes, pour les raisons énoncées plus haut ;
- * le fichier initial concernant les variables écologiques, qui a été utilisé par TIMBAL J. et *al.*, a disparu depuis, nous avons donc mené notre étude sur le fichier des variables "milieu" recodées ;
- * bien que disposant comme l'équipe de l'I.N.R.A. d'une liste floristique pour chaque placette, nous n'avons pas pris en compte ce renseignement, comme il s'agissait de listes non exhaustives limitées aux espèces ligneuses et aux principales herbacées.

Les résultats rassemblés dans l'article de TIMBAL et *al.* peuvent être exposés en trois points :

- * Il y a une très forte liaison entre les altitudes, les étages et séries de végétation et les groupements végétaux définis sur une base purement floristique, d'une part et entre la productivité du *Pin noir* d'Autriche et les étages et séries de végétation, d'autre part. La productivité du *Pin noir* d'Autriche est sous la dépendance de facteurs bioclimatiques ;
- * pour expliquer la productivité du *Pin noir* :
 - ◆ à basse altitude (< 1000 m), les facteurs stationnels (altitude, pente, exposition, sol) sont prépondérants,
 - ◆ à haute altitude (1000 à 1200 m), les facteurs macro-climatiques deviennent prépondérants ;
- * la régression progressive sur les facteurs écologiques montre que les variables pédologiques (épaisseur de l'horizon A0, profondeur de l'enracinement et la roche mère) interviennent significativement pour exprimer la productivité. Ces descripteurs pédologiques traduisent la profondeur du sol exploitable par les racines et surtout sa capacité de rétention d'eau, essentielle en région méditerranéenne.

Notre étude présentée ci-dessus, s'est bornée pratiquement au troisième point qui vient d'être cité ; il faut noter immédiatement que nos conclusions vont dans le même sens que celles de l'I.N.R.A. : les **variables pédologiques** sont les premiers descripteurs du milieu pour expliquer la productivité du *Pin noir* d'Autriche. Cette influence du sol se compose de nombreux paramètres parmi lesquels on trouve l'épaisseur des horizons pédologiques, la profondeur de sol exploitable par les racines, ce qui traduit une capacité de rétention de l'eau ; et il faut y ajouter la nature de la roche en place. Dans notre étude cette information pédologique est complétée par l'**exposition** seulement, alors que d'après les traitements de l'I.N.R.A., l'**altitude** et la **pente** viennent se greffer aux précédents descripteurs afin d'exprimer H_{80} . Ces deux derniers descripteurs absents dans notre expression, constituent de véritables variables continues et sont certainement mal interprétées lors d'un découpage en classes ; cette explication simple doit être vraie, car l'altitude comme la pente ont été sélectionnées à l'issue de l'analyse des correspondances et sont absentes de l'expression finale.

Par ailleurs, nous avons choisi de traiter la totalité des relevés I.N.R.A. ensemble, afin d'appréhender la fertilité du *Pin noir* d'Autriche à l'échelle des Alpes externes méridionales. Seuls les descripteurs stationnels se sont révélés comme indispensables à l'explication de l'indice de fertilité. Par contre, TIMBAL J. et *al.* ont réalisé des sous-ensembles de relevés (placettes des Alpes de Haute-Provence, placettes de l'étage méditerranéen, placettes de l'étage montagnard) et il est ressorti qu'aux altitudes inférieures à

A l'échelle des Alpes externes méridionales

1000 m les facteurs stationnels sont primordiaux, alors qu'aux altitudes entre 1000 et 1200 m, les facteurs macro-climatiques deviennent primordiaux ; ces facteurs macro-climatiques étant une distance à la Méditerranéenne ou à l'Atlantique, et une distance altitudinale à la crête et non la pluviométrie.

Le tableau ci-après rassemble un des résultats tirés de l'article de TIMBAL J. et *al.*, 1985 et le notre concernant l'échantillon I.N.R.A. ; les chiffres indiqués ont trait à deux sous-ensembles de relevés très proches, à savoir les placettes I.N.R.A. du sud-est de la France, c'est-à-dire les Alpes externes méridionales. Dans notre chaîne de traitements ces 102 placettes ont été réduites de 12 relevés trop jeunes :

Données	102 placettes des Alpes du Sud-Est TIMBAL J. et <i>al.</i>	90 placettes des Alpes du Sud-Est
Eléments du Milieu	<ul style="list-style-type: none"> * épaisseur de A0 * profondeur de la roche mère * âge * indice de rayonnement * profondeur des racines 	<ul style="list-style-type: none"> * exposition : E * exposition : SW * litière peu abondante * profondeur des racines 21 à 35 cm * horizon A0 absent * calcaire fissuré * précipitations de juin
R ²	0,588	0,41

Expressions de la fertilité sur le jeu de données de l'I.N.R.A.

* TIMBAL J. et *al.*, 1985 : 102 placettes du Sud-Est (sans les 8 de Lozère et celle du Gard),
* nos résultats : 90 placettes du Sud-Est (102 moins les placettes trop jeunes).

Il est intéressant d'observer que les éléments sélectionnés par l'I.N.R.A. permettent d'expliquer 58,8 % de la variabilité sur H_{80} , alors que notre échantillon I.N.R.A. n'offre que 41 %, soit 18 % d'écart entre ces deux types de traitements. Cet écart s'explique, tout au moins en partie, par l'utilisation que nous avons faite de variables uniquement qualitatives. Ainsi, "la profondeur des racines" indispensable d'après l'article de l'I.N.R.A., variant de moins de 20 cm à plus de 80 cm, s'est réduite dans notre étude à la classe : "profondeur des racines entre 21 à 35 cm" ; cette classe correspond certainement à un pic dans l'explication de H_{80} , mais ne peut remplacer à elle seule la variable continue, qui contient la totalité de l'information sur la profondeur des racines. Il en est de même pour "l'épaisseur de l'horizon A0", pour lequel nous avons considéré simplement "horizon A0 absent".

Par ailleurs, "l'indice de rayonnement" en un lieu donné, indice combinant pente et exposition, BECKER M., 1979, a été défini ultérieurement sur la base des données initiales. La pente et l'exposition étant de forme disjonctive complète dans le fichier fourni, il nous a été impossible de recalculer cet "indice de rayonnement". Ce descripteur, qui intervient pour exprimer H_{80} dans l'étude I.N.R.A., fait défaut dans nos données écologiques, d'où un certain pourcentage non expliqué sur la variabilité de H_{80} .

Concernant "l'âge" nous avons préféré l'écarter des traitements, car il nous a semblé abusif de prendre en considération un critère descriptif du peuplement de *Pin noir* d'Autriche pour évaluer l'indice de fertilité de ce même peuplement, dans la mesure où le calcul de l'indice de fertilité doit éliminer l'effet "âge". Les résultats de l'I.N.R.A. montrent que cette variable participe à l'estimation H_{80} et apporte un certain pourcentage d'explication sur la variabilité de H_{80} ; à cela deux explications sont possibles :

- * soit le modèle I.N.R.A. estimant H_{80} est imparfait dans le cas de placettes éloignées de l'âge de référence ; il faut donc introduire une correction grâce à l'âge sur les placettes les plus jeunes ou plus âgées ;

- * soit on peut imaginer un effet génération, c'est-à-dire un matériel génétique différent entre deux générations de plantations, d'où une influence de l'âge. Mais ce n'est pas le cas pour le *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales.

Les variables "indice de rayonnement" et "âge" absentes de notre expression de la fertilité, l'utilisation dans notre cas de variables uniquement qualitatives, et la différence d'effectif entre ces deux échantillons expliquent aisément l'écart entre le pourcentage de variabilité expliquée sur H_{80} par l'I.N.R.A. et par nous-mêmes.

3) CONCLUSION

Les deux échantillons de données préexistantes qui viennent d'être étudiés recouvrent un même domaine géographique : les Alpes externes méridionales et offrent un certain nombre de similitudes. Les résultats précédents proposent deux types de variables écologiques pour aborder la fertilité du *Pin noir* d'Autriche à petite échelle ; il s'agit de **variables stationnelles** ou de **variables macro-climatiques**.

Parmi les variables stationnelles, on peut distinguer celles qui traduisent le **climat local** (exposition, altitude, pente, etc.), de celles qui représentent la **géo-pédologie**. Ces variables expliquant la fertilité au niveau de la station et du versant, ne suffisent pas à eux seuls pour exprimer totalement l'indice de fertilité. Dans nos traitements, nous avons intégré des variables "précipitations" fournies par la Météorologie Nationale, soit une expression du **climat régional**. Ces variables peuvent certainement être critiquées quant à leur estimation par le programme "AURELHY", mais il n'en demeure pas moins que certains mois, différents pour l'échantillon I.F.N. et I.N.R.A., se sont révélés significatifs pour décrire H_{80} . Cette remarque concernant le climat local et le climat régional va dans le sens des observations d'AUSSENAC G., 1973, qui estime que "les relations entre le climat, le micro-climat et la production ligneuse sont à la base du développement et de la croissance des peuplements forestiers".

Le tableau ci-après tente de résumer les conclusions qui viennent d'être énoncées :

Echantillon	Variables stationnelles		Variables macro-climatiques précipitations
	climat local	géo-pédologie	
I.F.N.	exposition altitude pente	cal. dur épaisseur de "A" épaisseur du profil pédo.	avril mai octobre
I.N.R.A. article	indice de rayonnement	épaisseur de "A0" profondeur de la roche profondeur des racines	
I.N.R.A.	exposition	cal. dur épaisseur de "A0" épaisseur de la litière profondeur des racines	juin

Mais pour aller plus loin dans les comparaisons et les conclusions à cette échelle des Alpes externes méridionales, nous allons à présent exposer nos résultats, provenant du regroupement de la totalité de nos 136 relevés, effectués durant l'été 1990 et l'été 1991. Après avoir défini les relations entre le milieu et la production à grande échelle, celle du massif forestier, puis à l'échelle intermédiaire des régions climato-géologiques, nous voulons

maintenant exprimer l'indice de fertilité en fonction du milieu et apprécier la précision de ce résultat pour les Alpes externes méridionales, soit la plus petite échelle de notre étude.

II) RELATIONS MILIEU-PRODUCTION : UTILISATION DE NOS DONNEES

Cette nouvelle étape consiste à aborder l'identification de H_{80} à une échelle grossière, c'est-à-dire encore plus petite. Notre sujet, concernant les liaisons entre le milieu et la production, s'est donné notamment pour objectif d'appréhender ces différents niveaux de perception emboîtés, malgré un nombre réduit de relevés effectués.

Par analyse des données, comme à l'échelle du massif forestier, nous avons sélectionné une liste optimale d'éléments simples du milieu pour décrire H_{80} . L'expression ascendante que l'on tire de cet échantillon de 136 relevés des Alpes externes méridionales est la suivante :

$$H_{80} = 13,750 + 0,083 \text{ RUP} + 2,035 \text{ P<A} - 1,930 \text{ epail} - 2,633 \text{ marnes} + 3,352 \text{ caldur} \\ (\text{en mètres})$$

$$F = 41,135$$

$$R^2 = 0,613$$

$$R^2_{\text{adj}} = 0,598$$

$$SE = 2,27 \text{ m, soit } 2,27/H_{80\text{moyen}} = 2,27/17,50 = 12,97 \%$$

Cette expression simple amène un certain nombre de remarques. Tout d'abord, il faut constater qu'à l'échelle des Alpes externes méridionales, vouloir exprimer l'indice de fertilité par des variables du milieu a un sens : **60 % de la variabilité de H_{80} est traduite par quelques variables du milieu.**

L'équation proposée évolue à partir d'une valeur constante (13,75 m), qui est modifiée par cinq variables du milieu (1 variable quantitative : "RUP" et 4 variables qualitatives : "P<A", "epail", "marnes" et "caldur"). Les Alpes externes méridionales sont soumises à un climat de type méditerranéen, où l'eau présente un rôle primordial. Toutes ces variables directement ou non expriment la **teneur en eau** ; il en est deux, qui qualifient de plus deux roches sous-jacentes extrêmes, les "marnes" trop filtrantes et sèches et les calcaires durs fissurés "caldur", pour qui la réserve utile est mal définie. Cette liste de variables présente avant tout une valeur indicative sur les descripteurs écologiques indispensables pour la croissance du *Pin noir* d'Autriche, dans les Alpes externes méridionales ; il s'agit de **descripteurs stables**. On peut retenir :

- * la réserve utile du profil pédologique ;
- * l'épaisseur du profil pédologique, et plus particulièrement le facteur limitant en région méditerranéenne dû à une épaisseur insuffisante, ("epail" : < 50 cm) ;
- * la topographie stationnelle, lorsque les pertes en eau sont inférieures aux apports ; topographie favorable, l'eau est conservée par la station ;
- * la roche en place :
 - ◆ marnes : milieu difficile à système "matériau-sol" réduit, fréquent dans la fosse Vocontienne ;
 - ◆ calcaires durs : milieu sous-estimé dans les relevés ; la fissure, favorable aux racines n'a pas été prise en compte.

Par ailleurs, afin d'améliorer encore ce pourcentage de variabilité expliquée par le milieu sur H_{80} et au vu des résultats obtenus dans le cas des échantillons I.F.N. et I.N.R.A., à propos des descripteurs macro-climatiques (type "précipitations"), nous avons essayé une démarche similaire dans le cas de notre échantillon.

