



HAL
open science

Écologie et croissance du pin d'Alep en France

C. Ripert, M. Vennetier, L. Blanc, F. Brochiéro, O. Chandieux, B. Chapelle,
Romain Esteve, N. Gadiri, J.C. Hervé, Raphaël Manlay, et al.

► **To cite this version:**

C. Ripert, M. Vennetier, L. Blanc, F. Brochiéro, O. Chandieux, et al.. Écologie et croissance du pin d'Alep en France. irstea. 2001, pp.38. hal-02580039

HAL Id: hal-02580039

<https://hal.inrae.fr/hal-02580039>

Submitted on 10 Nov 2023

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

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

Etude financée par
Le Ministère de l'Agriculture - DERF

ECOLOGIE
ET
CROISSANCE
DU
PIN D'ALEP
EN
FRANCE

Christian RIPERT - Michel VENNETIER

Avec la collaboration de :

**Laurence BLANC, Fabien BROCHIERO, Olivier CHANDIOUX,
Bertrand CHAPELLE, Roland ESTEVE, Nassim GADIRI,
Jean-Christophe HERVE, Raphaël MANLAY, Yaacoub NASSIF,
Cyrille RATHGEBER**

Département Gestion des territoires
Division Agriculture et Forêt Méditerranéennes

GROUPEMENT D'AIX EN PROVENCE

Le Tholonet - BP 31

13612 Aix-en-Provence Cedex 01

Tél.: 42.66.99.62 - Fax : 42.66.99.71

Octobre 2001

Résumé

Ce rapport présente un modèle de croissance en hauteur et l'autécologie du pin d'Alep pour toute la France méditerranéenne. Le travail s'appuie sur un réseau de 512 placettes implantées entre 1997 et 2000. Près de 5000 arbres ont été mesurés, dont 109 ont été abattus et débités finement pour reconstituer leur courbe de croissance (analyses de tige).

- Le modèle de croissance a été calculé et ajusté arbre par arbre, et non par placette, pour être valide dans les peuplements irréguliers et inéquiennes qui sont fréquents dans l'aire naturelle du pin d'Alep. Il permet d'attribuer un indice de fertilité pour le pin d'Alep à n'importe quel site, à partir des arbres existants. 5 classes de fertilité ont été définies.

- Les clefs autécologiques détaillent les relations entre les caractéristiques du milieu naturel et la croissance du pin d'Alep. Elles permettent d'évaluer la fertilité d'un site pour le pin d'Alep en absence de peuplement et même en absence de toute végétation.

Au sein de la zone d'étude, la croissance du pin d'Alep dépend principalement du bilan hydrique local, topographique et édaphique. Mais le climat joue aussi un rôle important à l'échelle régionale : les régions chaudes et humides sont les plus favorables, les zones d'altitude ou de latitude élevées étant défavorables car trop froides avec une courte saison de végétation.

Summary

This report deals with an height growth model and the ecology of *Pinus halepensis* for the French Mediterranean area. Results are based on 512 plots laid out from 1997 to 2000. 5000 trees were measured, among which 109 were logged for detailed stem analyses to assess their past growth.

- The height growth model was calculated and adjusted tree by tree, to be valid in irregular and unevenaged stands that are in *Pinus halepensis* natural range. It is used to calculate a fertility index for any site with an existing *Pinus halepensis* stand. 5 fertility classes have been defined.

- Autecological models give a precise relation between natural environment and *Pinus halepensis* growth. Their aim is to assess the fertility of any site for *Pinus halepensis* without any adult stand and even without any vegetation.

In the study area, *Pinus halepensis* growth is mainly linked with local water availability, depending on topography and soil. At a regional scale, climate is also important : warm and rainy areas are the most favourable, high elevation and latitude are detrimental due to the occurrence of deep frost and short growing season.

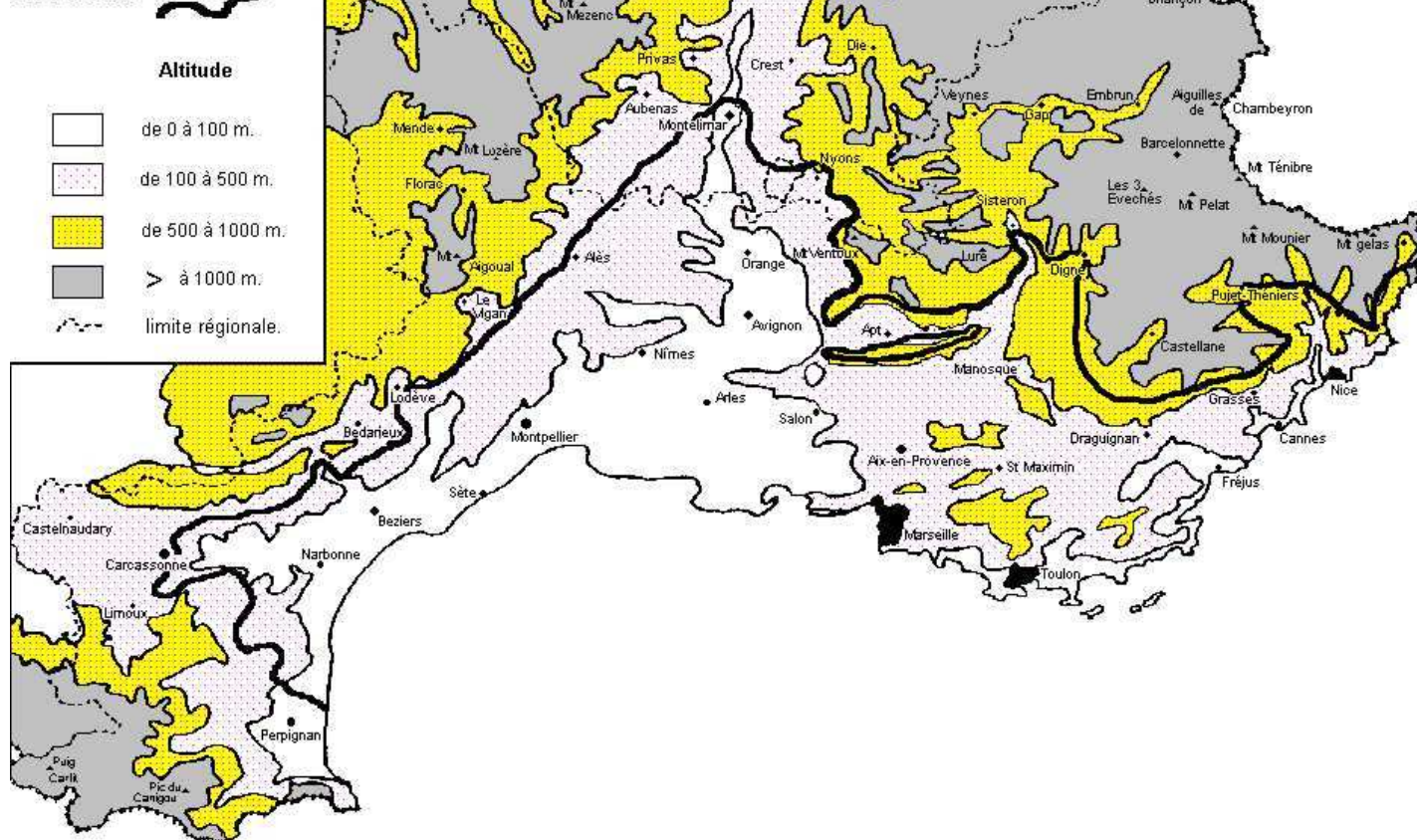
Ces travaux ont été financés par le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (DERF).

L'Office National de Forêts, les Centres Régionaux de la Propriété Forestière des régions PACA et Languedoc-Roussillon, de nombreuses communes et quelques propriétaires privés nous ont apporté leur concours, lors de la recherche des placettes, et en offrant gratuitement les arbres à abattre pour les analyses de tiges.