A l'échelle des Alpes externes méridionales

En conséquence, ne disposant pas de l'information "précipitations" sur notre fichier de données, nous avons tenté de traduire la variable macro-climatique par une **variable géographique** ; deux essais, indépendants l'un de l'autre, ont été effectués :

- * variable géographique = région climato-géologique (2 modalités),
- * variable géographique = massif forestier (5 modalités).

Cette démarche n'a pas abouti par régression linéaire multiple pas à pas ; dans la mesure où en associant les variables écologiques aux variables géographiques, nous avons obtenu la même équation que celle proposée précédemment, sans la variable géographique. Il semble donc que la "**position géographique**" n'ait pas d'effet sur l'indice de fertilité ; toutefois on ne peut pas conclure sur l'action des descripteurs macro-climatiques, étant donné que nous ne disposons pas du renseignement pluviométrique.

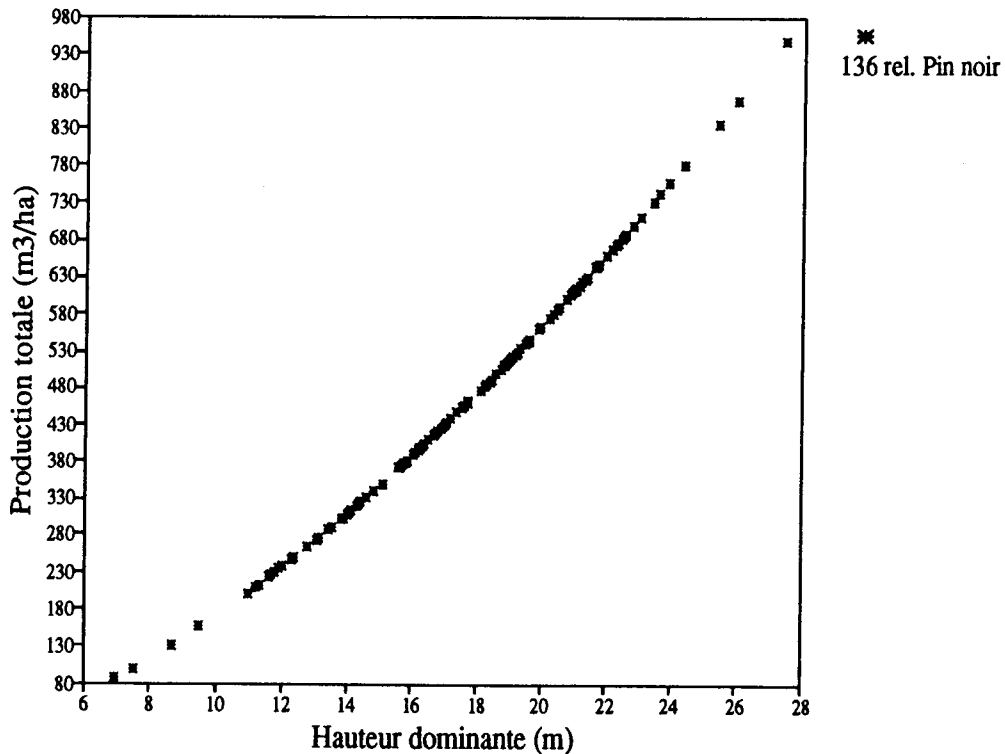
Enfin pour notre échantillon de 136 relevés de *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales, nous présentons ci-dessous la représentation graphique de la liaison entre la hauteur dominante mesurée dans chaque relevé et la production totale calculée grâce à l'équation suivante :

$$PTV = b_0 (H_0 - 1,30)^{b_1}$$

- * $b_0 = 5,93$
- * $b_1 = 1,555$
- * écart type résiduel = 23,88 m³/ha
- * **PTV** : Production totale en volume (m³/ha)
- * **H₀** : hauteur dominante (m)

(ajustement proposé par DREYFUS Ph., 1992 suivant les valeurs des tables de production VANNIERE B., 1984)

Expression de la Production totale en fonction de la hauteur dominante



Les trois échantillons précédemment étudiés proposent trois résultats, que nous allons commenter au cours du paragraphe suivant.

III) COMPARAISON ENTRE LES TROIS ECHANTILLONS DISPONIBLES (I.F.N., I.N.R.A. ET NOTRE ETUDE)

Il s'agit au vu des résultats obtenus pour chaque échantillon, de conclure sur l'apport de ces trois sources de données afin de répondre correctement au sujet : "relations entre le milieu et la production", à petite échelle. Mais dès à présent certaines remarques s'imposent :

L'I.F.N. s'est fixé comme objectif de servir une politique forestière conçue dans le cadre de l'aménagement de l'espace rural et donc de situer les formations boisées, d'en fournir les données globales relatives aux superficies, aux volumes sur pied, aux accroissements, en vue d'en déterminer le potentiel de production (But et Méthodes de l'Inventaire Forestier National, 1985). Les objectifs de ce service étant forestiers, on imagine aisément que les informations concernant le milieu viennent s'ajouter aux données dendrométriques de façon secondaire. Quelques remarques concernant la fiche de relevés écologiques de l'I.F.N. suivent :

- * La fiche des relevés écologiques a évolué d'un département à l'autre, si bien que sur les 548 relevés disponibles dans cinq départements, nous disposons d'une liste très restreinte de variables du milieu communes aux cinq départements : exposition, altitude, pente, topographie, affleurement rocheux, pH, roche en place, épaisseur des horizons "A" et épaisseur du profil ; à ceux-ci, s'ajoutent les précipitations moyennes mensuelles obtenues grâce à la Météorologie Nationale, ainsi que le régime des précipitations, la moyenne de ces précipitations et quelques valeurs cumulées des précipitations.
- * Toutes ces variables écologiques sont qualitatives ; un découpage en classes même pour des variables naturellement continues, entraîne une perte d'information sur la connaissance du paysage.
- * Les opérateurs, qui réalisent les relevés, sont nombreux par échelon.

L'I.N.R.A pour sa part avait monté cette étude du *Pin noir* d'Autriche en vue de "construire un tarif de cubage et une table de production de cette essence". Les données dendrométriques proprement dites ont effectivement permis :

- * l'établissement d'un tarif de cubage (BOUCHON J., 1974),
- * l'établissement d'une table de production (OTTORINI J.-M. et TOTH J., 1975).

Ultérieurement, les données écologiques, qui offraient une description de chaque placette, ont été traitées en vue d'aborder une étude de liaison entre milieu et production (TIMBAL J., TURREL M., et DUCREY M., 1985). Deux remarques concernant ces données sont à signaler :

- * La sélection de variables milieu proposée est assez restreinte (il manque par exemple une approche plus fine des aspects pédologiques), et très orientée vers le peuplement forestier (densité du peuplement, homogénéité du peuplement, nombre de tige / hectare, surface terrière, ...).
- * Le fichier fourni par l'I.N.R.A. se présente sous une forme disjonctive, c'est-à-dire que l'information disponible n'est que qualitative, le fichier source ayant disparu, d'où une perte de l'information identique au fichier I.F.N..

A l'échelle des Alpes externes méridionales

Par ailleurs à propos de l'échantillonnage, seul les relevés de l'I.F.N. sont tirés au hasard à l'intérieur d'une stratification préalablement établie, reposant sur des descripteurs écologiques assez "grosiers". Cet échantillon de 548 relevés est certainement le seul à offrir un sondage exhaustif des situations existantes dans les Alpes externes méridionales. A l'inverse pour l'échantillon I.N.R.A. les situations écologiques ont été choisies et certaines placettes sont encore suivies 20 plus tard, même si ces placettes se répartissent dans la totalité de l'espace qu'offrent les Alpes externes méridionales. Quant à notre échantillon, vu l'ampleur de la tâche, il repose sur un choix de massif forestier test, dans lequel sont repérées des unités géo-pédologiques et où seront tirées au hasard les placettes de relevés ; ce massif forestier est ensuite extrapolé à des massifs forestiers satellites plus ou moins proches. Dans les deux derniers cas, il est impossible de prétendre que la totalité des situations offertes dans les Alpes externes méridionales ont été inventoriées.

Ces remarques étant faites le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pour ces trois échantillons.

	I.F.N.	I.N.R.A.	Etude
effectif	548	90	136
R ²	0,195	0,409	0,613
SE (m)	3,63	3,25	2,27
Variables	Nord alti 1000 à 1200 m pente < 3 % cal. dur hor. "A" nul profil 20 à 40 cm précipitation : avril précipitation : mai précipi. : octobre	Est Sud-ouest dalles de caldur fiss. litière peu abondante hor. "A0" nul profondeur des racines 21 à 35 cm précipitation : juin	RUP P<A epail marnes caldur

A l'échelle des Alpes externes
méridionales, information sur H₈₀
pour les trois échantillons
sélectionnés

Remarques : 90 relevés I.N.R.A. au lieu de 102, les relevés supprimés sont associés à un peuplement de *Pin noir* d'Autriche trop jeune, autour de 30 ans ; or l'estimation de l'indice de fertilité, grâce au modèle de "Chapman-Richards" mis au point par J.-Ch. HERVÉ, est d'autant plus juste que la placette a un âge proche de 80 ans.

La valeur de ces résultats demeurant aléatoire suivant l'échantillon, il faut tout de même observer une certaine constance. En effet, dans les trois échantillons se retrouve la **roche en place**, au travers de deux extrêmes les "calcaires durs" fissurés, mal échantillonnés dans tous les cas et les "marnes", autre situation extrême caractérisant un milieu très sec, pauvre et asphyxiant. D'autre part, l'**épaisseur du profil pédologique** joue un rôle déterminant, elle se présente sous plusieurs formes : épaisseur des différents horizons, profondeur des racines, épaisseur du profil, mais toujours en tant que facteur limitant de la croissance. Enfin, des variables exprimant l'**eau** plus ou moins directement, soit en tant qu'apports en eau, soit en tant que teneur en eau : altitude, pente, exposition, réserve utile, bilan hydrique. Il est intéressant d'observer que ces trois points indispensables sont toujours représentés dans chaque liste de variables "milieu", avec cependant plus ou moins de précision.

Au vu des résultats, il faut conclure que les relevés I.F.N. ne sont pas adaptés pour entreprendre une étude du milieu et au-delà des liaisons entre milieu et production. La liste des variables du milieu est insuffisante (par exemple les aspects pédologiques sont peu représentés, alors qu'ils sont essentiels pour décrire H₈₀) et les variables retenues sont beaucoup trop imprécises, car qualitatives. Cet échantillon de relevés n'offre que 19,5 % d'information sur l'indice de fertilité, soit la moitié du pourcentage proposé par l'échantillon I.N.R.A. tel que nous l'avons retrouvé. Il faut cependant noter que l'échantillon I.F.N. est le seul à trouver une explication de H₈₀ grâce à des **descripteurs stationnels**, mais aussi grâce à des **descripteurs macro-climatiques** ; ce dernier type de descripteur ressort, soit car les bons descripteurs stationnels sont absents ou mal échantillonnés dans les relevés I.F.N., soit parce

A l'échelle des Alpes externes méridionales

que l'échantillonnage est systématique et très régulier, d'où une information pluviométrique évoluant très régulièrement. De toute façon, un groupe de travail national au sein de l'I.F.N. vient d'être constitué, qui doit revoir la liste des variables écologiques essentielles à collecter dans chaque échelon, et qui doit prévoir les moyens nécessaires afin de parvenir à un résultat permettant d'envisager des études du milieu.

Par contre, l'échantillon de l'I.N.R.A. nous a permis d'extraire grâce à des variables stationnelles du milieu, près de 41 % de la variabilité totale sur l'indice de fertilité. La part laissée aux variables macro-climatiques étant très réduite, voir nulle, puisque la prise en compte du mois de "juin" dans l'expression de la fertilité a été imposée. En effet, en construisant la régression sur les données I.N.R.A., nous avons introduit volontairement la variable "juin", malgré un "F" = 3,25, c'est-à-dire inférieur au seuil de 4, initialement prévu. Concernant les traitements effectués sur les données de l'I.N.R.A., le pourcentage de variabilité expliquée peut atteindre jusqu'à 46 %. Dans tous les cas, ces chiffres sont inférieurs à ceux estimés dans l'article de TIMBAL J., TURREL M., et DUCREY M., 1985, car ils avaient pu travailler sur le fichier origine, donc avec des variables continues. A titre de rappel dans cet article, les 102 placettes I.N.R.A. (sans les placettes de la Lozère (8) et celle du Gard (1)) fournissaient 58,8 % d'information sur la variabilité de la hauteur à 80 ans.

A l'échelle des Alpes externes méridionales, nos objectifs et ceux de l'I.N.R.A. étant les mêmes, on constate que les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur : 58,8 % pour l'I.N.R.A. et 61,3 % pour notre étude. Comme pour le jeu de données I.N.R.A., les variables que nous avons retenues ne sont que stationnelles. Face à ces résultats, on peut espérer avoir atteint le maximum d'information que peut fournir le milieu, sur la connaissance de H_{80} à cette échelle.

Par ailleurs, bien que nous n'ayons pas eu le temps d'échantillonner la région climato-géologique de la nappe de Digne, identifiée dans la "PRESENTATION GENERALE", nos résultats sont aussi significatifs que ceux proposés par l'I.N.R.A., qui a effectué, par contre, des relevés dans cette zone sud-est des Alpes externes méridionales. Il faut peut-être en conclure que cette région autour de Digne est assimilable à la fosse Vocontienne, où l'on retrouve le même support géologique.

Enfin, à cette échelle des Alpes externes méridionales, il a été impossible d'envisager un unique échantillon regroupant ces trois jeux de données, d'origine trop éloignée, la distorsion entre ces études étant bien trop forte pour tenter un quelconque traitement global.

IV) CONCLUSION

En passant à l'échelle la plus petite, la mise en forme d'une expression de la fertilité globale entraîne une perte d'information sur H_{80} de l'ordre de 20 % ; cette diminution du pourcentage de variabilité expliquée semble imputable à la disparition des variables "locales", qui caractérisent chaque région climato-géologique et plus précisément chaque massif forestier test. Cette association de l'axe Ventoux-Lure et de la fosse Vocontienne offre donc près de 60 % d'explication sur H_{80} , grâce à des variables discriminantes caractéristiques des Alpes externes méridionales. De ce regroupement, nous avons déduit une liste de facteurs écologiques indispensables pour décrire la production du *Pin noir*. Cette liste caractérise les contraintes hydriques, élément fort en région méditerranéenne, et elle se compose de :

- * la réserve utile,
- * la topographie stationnelle : "P<A",
- * l'épaisseur du profil < 50 cm,
- * la roche en place : "caldur", "marnes".

A l'échelle des Alpes externes méridionales

Il est intéressant d'observer que TIMBAL J. *et al.*, 1985, on fait le même type d'observation sur l'échantillon I.N.R.A., dans la mesure où ils obtiennent la même précision (58,8 %), en l'absence de variables "locales".

La dernière partie (partie VI), qui va être abordée à présent, vise à apporter des commentaires sur cet enchaînement de trois échelles de perception pour répondre à un même sujet.

PARTIE VI

DISCUSSION : TROIS ECHELLES ET UNE METHODE POUR ABORDER LES RELATIONS MILIEU-PRODUCTION

Depuis longtemps, les forestiers ont essayé de définir la production ligneuse, en évaluant ou en mesurant au mieux, quelques descripteurs simples du milieu. Ainsi, dans chaque région, le gestionnaire sait qu'au-delà de telle altitude la production de telle essence diminue, que sur telle roche telle autre essence ne pousse pas, etc., mais il s'agit généralement de l'influence qualitative d'un facteur "milieu" sur la production. Il serait donc intéressant de connaître de façon plus précise l'**influence d'un groupe de facteurs "milieu", si possible d'un point de vue quantitatif**. Ceci permettrait d'expliquer la production des forêts existantes, donc de définir le meilleur traitement sylvicole (choix de l'essence) et de prévoir la production à attendre dans les reboisements, par analogie. Cette ambition d'analyser le milieu, afin d'établir son effet sur la production constitue l'objet de cette thèse. En choisissant une essence dans la totalité de son aire de répartition et non dans un massif particulier, qui est l'entité fonctionnelle de l'aménagiste, nous voulions intégrer le problème de l'**échelle de perception du sujet**. Pour chaque échelle restait à répondre au sujet, c'est-à-dire à mettre en place une **méthodologie**, qui permettrait de définir les relations entre le milieu et la production et d'en apprécier la précision. Dans cette dernière partie nous voulons exprimer la méthode finalement retenue quelle que soit l'échelle, les résultats et leurs précisions en fonction de l'échelle, et enfin les lacunes et les difficultés, qui peuvent être rencontrées en exprimant les relations entre le milieu et la production.

D) DECOUPAGE EMBOITE, DIVERSES ECHELLES POUR REpondre A UN MEME SUJET

Les échelles abordées dans cette étude ont été mises en forme suivant la logique suivante : chaque espace géographique est stratifié à l'aide de descripteurs écologiques. Il s'agit d'une première étape de découpage emboîté, qui offre trois échelles de perception.

- * Ainsi, les **Alpes externes méridionales** (aire de répartition du *Pin noir* d'Autriche) constituent une *première échelle de perception* (échelle la plus petite), pour laquelle les premiers résultats et l'étude du milieu physique induisent un découpage "naturel" en trois régions climato-géologiques, suivant une logique climatique et géologique.
- * Ces trois nouveaux espaces géographiques, qui sont alors considérés de façon indépendante, constituent la *seconde échelle de perception* (échelle intermédiaire). Ne pouvant répondre immédiatement au sujet sur un tel espace encore trop vaste, chaque **région climato-géologique** a été caractérisée grâce à un massif forestier test, sélectionné à partir de propositions des forestiers locaux.
- * Le **massif forestier test**, *troisième échelle de perception* (échelle la plus grande), est découpé en fonction de facteurs géo-pédologiques ; d'où la mise en forme pour chaque massif forestier d'unités géo-pédologiques homogènes suivant ces critères.

Cette première étape, de découpage emboîté, appelle en retour, une réponse au sujet pour les différentes échelles de perception ; c'est l'étape d'échantillonnage, d'analyse et d'estimation des relations entre le milieu et la production.

Les massifs forestiers tests au travers de la stratification en unités géo-pédologiques ont été le théâtre de notre échantillonnage, afin d'analyser et de décrire les relations entre le milieu et la production, **phase descriptive** à l'échelle la plus grande. Vient alors le stade d'extrapolation aux échelles plus grossières, soit une **phase prédictive** de la production. A cet effet, des massifs forestiers satellites à l'intérieur de chaque région climato-géologique sont choisis et échantillonnés, suivant un protocole identique à celui des massifs forestiers tests. L'objectif est d'exprimer les relations entre le milieu et la production pour l'échelle de perception intermédiaire ; au-delà, en regroupant la totalité de nos observations,

Discussion

une réponse a été donnée pour l'échelle la plus petite. Répondre au sujet exige une méthode, qui va être exposée ci-dessous.

II) UNE METHODE POUR REpondre AU SUJET

Dans cette thèse, nous avons essayé d'adopter, en fonction des objectifs à atteindre, une unique procédure valable pour nos différents échantillons. Les objectifs se trouvaient être au nombre de deux :

- * **phase descriptive** : exprimer la production en fonction du milieu, pour chaque échelle de perception ;
- * **phase prédictive** : exprimer la prédiction d'un modèle lorsqu'on opère un changement d'échelle de perception.

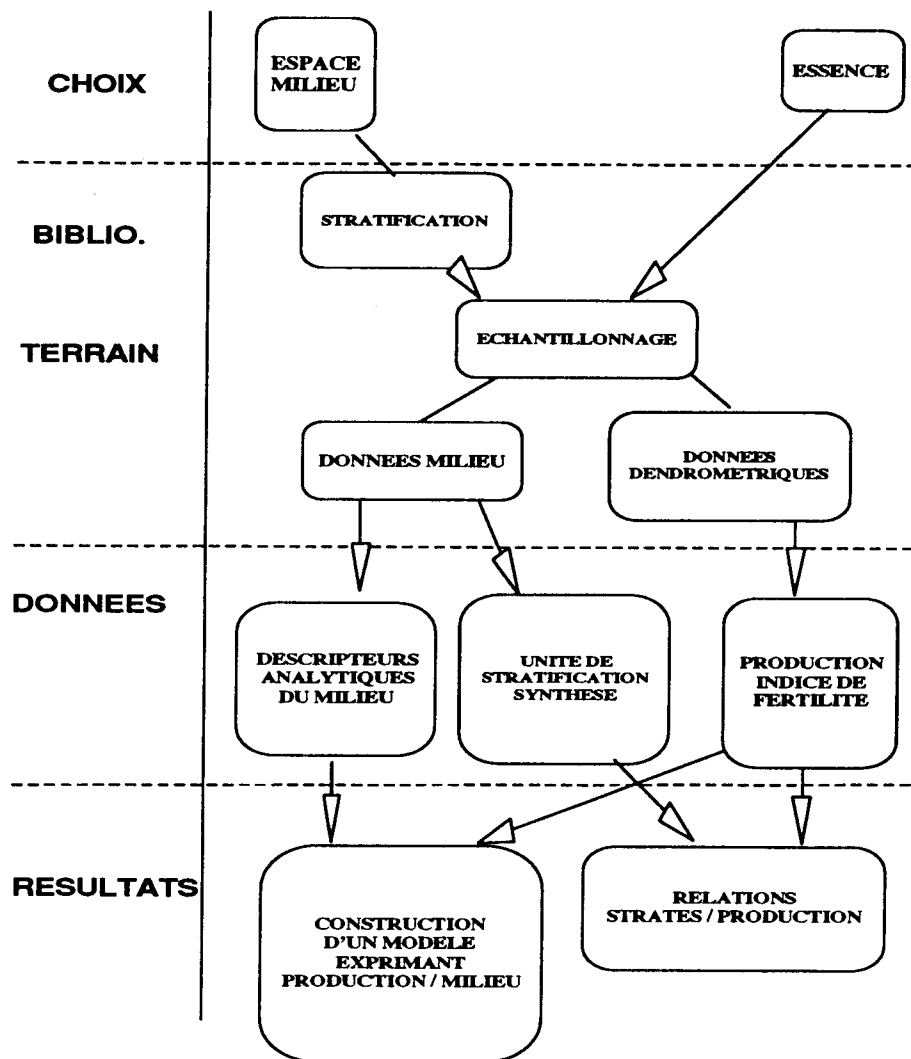
Deux procédures ont été retenues afin de répondre aux deux objectifs, qui viennent d'être cités ; elles font l'objet des deux paragraphes ci-dessous. Enfin, le troisième paragraphe exposera deux méthodes, que nous n'avons pas retenues, mais qui restent valables pour aborder les relations entre le milieu et la production.

Mais tout d'abord, il faut rappeler que le choix de l'essence pour cette étude, nous a été très favorable. En effet, comme nous l'avons signalé dans l'introduction, cette essence forestière dans le sud-est de la France présente trois avantages. Premièrement, elle a été introduite de façon systématique durant une période relativement courte (70 ans), sur d'immenses espaces non boisés et frappés par une érosion violente ; de plus, les provenances de *Pin noir* d'Autriche ont été limitées et la sylviculture a été quasiment absente de ces peuplements. Ces conditions qui viennent d'être rappelées, impliquent que notre étude se limite effectivement aux seules relations entre le milieu et la production, les aspects génétiques étant fixés et les aspects sylvicoles étant écartés. A ces deux avantages, il faut ajouter que l'introduction de cette essence a été massive dans les Alpes externes méridionales, avec comme conséquence que les peuplements se répartissent sur une large amplitude de milieux en correspondance avec une grande variabilité de la production.

1) UNE METHODE POUR REpondre AU SUJET, QUELLE QUE SOIT L'ECHELLE

Ce paragraphe voudrait formaliser la **méthode** finalement mise au point et acceptée dans cette thèse, afin d'aborder les relations entre le milieu et la production du *Pin noir* d'Autriche, **pour chaque échelle de perception**. L'organigramme suivant est la représentation de la démarche adoptée, quelle que soit l'échelle de perception.

RELATION MILIEU-PRODUCTION : LA METHODE



Cette méthode présente l'avantage d'être constante quelle que soit l'échelle de perception considérée. En effet, à grande échelle la méthode s'applique aux données des massifs forestiers tests ; à l'échelle intermédiaire, elle convient aux regroupements des observations, issus des massifs forestiers tests et des massifs forestiers satellites ; enfin, cette procédure s'accorde encore à la totalité des relevés effectués, c'est-à-dire à la petite échelle. Dans tous les cas de figures, à l'intérieur d'une stratification de l'espace, nous avons effectué un échantillonnage au hasard. Dans chaque placette, ont été récoltées des données dendrométriques, qui serviront à définir l'indice de fertilité et des données écologiques. Reste enfin à établir deux types de relations :

- * Relations entités de stratification / indice de fertilité,
- * Relations variables du milieu / indice de fertilité.

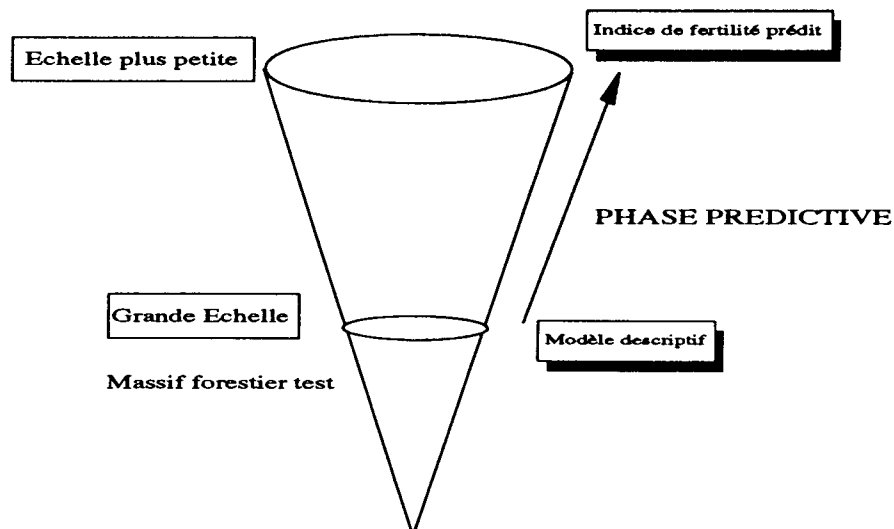
Afin d'atteindre ces deux buts, nous avons sélectionné des "outils mathématiques" appropriés, correspondant à deux chaînes de traitements.

- * Relations entités de stratification / indice de fertilité.
 - ◆ *Analyse de variance* et estimation de l'indice de fertilité pour chaque entité de stratification.
- * Relations variables du milieu / indice de fertilité.

- ◆ *Analyse des données*, afin de sélectionner une liste réduite de variables écologiques significatives pour décrire l'indice de fertilité ;
- ◆ *régression linéaire multiple pas à pas* sur la liste de descripteurs sélectionnés précédemment, afin de construire un modèle exprimant l'indice de fertilité par quelques variables du milieu.