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 5 |
| 1.1 | CONTEXTE GENERAL | 5 |
| 1.2 | RAPPEL DE LA METHODE ET DES OBJECTIFS DE L'ETUDE | 5 |
| 1.3 | COMPORTEMENT ECOLOGIQUE GENERAL DU PIN D'ALEP | 7 |
| 2 | CROISSANCE EN HAUTEUR DU PIN D'ALEP | 8 |
| 2.1 | METHODE | 8 |
| 2.2 | ECHANTILLONNAGE | 8 |
| 2.3 | ANALYSES DE TIGES | 9 |
| 2.4 | CHOIX D'UN MODELE DE CROISSANCE EN HAUTEUR | 9 |
| 2.5 | RESULTATS | 10 |
| 2.6 | AJUSTEMENT DES MODELES REGIONAUX | 11 |
| 2.7 | MODELE FINAL RETENU | 11 |
| 2.8 | VARIATION DE LA CROISSANCE DANS LE TEMPS. | 11 |
| 3 | CLES DE PREDICTION DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR DU PIN D'ALEP | 12 |
| 3.1 | PRESENTATION DES CLEFS AUTECOLOGIQUES | 12 |
| 3.2 | QUALITE D'OBSERVATION DU MILIEU | 13 |
| 3.3 | PARTICULARITE DES STATIONS SUR MARNES ET ARGILITES (ROCHES FLUIDES) | 14 |
| 3.3.1 | <i>Contraintes de croissance sur marnes et argilites</i> | 14 |
| 3.3.2 | <i>Milieux favorables sur marnes et argilites profondément altérées.</i> | 14 |
| 3.3.3 | <i>Facteurs de compensation sur marnes et argilites</i> | 15 |
| 3.4 | PARTICULARITE DE QUELQUES AUTRES TYPES DE ROCHES ET SOLS | 15 |
| 3.4.1 | <i>Substrats sableux</i> | 15 |
| 3.4.2 | <i>Sols acides lessivés</i> | 16 |
| 3.4.3 | <i>Le pin d'Alep sur roches acides</i> | 16 |
| 3.5 | LES CLEFS AUTECOLOGIQUES | 16 |
| 3.6 | LIMITES DES CLASSES DE FERTILITE | 22 |
| 4 | GLOSSAIRE ET MODE D'EMPLOI | 23 |
| 4.1 | OPERATIONS PREPARATOIRES A UNE EVALUATION DE LA FERTILITE | 23 |
| 4.2 | FACTEURS CLIMATIQUES | 23 |
| 4.3 | FACTEURS TOPOGRAPHIQUES | 24 |
| 4.4 | LA ROCHE | 27 |
| 4.5 | LE MATERIAU | 28 |
| 4.6 | LE SOL | 33 |
| 4.6.1 | <i>Les éléments grossiers</i> | 33 |
| 4.6.2 | <i>Détermination d'une composition texturale simplifiée</i> | 35 |
| 4.6.3 | <i>Profondeur du sol</i> | 36 |
| 4.7 | LISTE DU MATERIEL NECESSAIRE POUR MESURER LES FACTEURS TOPOGRAPHIQUES ET EDAPHIQUES | 38 |
| 5 | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 39 |

Limite du pin d'Alep en France



Limite de l'aire naturelle du pin d'Alep en France

Cette aire est limitée à la zone méditerranéenne.

Quelques plantations de faible surface se trouvent en dehors de cette aire

Introduction

1.1 Contexte général

Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), appelé aussi pin blanc, est caractéristique du bassin méditerranéen où il couvre 3.5 millions d'hectares.

En France, l'Inventaire Forestier National (IFN) lui attribue en 1992 une surface de 202 000 ha dans la région Provence - Alpes - Côte d'Azur (PACA) et une surface de 34 000 ha en Languedoc-Roussillon (carte page précédente). Quasiment absent du Roussillon, il remonte par contre dans la vallée du Rhône jusqu'au niveau de Montélimar où on le rencontre encore assez fréquemment dans les parties basses du sud de la Drôme et de l'Ardèche. Il remonte de la même manière dans la vallée de la Durance jusque à Sisteron.