2) UNE METHODE POUR REpondre AU SUJET ENTRE LES ECHELLES

La **phase d'extrapolation** consiste à relier deux échelles de perception, en utilisant le **modèle descriptif** exprimant la fertilité en fonction du milieu. ce modèle descriptif a été établi à grande échelle et il doit permettre de **prédire la fertilité** à une échelle plus petite. Afin d'atteindre cet objectif, le moyen mathématique employé est un simple calcul de l'indice de fertilité grâce au modèle précédemment établi, suivi d'un test de moyennes sur des séries appariées, entre l'indice de fertilité prédit et l'indice de fertilité "vrai" (issu du modèle J.-Ch. HERVÉ).



3) METHODES ECARTEES BIEN QU'ELLES REpondENT AU SUJET

Nous voulons simplement citer deux approches possibles, qui peuvent être acceptées pour répondre à un tel sujet se rapportant aux relations entre le milieu et la production ; nous n'avons pas pu les approfondir faute de temps ou de moyens. Ces deux méthodes sont la "segmentation" et la "régression non linéaire multiple".

3.1) La segmentation

Cette méthode est une *classification descendante* ; l'échantillon initial est découpé en groupes de relevés, de telle sorte que l'explication de l'indice de fertilité soit la meilleure. Les groupes se distinguent les uns des autres grâce aux modalités les plus significatives des variables du milieu, ce qui introduit une hiérarchie des descripteurs du milieu. Finalement, cette méthode fournit une arborescence, avec pour chaque "branche" une classe de fertilité.

Cette méthode présente deux attraits ; elle offre immédiatement une **clé de détermination des milieux** en fonction de la production, d'une part et une **hiérarchie des facteurs écologiques** pour diagnostiquer les potentialités forestières de l'essence étudiée, d'autre part. Elle a été très utilisée au C.E.M.A.G.R.E.F. d'Aix-en-Provence par ALEXANDRIAN D., 1985 lors de l'élaboration de certaines fiches du "Guide technique du forestier méditerranéen français". Nous même, nous avons effectué quelques essais à partir du fichier I.F.N., mais la programmation de cette procédure étant automatique, aucune modification après les premiers résultats ne pouvait être réalisée ; nous avons donc préféré approfondir d'autre méthode.

3.2) La régression non linéaire multiple

Après avoir élaboré nos modèles linéaires multiples, exprimant l'indice de fertilité en fonction de descripteurs du milieu, nous avons observé l'évolution de chaque descripteur sélectionné, en fonction de l'indice de fertilité H_{80} . Dans le cas de l'axe Ventoux-Lure, l'examen de la courbe sigmoïdale entre la réserve utile et la croissance en hauteur du *Pin noir* d'Autriche, constitue une bonne raison pour s'intéresser aux modèles non linéaires. Nous avons fait un essai pour exprimer l'indice de fertilité suivant une fonction multiplicative de la réserve utile. Comme cet unique descripteur ne permet pas de maximiser l'information sur H_{80} , il nous a semblé judicieux d'introduire d'autres descripteurs. Seulement nous ne disposions pas d'un outil satisfaisant pour combiner plusieurs descripteurs dans une relation non linéaire. Nous avons donc opté pour une expression linéaire des résidus.

Au vu de nos résultats, acquis avec un outil non adapté, il nous semble intéressant d'essayer de construire, lors de prochaines études, des expressions non linéaires "vraies". A cet effet, il faudra un logiciel informatique approprié, qui nous a fait défaut ; TOMASSONE R., LESQUOY E. et MILLIER C., 1983 suggèrent un certain nombre de possibilités.

EN CONCLUSION

Les méthodes et procédures que nous venons d'exposer, constituent globalement un outil satisfaisant ; elles nous ont permis de répondre au sujet, en fonction d'objectifs préalablement fixés. Le chapitre ci-dessous se veut la synthèse des résultats et un bilan concernant les descripteurs choisis à priori.

III) RESULTATS ET PRECISIONS DE CES RESULTATS EN FONCTION DE L'ECHELLE

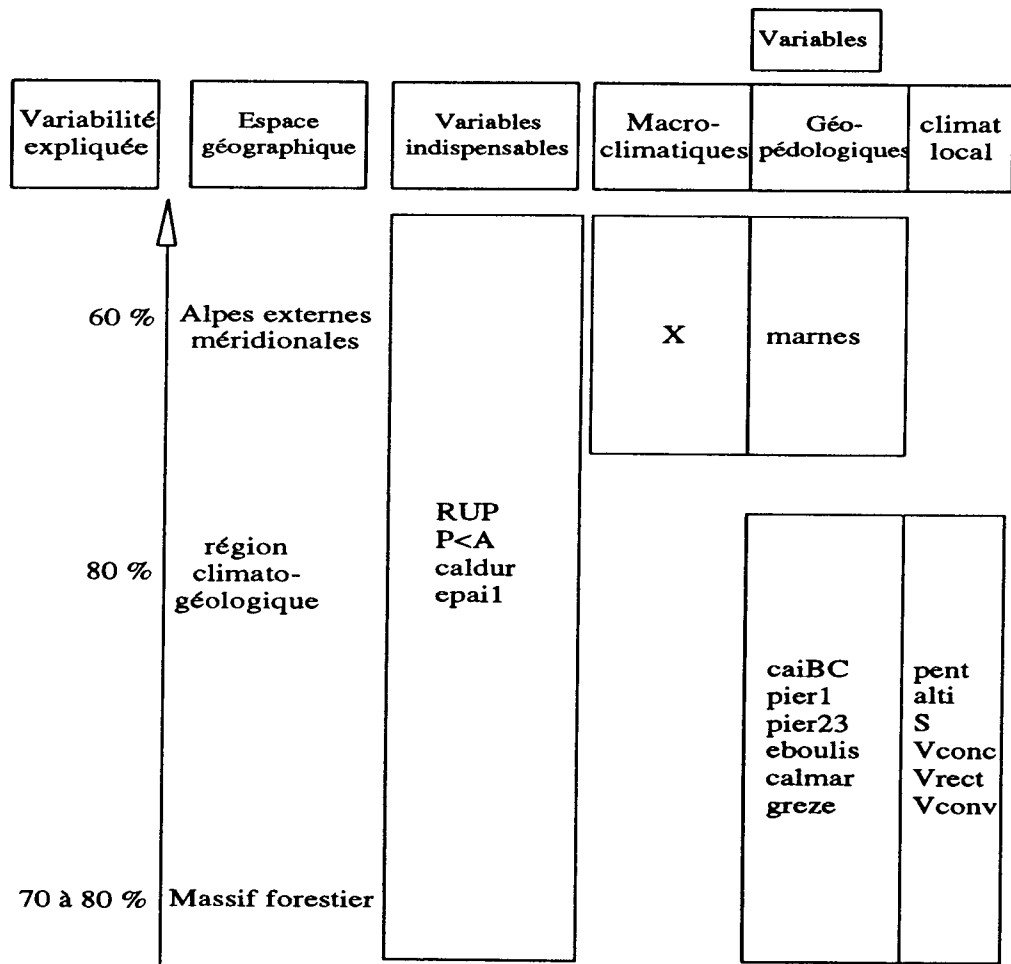
Avant d'entrer dans le détail des descripteurs essentiels pour décrire l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales, nous proposons un tableau synthétique ci-dessous.

Discussion

Variabilité expliquée et erreur sur l'estimation de H_{80} en fonction de l'échelle considérée

	Eff.	Espace géographique	Découpage en strates		Descripteurs simples			Type des descripteurs		
			R ²	SE (m)	R ²	SE (m)	N var.	macro climat	climat local	géo-pédo.
A	548	<i>Alpes externes méridionales</i>	0,085	3,87	0,195	3,63	9	x	x	x
	90	I.F.N.	-	-	0,409	3,25	7	x	x	x
	136	I.N.R.A. Données été90 et été91	-	-	0,613	2,27	5		x	x
B	60	<i>Régions climato-géologiques</i>	0,787	1,83	0,839	1,57	8		x	x
	76	axe Ventoux-Lure	0,869	1,84	0,745	1,88	8		x	x
	63	fosse Vocontienne	0,738	1,81	0,723	1,88	8		x	x
	63	Diois-Nyonsais	0,755	1,98	0,783	1,87	8		x	x
C	50	<i>Massifs forestiers</i>	0,817	1,84	0,836	1,72	8		x	x
	50	Ventoux Diois (Solaure+Glandasse)	0,733	1,98	0,732	2	8		x	x

Légende : "A" : échelle la plus petite, "B" : échelle intermédiaire, "C" : échelle la plus grande.
 "-" : absence d'information, "x" : présence de ce type de descripteurs.



1) GRANDE ECHELLE ET ECHELLE INTERMEDIAIRE

1.1) Résultats du tableau

Les résultats rassemblés dans le tableau précédent, sont quasiment identiques à ces deux échelles de perception, aussi bien dans le cas de l'axe Ventoux-Lure que dans le cas de la fosse Vocontienne ; on peut même observer une légère amélioration de l'erreur standard sur H_{80} , en passant de grande échelle "C" vers l'échelle intermédiaire "B". Ce résultat s'explique assez facilement, d'une part, parce que l'effectif a augmenté et d'autre part, parce que ces relevés demeurent circonscrits à un espace et donc à une gamme de milieux, qui n'a pas évolué avec un changement d'échelle.

En abordant l'échelle intermédiaire, nous ne pouvons pas être certain d'avoir couvert la totalité des milieux offerts dans chaque région climato-géologique. Dans tous les cas, lorsque nous avons abordé un massif forestier, nous l'avons sillonné avec un gestionnaire local, afin d'inventorier toutes les situations écologiques. En admettant que sur les massifs forestiers retenus, nous n'ayons pas oublié de milieu, il est très vraisemblable qu'en choisissant d'autres massifs forestiers satellites, on aurait pu observer de nouvelles situations écologiques. Dans cette hypothèse, il semble probable que le pourcentage d'explication de l'indice de fertilité par le milieu aurait chuté, d'où une perte d'information sur H_{80} par changement d'échelle.

Si on admet que la liste des descripteurs écologiques retenus est la meilleure pour décrire l'indice de fertilité du *Pin noir* d'Autriche, d'une part et étant donné nos effectifs suffisamment conséquents, d'autre part, on peut conclure que le pourcentage de variabilité expliquée sur H_{80} et l'erreur standard de H_{80} prennent leurs valeurs les meilleures, à cette échelle de perception. **A l'échelle du massif forestier (l'entité du gestionnaire) le milieu explique au mieux 80 % de la variabilité sur l'indice de fertilité, pour une erreur standard de moins de 2 m.**

1.2) Prédiction de H_{80} entre grande échelle et échelle intermédiaire

Massif test	Modèles	Massif satellite	Prédiction de H_{80}
Ventoux	n°1	Montagne de Lure	oui
Diois	n°1 n°2 n°3	Nyonsais	oui oui, sur-estimation oui
Diois	n°1 n°2 n°3	Gapençais	oui non oui, sur-estimation

L'utilisation d'un modèle élaboré dans un massif forestier test pour prédire H_{80} dans un massif forestier satellite consiste à tester la prédiction du modèle. Entre tous les modèles construits, **seul le modèle n°1, pour l'axe Ventoux-Lure comme pour la fosse Vocontienne, est valable pour prédire H_{80}** (modèles n°1 différents pour chaque région climato-géologique). Dans l'axe Ventoux-Lure, les modèles n°2 et n°3 ne permettent pas de prédire H_{80} ; et dans la fosse Vocontienne, le modèle n°2 ne permet pas toujours de prédire cet indice de fertilité et le modèle n°3 peut introduire un biais.

2) PETITE ECHELLE

A l'échelle des Alpes externes méridionales, nous avons défini qu'au maximum 61 % de la variabilité sur H_{80} est expliquée par des descripteurs écologiques ; ce chiffre est comparable au 58,8 % annoncé dans l'article de TIMBAL J. *et al.*, 1985, concernant l'échantillon de l'I.N.R.A., sur ce même domaine d'étude. Cependant, il n'est pas certain que nous ayons atteint la meilleure valeur pour ce coefficient de détermination ; à cela trois raisons :

- * notre fiche de relevés et celle de l'I.N.R.A. sont assez semblables, il est heureux que sur un même espace géographique on atteigne le même résultat ; en revanche, il n'est pas certain que ces fiches de relevés soient exhaustives quant à la liste des descripteurs du milieu ;
- * les descripteurs macro-climatiques sont pertinents à cette échelle pour exprimer H_{80} (données "précipitation" ajoutées aux jeux I.F.N. et I.N.R.A.) et ils sont absents de notre échantillon ;
- * Faute de temps, nous n'avons pas échantillonné la région climato-géologique de la "nappe de Digne" ; l'absence de ces milieux peut être à l'origine d'une perte d'information sur la connaissance de H_{80} .

Quand bien même la variabilité expliquée sur H_{80} serait légèrement meilleure à cette échelle, il faut noter toutefois une perte d'information sur la connaissance de H_{80} en passant des grandes échelles vers l'échelle des Alpes externes méridionales. Cette chute de 20 % d'information s'explique comme nous le verrons plus loin par la nature des variables écologiques qui participent à l'estimation de la fertilité.