Sa surface totale en France, tenant compte de l'accroissement observé depuis 10 ans, avoisine 250 000 ha.

Le pin d'Alep est une espèce pionnière en expansion sur le pourtour méditerranéen français, en raison de la déprise rurale qui affecte ces régions. Sa surface a été multipliée par 6 en moins d'un siècle. Le pin d'Alep occupe actuellement 1.6 % de la surface forestière française, ce qui le place au 6^{ème} rang des conifères les plus représentés en France, et au 2^{ème} rang dans les régions méridionales méditerranéennes derrière le pin sylvestre. Il est l'espèce dominante de la basse Provence.

Une première étude circonscrite à la Provence calcaire ouest (Brochiéro 1997) a permis de construire un modèle provisoire de croissance du pin d'Alep et une clé autécologique en fonction des facteurs descriptifs du milieu.

Un test de cette clé autécologique dans les régions avoisinantes a montré qu'une extrapolation n'était pas toujours possible directement, les différences entre valeurs prédites et valeurs observées dépassant fréquemment une classe de fertilité dans certaines régions naturelles.

Compte tenu de l'intérêt que suscite cette essence chez les forestiers méditerranéens publics ou privés, une campagne complémentaire de relevés, financée par la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt du Ministère de l'Agriculture, a donc été réalisée sur toute la zone méditerranéenne française occupée par le pin d'Alep afin de compléter et d'étendre la clé autécologique.

1.2 Rappel de la méthode et des objectifs de l'étude

Il s'agit de déterminer dans un domaine d'étude les facteurs du milieu qui expliquent au mieux la croissance d'une essence, en utilisant les boisements existants. On traduit ces relations milieu-croissance dans une clé autécologique, outil de terrain qui fournit l'indice de fertilité d'un milieu pour une essence donnée, c'est à dire prédit la hauteur atteinte par cette espèce dans ce milieu à un âge de référence.

Dans cet objectif, des relevés stationnels comportant une description écologique, un relevé de végétation et des mesures dendrométriques sont réalisés dans des peuplements naturels ou artificiels de l'essence étudiée, selon un plan d'échantillonnage permettant de couvrir au mieux la variabilité du milieu naturel.

Les prédictions ne peuvent pas toujours être d'une grande précision, mais celle-ci est suffisante pour déterminer, à partir d'observations de terrain, si une essence est adaptée aux conditions écologiques d'un site spécifique. C'est un outil d'aide à la décision permettant de faire un choix

raisonné d'essences dans le cadre d'une reconstitution forestière ou d'un diagnostic de peuplement existant.

Le domaine de cette nouvelle étude couvre toute l'aire française du pin d'Alep, soit tous les départements de la bordure méditerranéenne française. La densité d'échantillonnage est proportionnelle aux surfaces couvertes par le pin d'Alep dans chaque département.

L'échantillon a été réparti pour couvrir géographiquement de façon homogène les peuplements de pin d'Alep, à la fois dans le sens Nord-Sud, correspondant à un gradient de continentalité, mais aussi dans le sens Ouest-Est, correspondant à un gradient d'humidité et de pluviométrie.

Le tableau n°1 ci-contre donne la répartition géographique des 515 relevés effectués (280 relevés de 1997 en Provence calcaire ouest compris).

Tableau n°1 : Répartition des relevés par région

| | | |
|---------------------|-----|---|
| Alpes Hte Prov | 32 | Provence Alpes Côte d'Azur 424 |
| Alpes Maritime | 20 | |
| Bouches du Rhône | 168 | |
| Var | 129 | |
| Vaucluse | 75 | |
| Aude | 20 | Languedoc Roussillon 73 |
| Gard | 21 | |
| Hérault | 28 | |
| Pyrénées Orientales | 4 | |
| Drôme | 15 | Rhône Alpes 15 |

La carte n°1 montre cette répartition.