EN CONCLUSION

Dans ce cas très favorable du *Pin noir* d'Autriche, dans les Alpes externes méridionales, l'explication de l'indice de fertilité par des facteurs du milieu, offre une amplitude entre 80 et 60 %. Il nous semble que la limite supérieure à l'échelle du massif forestier est un maximum, qui prouve le lien extrêmement étroit entre milieu et production. Par contre, nous supposons que ce pourcentage de la limite inférieure aurait pu être amélioré à l'échelle des Alpes externes méridionales. Ces résultats très forts prouvent tout l'intérêt d'entreprendre des études fines concernant le milieu afin de prévoir la production ligneuse. Nous allons à présent rentrer dans le détail de cette liaison entre le milieu et la production, en observant les variables écologiques indispensables.

IV) DES VARIABLES POUR EXPRIMER LA FERTILITE

1) VARIABLES LES PLUS SIGNIFICATIVES POUR DECRIRE H_{80}

1.1) Signification générale des expressions milieu-production

Les expressions élaborées pour l'axe Ventoux-Lure, pour la fosse Vocontienne et pour les Alpes externes méridionales, traduisent en premier lieu la contrainte que représente la situation géographique, à savoir le facteur limitant "eau". Ces **contraintes hydriques** s'expriment suivant des descripteurs écologiques et conditionnent la croissance des peuplements. A ce thème essentiel, mais non suffisant, viennent s'additionner des notions complémentaires comme la **topographie** stationnelle ou du versant, comme le **type géopédologique** (nature de la roche, épaisseur de sol, pourcentage en éléments grossiers, etc.).

Parmi les variables indispensables pour décrire puis prédire la fertilité du *Pin noir* d'Autriche, il faut retenir la liste minimale suivante :

- * *facteurs du climat local*
 - ◆ altitude,
 - ◆ pente,
 - ◆ exposition,
 - ◆ topographie du versant,
- * *facteurs géo-pédologiques*
 - ◆ réserve utile,
 - ◆ calcaire actif dans la fraction < 50 µm, horizons "A1" et "C",
 - ◆ topographie stationnelle,
 - ◆ éléments grossiers en surface ou en profondeur,
 - ◆ épaisseur du profil pédologique < 50 cm,
 - ◆ la roche sous-jacente.

Cette liste réduite de descripteurs écologiques peut être répertoriée suivant deux tendances traduisant soit le "climat local", soit le "système géo-pédologique". Parmi ces descripteurs, caractérisant la fertilité, la majorité sont des descripteurs dits "simples"; cependant il en est deux légèrement différents des autres que l'on qualifie de "complexes", dans la mesure où leur approche n'est pas directe. Il s'agit de :

- * *la réserve utile* : combinaison de variables simples,
- * *la teneur en calcaire actif* : variable écophysologique ayant une action indirecte sur la croissance du *Pin noir*.

Le paragraphe ci-dessous est consacré plus précisément à ces deux facteurs dans la mesure où ils sont plus complexes dans leur définition, que les descripteurs simples.

1.2) Variables fonctionnelles

Quelques soit le massif forestier considéré, la variable "**réserve utile**" peut être considérée comme une variable primordiale pour exprimer H_{80} . Elle est améliorée dans son estimation de la fertilité par la présence de la variable "**calcaire actif**", autre descripteur essentiel. Ces paragraphes ci-dessous voudraient reprendre cette association.

1.2.1) Réserve utile

La **réserve utile** se définit comme étant la "quantité d'eau utilisable par les plantes, contenue dans l'épaisseur de sol explorable par les racines. Elle correspond à la différence entre la quantité d'eau contenue dans le sol à la capacité au champ et celle contenue au point de flétrissement" DELPECH R. *et al.*, 1985. A partir d'une telle définition le calcul de la réserve utile n'est pas simple, aussi avons nous réduit cette définition à la combinaison de trois facteurs pédologiques simples, comme il est couramment admis ; ainsi, voulant l'exprimer de façon quantitative dans notre étude, elle correspond à une combinaison entre la **profondeur de sol disponible**, la **texture** de la terre fine susceptible de retenir l'eau et la **quantité de cette terre fine**. Cette combinaison est relativement réductrice quand on sait que la réserve utile dépend également du calcaire actif, et donc de la composition chimique des horizons, mais aussi de la structure (horizon durci ou massif), etc. Ces lacunes dans notre expression contribuent à éloigner nos valeurs de la réalité.

De plus, les trois grandeurs que nous avons retenues sont dans certains cas, difficilement mesurables, de telle sorte que l'on a recours à une estimation au lieu d'une mesure, nouvelle source d'erreurs sur la réserve utile. A titre d'exemple, en zone calcaire ouvrir une fosse pédologique de 80 cm représente déjà un bel effort, si par chance (pour l'arbre) la roche ou l'horizon induré (type grèze) ne sont pas atteints, nous avons décidé d'estimer la profondeur, en nous aidant si possible des observations en bordure du chemin. Pourquoi avoir choisi cette limite de 80 cm de profondeur ; il s'agit de la profondeur où

prospèrent la quasi totalité des racines de *Pin noir* d'Autriche, qui alimentent l'arbre. En général, nos profondeurs de sol ne dépassent pas 80 cm ; par suite, pour certaines stations parmi les meilleures, en sous-estimant la profondeur nous avons dû réduire la valeur de la réserve utile. De même, la texture et la densité en éléments grossiers de chaque horizon sont estimées et non mesurées, soit deux nouvelles sources d'erreurs. Concernant la texture, pour sa traduction en terme de réserve en eau, nous avons pris le tableau des correspondances "texture - réserve en eau" proposé par FRANCA., 1989, alors que d'autres auteurs préconisent d'autres correspondances, par exemple BAIZE D., 1990 ; ce nouveau choix introduit encore des différences. Et malgré ceci, la réserve utile a un sens pour exprimer H_{80} ; à cela une explication, cette grandeur nous a permis au moins, de bien ordonner les placettes en terme de production et de leurs affecter une valeur pas trop éloignée de la réalité.

Le tableau ci-dessous permet de situer la relation "réserve utile / indice de fertilité". Il ressort que ce lien est nettement plus fort dans le cas du Ventoux et du Ventoux-Lure que dans le cas du Diois et de la fosse Vocontienne. A cela une explication provenant des remarques faites précédemment, la profondeur du sol est peut-être plus mal estimée dans la fosse Vocontienne que dans l'axe Ventoux-Lure ; ou bien un facteur tel que le calcaire actif n'étant pas pris en considération dans le calcul de la réserve utile, il entraîne une perte d'information plus grande dans la fosse Vocontienne que dans l'axe Ventoux-Lure.

Réserve utile / indice de fertilité

Effectif	Espace géographique	Réserve utile	
		R ²	SE
136	<i>Alpes externes méridionales</i> Données été90 et été91	0,288	3,04
60	<i>Régions climato-géologiques</i> axe Ventoux-Lure fosse Vocontienne Diois-Nyonsais Diois-Gapençais	0,448	2,74
76		0,190	3,18
63		0,127	3,14
63		0,185	3,40
50	<i>Massifs forestiers</i> Ventoux Diois (Solaure+Glandasse) Solaure	0,459	2,88
50		0,117	3,37
40		0,095	3,48

Il ressort de ce tableau que dans tous les cas "R²" est important ; nettement plus important dans l'axe Ventoux-Lure ("R²" = 0,459), où cette variable "réserve utile" se révèle toujours la première pour exprimer l'indice de fertilité. Dans la fosse Vocontienne, il s'agit d'un descripteur primordial, qui apparaîtra dans toutes les expressions de la fertilité, mais pas forcément en tant que premier descripteur. Cette grandeur est véritablement indispensable pour approcher H_{80} .

Précédemment, nous avons signalé que la réserve utile dépend entre autre chose du calcaire actif ; cette grandeur a été analysée en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur le terrain, malheureusement pas pour la totalité des relevés. Nous voulons ci-dessous en rappeler l'importance.

1.2.2) Calcaire actif

Le calcaire actif correspond à la forme fine du carbonate et à la fraction "argile+limon". La présence de calcaire actif dans le sol a tendance à inhiber la capacité d'absorption de l'essence forestière. Ce facteur écophysique défavorable est essentiel à la croissance du *Pin noir* d'Autriche ; tout comme la réserve utile, qui elle a une action

favorable. Malheureusement, l'analyse du calcaire actif en laboratoire n'a pas pu être effectuée sur la totalité des échantillons. Après avoir testé le lien entre "indice de fertilité et calcaire actif" suivant différentes variables "calcaire actif", il s'est avéré que ce lien était le plus significatif entre l'indice de fertilité et la teneur en calcaire actif en pourcentage du sol total, d'où le tableau suivant :

Teneur en calcaire actif en pourcentage du sol total / indice de fertilité

Effectif	Massifs forestiers horizons		% en calcaire actif en % du sol total	
			R ²	SE
50	Ventoux	"A1"	0,298	2,92
		"C"	0,322	3,19
		"A1","C"	0,429	2,75
40	Solaure	"A1"	0,234	3,01
		"C"	0,283	2,83
		"A1","C"	0,191	2,67

avec un coefficient de détermination entre le calcaire actif des horizons "A1" et "C" de :
 *0,64 dans le Ventoux,
 *0,88 dans la forêt domaniale de Solaure.

Les résultats précédents révèlent que près de 30 % de la variabilité sur l'indice de fertilité peut être expliquée par la grandeur "calcaire actif". En examinant les "SE", on peut déduire que H₈₀ sera mieux évalué par le calcaire actif en pourcentage du sol total :

- * de l'horizon "A1" pour le Ventoux,
- * de l'horizon "C" pour la fosse Vocontienne.

Dans la forêt domaniale de Solaure, les deux modalités de la variable "calcaire actif en pourcentage du sol total" étant très corrélées ($\rho = 0,88$), le cumul de ces deux modalités provoque une chute de la variabilité expliquée sur H₈₀. Par contre, pour le Ventoux la corrélation étant moindre ($\rho = 0,64$), les deux modalités combinées expliquent encore mieux l'indice de fertilité. Cependant, il faut signaler dès à présent, que contrairement à la réserve utile (descripteur écologique primordial de la fertilité), le calcaire actif lorsqu'il est en concurrence avec d'autres éléments du milieu, n'intervient pas immédiatement pour exprimer H₈₀. A cela deux explications :

- * soit les autres descripteurs simples du milieu apportent davantage d'information sur H₈₀, que le calcaire actif,
- * soit parce que la corrélation entre la réserve utile et le calcaire actif est importante, et dans ce cas, la réserve utile étant extraite, la signification du calcaire actif sur H₈₀ diminue, puisque l'information contenue dans la variable "calcaire actif" a été apportée par la réserve utile.

Ventoux

- * $\rho("RUP", "CO3CA1") = -0,364$
- * $\rho("RUP", "CO3CAC") = -0,298$

Solaure

- * $\rho("RUP", "CO3CA1") = -0,418$
- * $\rho("RUP", "CO3CAC") = -0,345$

A titre d'exemple, l'équation du Ventoux, où le calcaire actif n'intervient qu'en cinquième position, lorsque l'on construit la régression linéaire pas à pas. Ainsi, "CO3CA1" est extrait après (dans l'ordre) : "RUP", "caldur", "pent", "P<A".

1.2.3) Synthèse de la relation réserve utile, calcaire actif / production

La réserve utile et le calcaire actif sont deux descripteurs écologiques essentiels pour exprimer l'indice de fertilité ; apportent-ils encore plus d'information lorsqu'ils sont adjoints ?

Effectif	Massifs forestiers horizons		% en calcaire actif en % du sol total	
			R2	SE
50	Ventoux	RUP,"A1"	0,459	2,59
		RUP,"C"	0,558	2,61
40	Solaure	RUP,"A1"	0,237	3,05
		RUP,"C"	0,334	2,78

Réserve utile et calcaire actif en pourcentage du sol total / indice de fertilité

Dans le cas du Ventoux, en observant les "SE", il ressort que l'association ("RUP", "CO3CA1") est plus forte pour exprimer H_{80} , que l'association ("RUP", "CO3CAC"), (remarque déjà faite d'après le tableau "calcaire actif en pourcentage du sol total / indice de fertilité"). Par ailleurs, le pourcentage de variabilité expliquée sur H_{80} demeure inchangé, si on considère soit le regroupement ("RUP", "CO3CA1"), soit la variable "réserve utile" seule. Il semble donc que dans l'axe Ventoux-Lure le calcaire actif ne soit pas indispensable pour la détermination de l'indice de fertilité.

Par contre, en forêt domaniale de Solaure, la combinaison de la réserve utile et du calcaire actif (en pourcentage du sol total dans l'horizon "C") offre un pourcentage de variabilité expliquée sur H_{80} de 33,4 % ; c'est-à-dire plus important que si on considère la réserve utile (9,5 %) et le calcaire actif (28,3 %) séparément.

Toutefois dans nos expressions de la fertilité, ces grandeurs de synthèse s'additionnent à des descripteurs simples du milieu, afin d'obtenir le maximum d'information sur H_{80} . La réserve utile est le principal descripteur de la fertilité et le calcaire actif vient s'ajouter au lot des descripteurs écologiques.

2) VARIABLES NON RETENUES

Nous voulons dans ce paragraphe citer trois types de variables, significatives pour exprimer H_{80} , que nous avons écarté de notre étude, alors qu'il aurait fallu en approfondir le rôle.

2.1) Variables du recouvrement de la végétation

Dans notre fiche de relevé, nous avons retenu la variable "**recouvrement de la végétation**", qui propose un pourcentage décrivant l'importance de chaque strate. Cette variable se décompose en trois modalités :

- * "SH" : Strate haute > 4 m
- * "SI" : Strate intermédiaire 2 à 4 m
- * "SB" : Strate basse < 2 m

Dès les premiers traitements à l'échelle du massif forestier, cette variable est apparue comme très significative pour exprimer l'indice de fertilité. Sachant que "SH" indique le recouvrement au-delà de 4 m, cette modalité sur nos placettes qualifiées, de futaies régulières de *Pin noir* d'Autriche, exprime le pourcentage de fermeture des houppiers.

Un tel résultat, nous a semblé peu satisfaisant du point de vue du forestier. En effet, l'expression de H_{80} comportant ces valeurs du recouvrement, exigeait que l'on circule dans le peuplement pour estimer les grandeurs "SH", "SI" et "SB", afin de calculer l'indice de fertilité ; d'où la difficulté pour les placettes non plantées en *Pin noir* d'Autriche. De plus, pour le gestionnaire de terrain, passer dans la forêt et estimer ces trois grandeurs, donne autant de travail que de mesurer directement les arbres pour déterminer H_{80} , de façon plus sûre. Nous plaçant dans le champ d'action du forestier, nous avons préféré éliminer cette variable ; mais il est bon dans le cadre de cette discussion d'y revenir quelques instants.

Que peut signifier ce résultat : "le pourcentage de recouvrement explique l'indice de fertilité" ?

- * Une strate basse très dense correspond à une arrivée au sol de lumière, qui peut induire et favoriser la régénération naturelle du *Pin noir* ;
- * une strate basse très dense s'accorde avec un sol plutôt riche, donc favorable au peuplement ;
- * une strate basse peu dense, implique que la strate haute est dense, soit une futaie fermée, sombre, mature ;
- * etc.

La liste des hypothèses reliant l'indice de fertilité au recouvrement de la végétation n'est pas close. Il est certain que cette variable doit sous-entendre des combinaisons de facteurs écologiques plus simples. Dans ce cas, en les éliminant soit nous avons simplement permis aux facteurs écologiques de s'exprimer, par suite l'information sur H_{80} est demeurée inchangée ; soit ces facteurs écologiques n'appartenaient pas à notre fiche de relevé et ils ont été simplement supprimés, en supprimant la variable recouvrement, d'où perte d'information sur H_{80} .

Les équations incluant le "recouvrement de la végétation" expliquaient environ 85 % de la variabilité sur H_{80} , soit 5 % de plus que nos expressions. Finalement en les supprimant, nous avons dû refouler certains descripteurs écologiques et sylvicoles ; il serait bon d'en connaître la liste pour en tenir compte lors de prochaines études "relations milieu-production".

2.2) La flore

Il est indiscutable que la **flore** peut apporter une contribution précieuse à l'estimation de la production ligneuse ; mais le protocole exigé par une véritable étude floristique n'est pas compatible dans notre étude des relations entre le milieu et la production. Nous avons orienté notre travail en fonction des peuplements forestiers et des entités géo-pédologiques, dans lesquelles ils prospéraient. Par suite, nos placettes pouvaient présenter une certaine hétérogénéité d'un point de vue floristique. Pour exemple, des placettes disposant de plus de 75 % de futaie régulière mais avec une certaine luminosité par endroit, d'où l'apparition d'une pelouse sur un quart de la surface de cette placette ; dans ce cas la liste floristique est hétérogène et donc difficilement interprétable. Nous avons abandonné cette orientation phytosociologique, au vu de nos premiers résultats concernant nos groupes floristiques et après un échange avec des spécialistes.

La difficulté pour associer la flore à la production réside dans le choix de la surface minimale pour réaliser un relevé floristique complet, surface qui reste compatible avec des mesures dendrométriques. Nos placettes étaient trop vastes pour un relevé floristique.

2.3) Compensation de variables du milieu

Enfin, à titre indicatif nous voulons faire une dernière remarque concernant les compensations de facteurs du milieu. Il est aisé d'imaginer qu'un facteur pris isolément n'a pas ou peu de sens pour expliquer l'indice de fertilité ; par contre, si il est combiné avec un autre facteur écologique, l'association fournit davantage d'information sur H_{80} , que le second facteur pris isolément. Il y a eu un **phénomène de compensation entre facteurs écologiques**. Par exemple, un taux de calcaire actif élevé la croissance est affectée ; un taux de calcaire actif élevé, mais associé à de l'argile de décarbonation, le peuplement pousse mieux.

Nous avons fait quelques tentatives afin de recréer ce genre de situations, mais sans succès. Partant de rien, il était assez difficile d'envisager des compensations vraies pour le *Pin noir* d'Autriche. Il n'en demeure pas moins que cet axe constitue une voie intéressante pour poursuivre l'approche des relations milieu-production.

CONCLUSION

Conclusion

Au terme de ce travail, il nous semble intéressant de rappeler quelques points concernant cette étude des relations entre le milieu et la production.

Pour exprimer les relations entre le milieu et la production, nous avons adopté deux types de démarches ; une **démarche synthétique** et une **démarche analytique**. Nous voulons simplement dire ici que malgré deux philosophies différentes ces deux approches nous ont donné satisfaction. Chacune d'elles par un biais différent offre une même précision. Par suite, le choix d'une ou l'autre des approches du milieu est indépendant des résultats et de la précision attendue. Il faut savoir en ce qui concerne ces deux approches que :

- * dans le cas de *l'approche synthétique*, le milieu doit être mis en forme, dans le sens où il faut constituer des entités homogènes d'un point de vue écologique. Mais lorsque cette étape est réalisée, on peut facilement établir les relations entre ces entités et la production, et ce pour plusieurs essences forestières. L'inconvénient de cette approche est qu'à petite échelle (par exemple les Alpes externes méridionales), il est pour le moins difficile, voir impossible de prévoir une stratification en entités écologiquement homogènes. Nous n'avons pas effectué l'étude des relations entre les unités géo-pédologiques et la production au niveau des Alpes externes méridionales ;
- * à l'inverse, *l'approche analytique* ne nécessite pas de mise en forme préalable. Chaque descripteur écologique récolté exprime une relation avec la production. Enfin, quelques descripteurs sont retenus ; ils s'agit des plus significatifs dans leur relation avec la production. L'inconvénient de cette approche est lié au caractère exclusif de ces résultats, puisqu'ils ne concernent qu'une essence.

Par ailleurs, ce travail montre de façon très nette que la **précision du lien entre le milieu et la production est fonction de l'échelle**.

Ainsi, en considérant l'échelle la plus petite des Alpes externes méridionales, TIMBAL J. *et al.*, 1985 sur le jeu de l'I.N.R.A., et nous-mêmes sur notre jeu de 136 relevés, obtenons 60 % de variabilité sur H_{80} expliquée par le milieu.

Ce pourcentage s'améliore très nettement en changeant d'échelle, et donc en abordant une échelle plus grande comme la région climato-géologique ou le massif forestier. Alors 80 % de la variabilité sur H_{80} est expliquée par le milieu. Ce chiffre élevé se retrouve dans les travaux de FRANC A. et CURT T., 1990.

Ces auteurs ont travaillé sur le sapin pectiné dans la forêt domaniale de la Loubière (Hautes Cévennes). Ils disposaient de 84 placettes de relevé pour une surface de 120 hectares et leurs résultats sont du même ordre de grandeur que les nôtres.

Cette analogie dans la précision des relations entre le milieu et la production, nous donne à croire qu'à l'échelle du massif forestier le milieu explique 80 % de la variabilité totale sur la production ; et au-delà à l'échelle de la région ce pourcentage chute à 60 %. Cette affirmation devra bien sur être confirmée au cours de prochaines études sur le sujet.

Par ailleurs, pour le sapin pectiné 84 placettes ont été traitées, alors que notre échantillon n'en compte que 50. Il semble donc que pour aborder une étude des relations entre le milieu et la production, à l'échelle du massif forestier, moins d'un relevé à l'hectare est largement suffisant. Se pose alors le problème du coût de ce type d'étude, dans le sens : "Quel est le nombre de relevés minimum indispensables qui doivent être réalisés afin de conserver la qualité des résultats ?". Nous ne pouvons pas de la même manière conclure sur le **nombre de placettes nécessaires et suffisantes** pour exprimer les relations entre le milieu et la production à l'échelle intermédiaire ou à l'échelle d'une région telle que les Alpes externes méridionales.

Conclusion

Enfin ce type de travail peut être intégré aux besoins des forestiers dans la mesure où il répond aux objectifs d'estimation et de prédiction de la production. Ainsi, toute étude fine du milieu est un bon moyen pour appréhender la production ligneuse, pour prévoir la sylviculture à tenir et pour choisir les essences de reboisements afin d'atteindre une production correcte lors de l'exploitation. Pour les gestionnaires de terrain deux possibilités sont à considérer :

L'approche synthétique : dans ce cas, le gestionnaire dispose d'un catalogue de typologie dans une région donnée, il peut alors à *faible coût* :

- * repérer le découpage stationnel dans la zone qui l'intéresse et réaliser quelques mesures dendrométriques pour une essence choisie, afin d'estimer la production de ces peuplements pour chaque station ;
- * il peut ensuite, fort de cette correspondance station-fertilité, se placer dans un espace ouvert décrit par le catalogue des stations et prévoir la production à attendre, si il plante l'essence considérée.

L'approche analytique : cette approche est utilisable dans la mesure où il n'existe pas un catalogue de typologie sur la zone considérée. Elle est d'un *coût plus élevé*, puisqu'elle nécessite la récolte de renseignements écologiques et dendrométriques pour une essence. Cependant pour le *Pin noir* d'Autriche dans les Alpes externes méridionales, le travail étant en partie réalisé par cette étude, il suffirait de récolter un minimum de descripteurs du milieu pour obtenir une information très correcte, qui concerne l'indice de fertilité de cette essence et au-delà la production de cette essence. Par suite, dans le cas qui nous préoccupe le gestionnaire peut disposer d'une information précise pour un coût raisonnable.

Soit par une ou l'autre des approches du milieu, nous espérons vivement que cette estimation de la fertilité sera utilisée par les forestiers locaux. Ainsi, cette thèse s'inscrirait parfaitement dans les objectifs du C.E.M.A.G.R.E.F., organisme de recherche appliquée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDRIAN, D. 1985 - Le choix des essences de reboisement en région méditerranéenne française : un exemple de liaison station-production. Séminaire "phytosociologie et foresterie". E.N.G.R.E.F. (NANCY). novembre 1985.
- AUBOUIN, J. ; BROUSSE, R. et LEHMAN, J.-P. 1978 - Précis de géologie n°2. Paléontologie et stratigraphie. Dunod Université. 690 pages.
- AUSSENAC, G. 1973 - Climat, microclimat et production ligneuse. Ann. Sci. forest. 1973, 30 (3), pages 239-258.
- BAIZE, D. 1990 - Guide des analyses courantes en pédologie. I.N.R.A. 172 pages.
- BARTHES, J.-P. et BORNAND, M. 1987 - Cartographie des sols en moyenne montagne calcaire sèche. Une méthode d'approche possible. Agrométéorologie des régions de moyenne montagne, Toulouse, 16-17 avril 1986. Ed. I.N.R.A., Paris, 1987. (les colloques de l'I.N.R.A. n°39). pages 95-106.
- BECKER, M. 1979 - Indices de climat lumineux combinant pente et exposition. Bull. Ecol. 1979, 10 (2), pages 125-137.
- BECKER, M., LE TACON, F. et TIMBAL, J. 1980 - Les plateaux calcaires de Lorraine, types de stations et potentialités forestières. E.N.G.R.E.F. éditeur. 216 pages.
- BECKER, M. et LE GOFF, N. 1988 - Diagnostic stationnel et potentiel de production. R.F.F. XL. numero spécial 1988. pages 29-43.
- BENICHOU, P. et LE BRETON, O. 1987 - Prix Norbert GERBIER 1986 - Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. Direction de la Météorologie Nationale. La Météorologie 7^e série - n°19 octobre 1987. 28 pages.
- BONNEAU, M. et TIMBAL, J. 1973 - Définition et cartographie des stations. Conceptions françaises et étrangères. Ann. Sci. forest. 1973, 30 (3), pages 201-218.
- BOUCHON, J. 1974 - Les tarifs de cubage, E.N.G.R.E.F. Nancy. 57 pages.
- B.R.G.M. 1984 - Synthèse géologique du sud-est de la France. Stratigraphie et paléogéographie, mémoire n° 125. 615 pages. Atlas, mémoire n° 126.
- CAMPY, M. et MACAIRE, J.-J. 1989 - Géologie des formations superficielles. Géodynamique, faciès et utilisation. ed. Masson. 433 pages.
- CAZES, P. 1976 - Régression par boule et par l'analyse des correspondances. Revue de statistique Appliquée, 1976 vol. XXIV n°4. 22 pages.
- C.E.M.A.G.R.E.F. 1987 - Guide technique du forestier méditerranéen français. Chapitre n°3 : Essences forestières. 33 fiches.
- C.E.M.A.G.R.E.F. 1988 - Proposition de découpage interrégional en secteurs écologiques homogènes dans la zone méditerranéenne française. (autécologie des essences forestières). C.E.M.A.G.R.E.F. d'Aix. 43 pages + annexes.
- CHEVROU, R.-B. 1986 - Modélisation de l'évolution des peuplements ; à partir des données de l' I.F.N. XVIII, IUFRO world congress. Ljubliana (Yugoslavia), september 1986, 7-13. 18 pages.