Le plan d'échantillonnage est basé sur la combinaison de 4 facteurs principaux dont les études précédentes ont montré le rôle important :

- le substrat : roches et formations superficielles,
- les secteurs bioclimatiques (basse Provence et arrière-pays méditerranéen) et les petites régions naturelles,
- l'altitude : 4 classes de 200 à 250 m d'amplitude entre 0 et 900 m,
- l'exposition - indice de rayonnement de Becker (IKR)¹ : stations fraîches, stations neutres, stations chaudes.

D'autres facteurs ont été équilibrés autant que possible à l'échelle de chaque petite région naturelle, notamment la topographie et la profondeur du sol. Bien que les roches acides soient très minoritaires dans l'aire française du pin d'Alep, elles ont fait l'objet d'un échantillonnage particulier.

Les peuplements inventoriés devaient comporter des pins d'Alep, adultes si possibles, mais aussi de jeunes pins ayant poussé sans être dominés, pour permettre une évaluation des vitesses de croissance à différents âges. On a recherché des peuplements mixtes pins d'Alep – chênes, peu anthropisés et le moins perturbés possibles, assez âgés, irréguliers et suffisamment ouverts pour que la flore puisse exprimer au mieux les potentialités de la station. Ce qui exclut les peuplements ayant subi une forte perturbation récente : incendie depuis moins de 30 ans, débroussaillage, coupe importante...

¹ L'IKR est l'indice de rayonnement (ou de climat lumineux) défini par BECKER en 1984. Il permet de prendre en compte à la fois l'exposition et la pente, et d'obtenir ainsi une bonne approche du rayonnement direct atteignant un site.

Rappelons que la problématique essentielle conditionnant la croissance des végétaux en région méditerranéenne est le besoin en eau. Les observations de terrain sont donc orientées vers l'évaluation du bilan hydrique et tous les facteurs descriptifs du milieu sont choisis en fonction de cet objectif, soit pour le rôle qu'il joue dans ce bilan, soit pour l'évaluation qu'ils permettent d'en faire. Une feuille de relevé est jointe en annexe pour montrer la variété des facteurs étudiés.

1.3 Comportement écologique général du pin d'Alep

Comme pour beaucoup d'essences méditerranéennes, c'est le bilan hydrique du sol qui conditionne en premier lieu la croissance du pin d'Alep.

Certains facteurs de type stationnel et méso-facteurs ont une influence importante dans ce bilan. Les principaux facteurs favorables sont :

- ✧ en topographie générale, les vallées, vallons, plaines et plateaux,
- ✧ une grande profondeur des matériaux superficiels (altérites ou colluvions),
- ✧ une faible charge en éléments grossiers,
- ✧ les texture équilibrées ou au moins mixtes,
- ✧ une topographie stationnelle concave,
- ✧ des matériaux d'origine colluviale.

Sur le plan climatique certains seuils décelés dans l'étude précédente se sont confirmés ou précisés :

La tranche altitudinale optimale se situe entre 100 et 500 m avec :

- une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 700 et 1000 mm,
- des pluies d'été (juin juillet août) supérieures à 100 mm,
- une température moyenne annuelle comprise entre 12 et 15°C.

Le seuil des 100 m d'altitude s'explique par une pluviométrie très faible sur la plus grande partie de la frange littorale méditerranéenne (zone centre et ouest) où néanmoins de très bonnes croissances sont observées lorsqu'existe une forte compensation par des facteurs topographiques et édaphiques.

Dans la partie orientale du littoral méditerranéen, à l'est de Toulon, ce seuil n'existe plus car les précipitations deviennent plus abondantes. Mais l'urbanisation réduit à peu de chose dans ce secteur la place et l'importance de la forêt et donc du pin d'Alep.

Le seuil des 500 - 600 m d'altitude suivant les versants correspond à une température annuelle de 11° C qui semble être une limite pour la croissance rapide du pin blanc. Dans l'étage supérieur, il entre en concurrence aussi avec d'autres espèces plus dynamiques et mieux adaptées au froid (chêne blanc, pin sylvestre, pin noir, cèdre...) qui limitent son extension et le cantonnent sur les sols superficiels en versant sud.

A l'intérieur de la zone méditerranéenne française, le pin d'Alep, s'il présente des variations fortes de croissance liées à ses exigences écologiques, ne rencontre pas de contraintes rédhibitoires. Il s'adapte plus ou moins bien à tous les types de stations et permet de valoriser, ou au moins d'occuper forestièrement, des situations difficiles où aucune autre essence ne s'adapte.

C'est aussi un colonisateur qui occupe rapidement les espaces vacants, ravagés par le feu ou abandonnés par l'agriculture quelles que soient les conditions de milieu. C'est ce qui explique sa rapide extension durant ces 100 dernières années. Bien que l'intérêt des pinèdes soit controversé, le pin d'Alep permet de constituer des peuplements transitoires facilitant

l'implantation en sous-bois des chênes vert et chênes blancs, capables de constituer par la suite des peuplements durables mais qui souvent n'auraient pas pu s'installer directement ou pousser correctement en plein découvert.

En conclusion, le pin d'Alep présente de fortes croissances sur les zones fertiles à bilan hydrique élevé. Il peut également occuper les terrains à très faible fertilité. C'est un des seuls arbres à pouvoir pousser sur des sols superficiels et squelettiques, notamment en bord de mer. C'est aussi une des seules espèces à s'adapter sur les substrats marneux et notamment sur leurs faciès d'érosion appelés communément "*bad-lands*".

2 Croissance en hauteur du pin d'Alep

L'étude autécologique comporte quatre étapes successives :

- les relevés de terrain, écologiques et dendrométriques,
- la mise au point d'un modèle de croissance, pour les arbres ou les peuplements,
- le calcul à partir de ce modèle d'une hauteur de référence pour les arbres sur chaque placette, tenant lieu d'indice de fertilité (cet indice correspond à la hauteur estimée de chaque arbre à un âge de référence identique pour tous les arbres),
- et enfin la mise en relation entre cet indice de fertilité et les facteurs du milieu, qui aboutit aux clefs autécologiques.

2.1 Méthode

La première étude a été entreprise par Couhert et Duplat (Bulletin Technique de l'ONF 25, 1993.). Cette étude a calculé un modèle de croissance en hauteur dominante pour les plantations (peuplements équiennes purs) de pin d'Alep, ce qui limitait à priori son champ d'application : la majorité des peuplements actuels sont issus de reforestation naturelle et ne sont ni équiennes ni purs.

Nous avons donc employé une nouvelle méthode qui consiste à modéliser la croissance en hauteur des arbres pris individuellement et non plus en peuplement. Elle a plusieurs avantages :

- donner des résultats valides quel que soit le type de peuplement, y compris pour des pins isolés dans un peuplement d'autres espèces, ou dominant un taillis de feuillus,
- de permettre la comparaison de plusieurs générations sur un site très homogène et de mettre ainsi en évidence les variations de croissance avec le temps.

2.2 Echantillonnage

Le travail de modélisation se base sur deux types de mesures :

- mesure de couples âge-hauteur sur un grand nombre d'arbres, permettant de choisir des individus représentatifs pour les analyses de tiges, et de comparer la croissance de différentes générations,
- analyses de tiges sur un échantillon d'arbres représentatifs, pour lesquels la courbe de croissance est reconstituée de façon précise pour la modélisation.