Bibliographie

- COMBES, F. et BARTET, J.-H. 1982 - Plaidoyer pour le *Pin noir* d'Autriche en Haute-Provence. n° spécial de la R.F.F. XXXIV, n°5, 1982, pages 40-49.
- COUHERT, B. 1990 - Sylviculture du *Pin noir*. Bilan de l'acquis de plus de 30 ans de gestion des peuplements d'origine R.T.M. du Sud-Est de la France. O.N.F. Section technique d'Avignon. 8 pages.
- COUHERT, B., DEMARCQ Ph., LECLERC, D. et CHAUVIN, Ch. 1990 - Sylviculture du *Pin noir* d'Autriche (*Pinus nigra nigricans*). Bulletin technique de l'O.N.F., n°18. juin 1990. pages 3-32.
- DAGET, Ph. 1971 - Quotient pluviothermique d'EMBERGER et évapotranspiration globale. Bull. Rech. Agro. Gembloux, H.S., pages 87-94.
- DAGET, Ph. 1977 - Le bioclimat méditerranéen : Analyse des formes climatiques par le système d'Emberger. Vegetatio. Vol. 34. pages 87-103.
- DEBAZAC, E.F. 1963 - Morphologie et sexualité chez les pins. Rev. For. Fr., 14 (4), pages 213-303.
- DEBELMAS, J. 1970 - Alpes (Savoie et Dauphiné). Guides géologiques régionaux. ed. Masson. 215 pages.
- DEBELMAS, J. 1974 - Géologie de la France. Tome n°2. Chaînes plissées du cycle alpin et leur avant-pays. éd. Doin. pages 296-544.
- DECOUD, J.-M. 1983 - Le *Pin noir* d'Autriche dans le sud-est de la France. Intérêts et Problèmes. C.E.M.A.G.R.E.F. - E.N.I.T.E.F. mémoire de 3^e année. 111 pages + annexes.
- DECOURT, N., GODRON, M., ROMANE, F. et TOMASSONE, R. 1969 - Comparaison de diverses méthodes d'interprétation statistique de liaison entre le milieu et la production du *Pin sylvestre* en Sologne. Ann. Sci. For., 26 (4), pages 413-443.
- DECOURT, N. 1973 - Protocole d'installation et de mesure des placette de production semi-permanentes. C.N.R.F. (I.N.R.A.). 25 pages.
- DELPECH, R., DUMÉ, G. et GALMICHE, P. 1985 - Vocabulaire. Typologie des stations forestières. I.D.F. 243 pages.
- DEMONTZEY, P. 1882 - Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes. Paris, J. Rothschild, 2^e édition, 1882, 528 pages + tableaux, photos, cartes.
- DREYFUS, Ph. 1992 - Relation "production totale et hauteur dominante pour le *Pin noir* d'Autriche dans le sud-est de la France". Communication personnelle. I.N.R.A. Avignon.
- DUCHAUFOR, Ph. 1984 - Pédologie. Abrégés, ed. Masson. 220 pages.
- DUPLAT, P. 1989 - Indice de fertilité basé sur un modèle de croissance en hauteur. Groupe de travail sur la typologie des stations forestières. coordination C.E.M.A.G.R.E.F. 20 pages.
- EMBERGER, L. 1930 - La végétation de la région méditerranéenne. Essai d'une classification des groupements végétaux. Extrait de la revue générale de Botanique, tome XLII. 38 pages.
- EMBERGER, L. 1932 - Sur une formule climatique et ses applications en Botanique. La Météorologie, 92-93 : 423-432.
- EMBERGER, L. 1952 - Phytogéographie. Sur le quotient pluviothermique. Institut de France. Acad. des Sci., pages 2508-2510.
- FOUCAULT, A. et RAOULT, J.-F. 1988 - Dictionnaire géologique. 3^e édition. Masson. 350 pages.
- FRANC, A. 1989 - Le Massif Central Cristallin. Analyse du milieu. Choix des essences. Etudes Forêt n°2. C.E.M.A.G.R.E.F. 102 pages.

Bibliographie

- FRANC, A. et HOULLIER, F. 1989 - Etude des relations entre milieu et production ; quelques critères de choix des méthodes. Groupe de travail sur la typologie des stations forestières. coordination C.E.M.A.G.R.E.F. pages 13-49.
- FRANC, A. et CURT, T. 1990 - Etude des relations stations-production pour le sapin pectiné dans les Hautes Cévennes (Lozère). C.E.M.A.G.R.E.F. Riom. novembre 1990. 30 pages.
- GAMS, H. 1932 - Die klimatische Begrenzung von Pflanzenarealen und die Verteilung des hygrischen Kontinentalität in den Alpen. Zeitschr. d. Ges. f. Erkunde, 56-68, 178-198.
- GAUSSEN, H. 1938 - Etages et zones de végétation en France. Ann. Géogr. n°47, pages 463-487.
- GARBAYE J., LEROY Ph., LE TACON F. et LEVY G. 1970 - Réflexions sur une méthode d'études des relations entre facteurs écologiques et caractéristiques des peuplements. Ann. Sci. forest. 1970, 27 (3), pages 303-321.
- GODRON, M. 1988 - Carte des étages de végétation du Languedoc-Roussillon, Institut de Botanique. éd. Serfob, Montpellier, 28 pages et carte.
- GOVERNET, G., GUIEU, G. et ROUSSET, C. 1971 - Provence. Guides régionaux géologiques. ed. Masson. 230 pages.
- GUERO, M.-Cl. et HOULLIER, F. 1989 - Construction de modèles de croissance en hauteur à partir des données dendrométriques de l'Inventaire Forestier National (I.F.N.) en vue de l'étude des relations station-production. Groupe de travail sur la typologie des stations forestières. coordination C.E.M.A.G.R.E.F. pages 80-96.
- GUYON, J.-P. 1986 - Influence du climat sur l'expression des composantes de la croissance en hauteur chez le *Pin noir* d'Autriche (*Pinus nigra* Am. ssp. *nigricans*). Ann. Sci. For., 1986, 43 (2), pages 207-226.
- HERVÉ, J.-Ch. 1989 - Modélisation de la croissance : cas de la croissance en hauteur des peuplements forestiers. Rapport d'activité 1989. ENGREF/FCPR. 7 pages.
- HERVÉ, J.-Ch. 1993 - Analyse statistique de courbes de croissance. Application à la croissance en hauteur des arbres et des peuplements. Thèse de Doctorat. Laboratoire de biométrie et génétique des populations, Université de Lyon I. à paraître.
- Inventaire Forestier National, 1985 - But et méthodes de l'Inventaire Forestier National. Ministère de l'Agriculture, 67 pages.
- Inventaire Forestier National - Résultats du deuxième cycle d'Inventaire Forestier.
- JORDA, M. 1980 - Morphogénèse et évolution des paysages des Alpes de Haute-Provence depuis le tardiglaciaire, facteurs naturels et facteurs anthropiques. Bull. Assci. Géogr. Franç., PARIS, n°472, pages 295-304.
- LE GOFF, N. et MADESCLAIRE, A. 1986 - Potentialités des stations forestières des plateaux calcaires de Lorraine, pour l'érable sycomore et le merisier. C.R.P.F. Lorraine-Alsace. 55 pages.
- LE TACON, F. 1973 - Sol, nutrition et production ligneuse. Ann. Sci. Forest., 1973, 30 (3), pages 259-285.
- LEBART, L. MORINEAU, A. et FENELON, J.-P. 1982 - Traitement des données statistiques, Méthodes et Programmes. Dunod. avril 1982. 510 pages.
- LEMOINE, B. 1981 - Application de l'analyse factorielle à l'étude de la croissance en hauteur des arbres : exemple du *Pin maritime*. Ann. Sci. Forest. 38 (1), pages 31-54.
- MATHIEU, A. 1865 - Le reboisement et le regazonnement des Alpes. Paris. Typographie Hennuyer et Fils. 112 pages.

Bibliographie

- MICHALET, R. 1991 - Nouvelle synthèse bioclimatique des milieux méditerranéens, application au Maroc septentrional. 27 pages.
- MILLIER, C. 1973 - Méthodologie mathématique des études des liaisons station/production. Ann. Sci. Forest., 1973, 30 (3), pages 351-366.
- NOUALS, D. et BOISSEAU, B. 1992 - Liaisons station-production. Le *Pin laricio* dans les Cévennes. Croisement raisonné de plusieurs outils d'évaluation du milieu. 43 pages + annexes.
- OSWALD, H. 1969 - Les potentialités forestières en Haute-Ardèche, l'épicéa commun (*Picea abies* L.). Ann. Sci. For. 26 (2), pages 183-224.
- OTTORINI, J.-M. et TOTH, J. 1975 - Tables de production pour le *Pin noir* d'Autriche dans le sud-est de la France. Doc. C.N.R.F. Station Sylviculture et Production n°75 FM/04. 5 pages.
- OZENDA, P. 1969 - Documents pour la Carte de la Végétation des Alpes. Université de Grenoble, Laboratoire de Biologie végétale. VII, 1969. 216 pages.
- OZENDA, P. 1981 - Végétation des Alpes sud-occidentales. Cartes de végétation de la France au 200 000^e. Notice détaillée des feuilles. 60 Gap - 61 Larche - 67 Digne - 68 Nice - 75 Antibes. éd. C.N.R.S. 258 pages.
- PARDÉ, J. et BOUCHON, J. 1988 - Dendrométrie. E.N.G.R.E.F. (Nancy, 2^{ème} édition), 388 pages.
- ROL, R. 1954 - Le forestier devant la phytosociologie. Document E.N.G.R.E.F. inédit.
- SCHWARTZ, D. 1963 - Méthodes statistiques à l'usage des Médecins et des Biologistes. Flammarion. 318 pages.
- TIMBAL, J., TURREL, M. et DUCREY, M. 1985 - Les facteurs de productivité du *Pin noir* d'Autriche (*Pinus nigra* Arnold. ssp. *nigricans* Host. *austriaca* Hoss. Novak) dans les Alpes du Sud. Ann. Sci. Forest., 1985, 42 (3), pages 265-282.
- TOMASSONE, R., LESQUOY, E. et MILLIER, C. 1983 - La régression - nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. I.N.R.A. actualités scientifiques et agronomiques 13. Masson. 180 pages.
- TOTH, J. 1974 - Application du résultat de l'analyse de tiges pour la détermination des classes de production du *Pin noir* d'Autriche dans le sud-est de la France. Document n°7/1974. 16 pages.
- TOTH, J. et TURREL, M. 1983 - La productivité du *Pin noir* d'Autriche dans le sud-est de la France. R.F.F. XXXV n° 2. pages 111-121.
- VANNIERE, B. 1984 - Tables de production pour les forêts françaises. 2^e édition. C.N.R.F.-I.N.R.A., O.N.F. et E.N.G.R.E.F. 159 pages.
- VOLLE, M. 1985 - Analyse des données. Economica. Collection "Economie et Statistique avancées". 3^{ème} édition. 323 pages.
- WAKSMAN, G., MÉNARD, M. et BÉLANGER, J. 1975 - Analyse factorielle des relations entre le milieu et la production : étude des tremblais de la section Laurentienne. Can. J. FOR. RES. vol. 5. 662-680.

Bibliographie

CARTES

Cartes Géologiques de La France à 1/250 000^e, GAP et VALENCE. B.R.G.M.

Cartes Géologiques au 1/50 000^e, disponibles dans les Alpes externes méridionales. B.R.G.M.

LOGICIELS

ADDAD 89.1 de LADDAD : Logiciel d'Analyse des Données.

STATGRAPHICS 2.6 d'UNWARE : Statistical Graphics System by Statistics Graphics Corporation.

QUATTRO PRO 4.0 de BORLAND : tableur.

ANNEXES

**ANNEXE n°1
Fiche de relevé**

n° du relevés :.....

date :.....

Département :.....

Région I.F.N. :.....

Forêt domaniale de :.....

Commune de :.....

SITUATION GEOGRAPHIQUE

longi	lati	expK	expS	alti

pente	topoK	topoS	crête

VEGETATION

SH	SI	SB

Dendrométrie

n° arbr.	circon	H dm	A-20
1			
3			
5			
moyennes			

LITHOLOGIE

pendage	altéra	fissur	affle	pierr	roche	matér	épais	géolo

PEDOLOGIE

Profond cm	Horizo	Limite entre Horizo	Couleu terre fine	Text	Struc	Rési	CaCO3 efferves			pH
							sq	tf	2	
0										

Horizon	Eléments grossiers %				Abond. des racin.	Dimensio racines			Compac
	Gr.	Ca.	Pi.	Bl.		Fi	Mo	Gr	

DEFINITION DU MILIEU ET DE LA PRODUCTION

Les relevés écologiques, floristiques et dendrométriques seront effectués dans une placette circulaire de 6 ares, soit un rayon de 13,82 m. Cette dimension s'explique par le protocole d'échantillonnage, qui a été retenu en ce qui concerne les mesures dendrométriques.

SITUATION GEOGRAPHIQUE

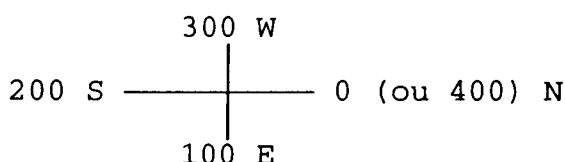
Longitude (en degré, minute, dixième de minute) X

Latitude (en degré, minute, dixième de minute) Y

Exposition (en grade) relevée à deux échelles :

* échelle du Km

* échelle de la station



exposition indéterminée = 999

Altitude (en m)

Pente (en %)

Topographie (qualitatif)

La topographie est relevée à deux échelles :

* échelle du Km

- 0- terrain plat
- 1- sommet vif
- 2- sommet arrondi
- 3- haut de versant
- 4- mi-versant (surface concave)
- 5- mi-versant (surface rectiligne)
- 6- mi-versant (surface convexe)
- 7- bas de versant
- 8- dépression ouverte
- 9- dépression fermée
- 10- talweg
- 11- croupe
- 12- replat
- 13- serre

* échelle de la station, microtopographie

La microtopographie est fonction du profil topographique ; elle est estimée à l'échelle de la placette, et caractérise le bilan des apports et des pertes d'eau par approvisionnement latéral.

Annexes

1- les pertes en eau sont supérieures aux apports latéraux. Haut de pente ou partie convexe d'une pente.

2- les apports latéraux sont nuls ou égaux aux pertes par drainage latéral. Terrain plat ou milieu de pente rectiligne.

3- la circulation de l'eau se ralentit au niveau de la placette le bilan est positif. Bas de pente ou partie concave d'une pente ou replat.

5- l'approvisionnement en eau est exceptionnel, fond de dépression, aval d'une source affleurante sur une pente. Cette position est souvent caractérisée par une végétation et un sol particulier.

Distance à la crête (en m, sur carte)

VEGETATION

Futaie régulière de *Pin noir* d'Autriche, plus de 75 % du peuplement.

Importance des différentes strates : (% ; total = + 100)

Strate haute + 4 m

Strate intermédiaire 2 à 4 m

Strate basse - 2 m

Dendrométrie

La placette circulaire des relevés a un rayon de 13,82 m (soit une surface d'environ 6 ares). Sur cette placette, il faut mesurer le diamètre à 1,30 m, des 5 plus gros arbres ; les classer ensuite par ordre croissant de diamètre et retenir pour les mesures suivantes les arbres n° 1, 3, 5 dans la placette de 6 ares. Ainsi, l'extrapolation est possible aux cent plus gros arbres à l'hectare. On mesurera :

- * la hauteur dominante **H** (utilisation d'un jeu de perches, ou d'un dendromètre).
- * les âges de ces 3 arbres (à la tarière) **A** : âge pris à 20 cm au-dessus du sol

LITHOLOGIE

Pendage (qualitatif)

- 0- non observé
- 1- conforme à la pente
- 2- oblique à la pente
- 3- inverse à la pente

Altération et Fissuration

- 0- nulle ou très faible
- 1- présente
- 2- très forte
- 3- n'existe pas vue les matériaux
- 4- non observé

Affleurement rocheux (en dixième) importance en surface

- 0- absence
- 1- présence ou 1/10
- 2- 2/10
-
- 9- 9/10 et 10/10

Nature de la roche (à la base)

- 0- non visible
- 1- éboulis calcaires
- 2- éboulis marno-calcaires
- 3- marnes
- 4- calcaires marneux
- 5- calcaires durs
- 6- calcaires impurs
- 7- calcaires gréseux
- 8- grèze
- 9- brèche

Nature du matériau au-dessus de la roche

- 0- sol indéterminé
- 1- éboulis vif (récent)
- 2- colluvium
- 3- colluvium sur grèze
- 4- éboulis marno-calcaires
- 5- marnes altérées
- 6- éboulis stabilisé (ancien)
- 7- sol des calcaires

Epaisseur du matériau

- 1- < 50 cm
- 2- 50 à 100 cm
- 3- + 1 m

Géologie lecture sur cartes géologiques disponibles

PEDOLOGIE

Description pour chaque horizon du profil

Horizon

nom et épaisseur de chaque horizon

Limite entre horizons (terrain)

- | | |
|--------------|----------------|
| 1- régulière | 3- irrégulière |
| 2- ondulée | 4- interrompue |

Couleur (terrain)

il s'agit de la couleur de la terre fine et non du squelette. (code Munsell)

Texture (terrain, laboratoire)

Triangle de Jamagne simplifié

- | | | |
|-----------------------------------|-----|------------|
| 1- matériau sableux | S | |
| 2- matériau sablo-limoneux | SL | |
| 3- matériau sablo-argileux | SA | |
| 4- matériau limono-sableux | LS | |
| 5- matériau limono-sablo-argileux | LSA | équilibrée |
| 5- matériau limono-argilo-sableux | LAS | équilibrée |
| 6- matériau limoneux | L | |
| 7- matériau limono-argileux | LA | |
| 8- matériau argilo-sableux | AS | |
| 9- matériau argileux | A | |
| 9- matériau argilo-limoneux | AL | |

Structure (terrain)

- 0- structure particulière (pas d'agrégats, ex sable sec)
- 1- structure massive (assemblage continu et cohérent)
- 2- structure grumeuleuse (agrégats arrondis, environ 2-5 mm)
- 3- structure grumeuleuse (agrégats arrondis, + de 5 mm)
- 4- structure polyédrique (agrégats à arêtes vives)
- 5- structure prismatique (grossiers)

Résistance des agrégats (terrain)

- 1- résiste sous la pression des doigts
- 2- s'écrase sous la pression des doigts

Teneur en calcaire CaCO₃ (terrain)

distinction de la partie qui fait effervescence au HCl (4N) ; soit le squelette (sq), soit la terre fine (tf), soit l'ensemble.

- 0- aucune effervescence
- 1- faible effervescence (quelques bulles, audible)
- 2- effervescence (couche de bulles, visible)
- 3- vive effervescence

pH (terrain, laboratoire)

- | | | |
|--------|--------|--------|
| 0- 4 | 4- 6 | 7- 7,5 |
| 1- 4,5 | 5- 6,5 | 8- 8 |
| 2- 5 | 6- 7 | 9- 8,5 |
| 3- 5,5 | | |

Annexes

Éléments grossiers (% de chaque catégorie, terrain)

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1- graviers (0,2 à 2 cm) | 3- pierres (7,5 à 25 cm) |
| 2- cailloux (2 à 7,5 cm) | 4- blocs (>25 cm) |

Abondance des racines (terrain)

- 0- pas de racine
- 1- présence de racines (1 à 5 /dm²)
- 2- très peu nombreuses (5 à 15 /dm²)
- 3- peu nombreuses (15 à 75 /dm²)
- 4- très nombreuses (75 à 200 /dm²)

Dimension des racines (terrain, présence-absence)

- 1- fines (<2 mm)
- 2- moyennes (2 à 5 mm)
- 3- grosses (> 5 mm)

Compacité (terrain)

- | | |
|-----------------|---|
| 1- meuble | (matériau non cohérent, le couteau pénètre sans effort) |
| 2- peu compact | (un léger effort est nécessaire pour enfoncer le couteau dans le sol) |
| 3- compact | (le couteau ne pénètre qu'incomplètement même sous un effort important) |
| 4- très compact | (il n'est pas possible d'enfoncer le couteau de plus de quelques millimètres) |

Teneur en C/N (mesure sur les échantillons prélevés dans chaque horizon, laboratoire)

Calcaire actif de l'horizon A1 (laboratoire) chiffrer l'observation qualitative du CaCO₃ faite sur le terrain

Matière organique (laboratoire)

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| 0- absente | 4- forte (8 à 12,5 %) |
| 1- faible (<1,8 %) | 5- très forte (12,5 à 25 %) |
| 2- moyenne (1,8 à 3,5 %) | 6- tourbe (>25 %) |
| 3- assez forte (3,5 à 8 %) | |

Densité apparente (laboratoire)

**ANNEXE n°2
Codification des données I.N.R.A.**

Liste des six variables caractéristiques du peuplement :

- * Densité du peuplement, "denP"
 - ◆ 0 : potets non dépressés,
 - ◆ 1 : potets dépressés,
 - ◆ 2 : pas d'éclaircie du tout,
 - ◆ 3 : dense avec début d'éclaircie,
 - ◆ 4 : plusieurs éclaircies antérieures.

- * Homogénéité du peuplement, "homP"
 - ◆ 1 : très régulier et homogène,
 - ◆ 2 : irrégulier sans trouées,
 - ◆ 3 : quelques trouées.

- * Nombre de tiges / hectares, "tige"

- * Surface terrière / hectares, "terr"

- * Classes de fertilité, "fer"

- * Age, "age"

ANNEXE n°3
Index par noms d'Auteurs

ALEXANDRIAN D., 1985	197
AUBOUIN J., BROUSSE R. et LEHMAN J.-P., 1978	32
AUSSENAC G., 1973	185
B.R.G.M., 1984	32
BAIZE D., 1990	116, 121, 202
BARTHES J.-P. et BORNAND M., 1987	38, 90
BECKER M., 1979	184
BECKER M. et LE GOFF N., 1988	12
BECKER M., LE TACON F. et TIMBAL J., 1980	43
BENICHOU, P. et LE BRETON O., 1987	93
BONNEAU M. et TIMBAL J., 1973	12
BOUCHON J., 1974	188
But et Méthodes de l'Inventaire Forestier National, 1985	88, 188
C.E.M.A.G.R.E.F., 1987	18
CAMPY M. et MACAIRE J.-J., 1989	39
CAZES P., 1976	103
CHEVROU R.-B., 1986	95, 100
COMBES F. et BARTET J.-H., 1982	18
COUHERT B., 1990	18
COUHERT B., DEMARCQ Ph., LECLERC D. et CHAUVIN Ch., 1990	19
DAGET Ph., 1971	26
DAGET Ph., 1977	29
DEBAZAC E.F., 1963	18
DEBELMAS J., 1974	32
DECOUD J.-M., 1983	93
DECOURT N., 1973	89, 94
DECOURT N., GODRON M., ROMANE F. et TOMASSONE R., 1969	14
DELPECH R., DUMÉ G. et GALMICHE P., 1985	12, 43, 58, 201
DEMONTZEY P., 1882	18
DREYFUS Ph., 1992	187
DUCHAUFOUR Ph., 1984	93, 121
EMBERGER L., 1930	29
EMBERGER L., 1932	26, 27
EMBERGER L., 1952	27
FRANC A., 1989	70, 92, 202
FRANC A. et CURT T., 1990	208
FRANC A. et HOULLIER F., 1989	94, 102
GAMS H., 1932	28
GARBAYE J., LEROY Ph., LE TACON F. et LEVY G., 1970	13
GAUSSEN H., 1938	25
GODRON M., 1988	29
GOUVERNET G., GUIEU G. et ROUSSET C., 1971	32
GUERO M.-Cl. et HOULLIER F., 1989	102
GUYON J.-P., 1986	105
HERVÉ J.-Ch., 1989	100
JORDA M., 1980	32
LE TACON F., 1973	102
LEBART L., MORINEAU A. et FENELON J.-P., 1982	103
LEMOINE B., 1981	102
LE GOFF N. et MADESCLAIRE A., 1986	13
MATHIEU A., 1865	20
MICHALET R., 1991	28
MILLIER C., 1973	14, 102
NOUALS D. et BOISSEAU B., 1992	13

Annexes

OSWALD H., 1969	14
OTTORINI J.-M. et TOTH J., 1975	100, 188
OZENDA P., 1981	22, 28, 29
P. DUPLAT, 1989	95
PARDÉ J. et BOUCHON J., 1988	95
ROL R., 1954	12
SCHWARTZ D., 1963	149
TIMBAL J., TURREL M. et DUCREY M., 1985	20, 90, 181, 182, 188, 190, 200, 208
TOMASSONE R., LESQUOY E. et MILLIER C., 1983	197
TOTH J., 1974	100
TOTH J. et TURREL M., 1983	89, 98
VANNIERE B., 1984	98
VANNIERE B., 1984	187
VOLLE M., 1985	103
WAKMAN G., MÉNARD M. et BÉLANGER J., 1975	103

Année : 1992

Nom de l'auteur : d'EPENOUX Françoise

Université Joseph FOURIER, GRENOBLE I
C.E.M.A.G.R.E.F. d'Aix-en-Provence

RELATIONS MILIEU-PRODUCTION
Application au *Pin noir* d'Autriche dans
les Alpes externes méridionales.

RÉSUMÉ

Depuis longtemps les forestiers ont cherché, d'une part à définir la production ligneuse et d'autre part, à analyser et à estimer les facteurs du milieu ayant une incidence sur cette production. La liaison entre cette production et le milieu a longtemps été exprimée de façon qualitative, à partir d'observations menées sur le terrain. A présent, ce problème sollicite une réponse quantitative, qui fait l'objet de cette thèse.

Cette étude correspond au choix d'une **méthodologie** afin d'exprimer les relations entre le milieu et la production, quelle que soit l'échelle géographique retenue. Pour chaque échelle, il s'agit premièrement d'exprimer les relations entre le milieu et la production (**phase descriptive**) et d'en apprécier la **précision** ; pour pouvoir ensuite lors d'un changement d'échelle, mesurer la prédiction (**phase prédictive**) des premiers résultats, obtenus dans la phase descriptive. A cet effet deux approches du milieu sont retenues l'une dite **synthétique** et l'autre dite **analytique**.

Pour illustrer les méthodes sélectionnées, une essence forestière et trois échelles géographiques emboîtées ont été choisies. Il s'agit :

- * du *Pin noir* d'Autriche introduit massivement dans les **Alpes externes méridionales**, principalement sur des espaces très érodés, accidentés et appauvris (reboisements R.T.M.). Ces peuplements atteignent aujourd'hui l'âge d'exploitabilité et ils nécessitent un traitement sylvicole approprié ;
- * de **trois espaces géographiques emboîtés**, depuis les "Alpes externes méridionales" jusqu'au "massif forestier", en passant par la "région climato-géologique", qui correspondent à trois échelles pour répondre au sujet.

MOTS CLÉS :

relations milieu/production
méthodes
échelles

approche analytique
approche synthétique

Pin noir d'Autriche
Alpes externes méridionales