Pour toutes les placettes, cinq arbres sont échantillonnés si possible (mesure âge, hauteur, circonférence). Les arbres choisis sont les plus hauts du peuplement quand il n'y a qu'une génération, et les plus haut de leur génération quand plusieurs générations sont présentes sur une même placette. Quelle que soit la génération considérée, les arbres échantillonnés sont toujours des arbres dominants. Enfin, seuls les arbres sains ne présentant ni accident grave, ni

pathologie visible sont sélectionnés. 1859 arbres (et donc de couple âge / hauteur) ont ainsi été échantillonnés. Pour chaque arbre on note la hauteur, la circonférence et l'âge. L'âge à 1.30 m est estimé par sondage à cœur à la tarière de Pressler. Pour estimer le nombre d'années entre la naissance de l'arbre et 1.30m, on effectue un sondage au pied de quelques arbres, ou on abat un jeune arbre pour compter les cernes à son pied, ce qui est automatique sur les placettes d'analyse de tige. L'incertitude sur les premières années de croissance, donc sur l'âge exact des arbres, est une des causes de l'incertitude sur les indices de fertilité.

2.3 Analyses de tiges

Les placettes choisies sont représentatives des différentes classes de fertilité et les arbres choisis représentatifs des différentes générations au sein de ces classes. 113 arbres ont ainsi été abattus et analysés sur 49 placettes réparties dans toute la zone d'étude (cf. tableau n°2)

Tableau n°2 : répartition des analyses de tige dans le domaine d'étude

| | Echantillon Complet | Corbières et Minervois | Drôme provençale | Plateaux de Provence | Provence calc. Ouest | Côte d'Azur |
|--|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| nb de placettes d'analyses de tiges | 49 | 5 | 5 | 3 | 32 | 4 |
| nb analyses de tiges | 113 | 9 | 5 | 6 | 86 | 5 |

Sur chacun de ces arbres nous avons fait une coupe au collet (qui nous permet de lire l'âge actuel de l'arbre).

La hauteur des autres découpes est variable en fonction de la fertilité du site : les arbres à croissance rapide sont découpés moins finement que les arbres à croissance lente, et d'autre part les coupes sont rapprochées (entre 0.3 et 0.5 m) dans les parties basses et hautes du tronc correspondant aux périodes de croissance en hauteur plus lente, et plus éloignées (maximum 2.0 m) dans la partie médiane. On obtient ainsi dans tous les cas un nombre de cernes à peu près équivalent entre chaque découpe.

A partir de l'ensemble des découpes, on peut reconstituer la courbe de croissance en hauteur de l'arbre, connaissant l'âge qu'il avait à la hauteur de chaque découpe.

Les analyses de tige ont concerné des peuplements de fertilité variée, les vitesses de croissance couvrant une très large gamme.

2.4 Choix d'un modèle de croissance en hauteur

On cherche à ajuster aux courbes de croissance fournies par les analyses de tiges un modèle mathématique. Parmi les modèles disponibles nous avons testé :

- le modèle déjà utilisé dans l'étude du pin d'Alep en Provence calcaire (Brochiéro 1997),
- le modèle utilisé par Couhert et Duplat dans l'étude de la croissance du pin d'Alep en 1993,
- 5 modèles de type Bailey et Clutter anamorphiques (pour lesquels l'accroissement relatif en hauteur est constant pour chaque âge, quels que soient les milieux concernés) et polymorphiques (non proportionnels).
- ainsi que 5 modèles de type Duplat et Tran-Ha qui ont servi à la modélisation de la croissance de divers résineux en France.

Les modèles sont ajustés simultanément à l'ensemble des courbes à l'aide d'un programme de régression non linéaire. Une fois la forme du modèle de croissance en hauteur choisie (sur l'ensemble de l'échantillon), le modèle est ajusté à cinq sous - échantillons, correspondant aux cinq régions naturelles étudiées (Corbières et Minervois, Drôme provençale, Plateaux de

Provence, Basse Provence, Côte d'Azur). Cette étape permet de vérifier la stabilité de la croissance du pin d'Alep sur toute la région méditerranéenne française.

Les modèles sont comparés, pour l'ensemble des courbes et pour les sous-échantillons régionaux, sur la base :

- de la variance résiduelle, traduisant la qualité de l'ajustement moyen du modèle aux courbes de croissance,
- d'une analyse des résidus, qui permet de rechercher et éliminer les modèles donnant une proportion trop importante de très mauvaises estimations locales, tout en s'ajustant bien sur la moyenne des courbes,
- et par un examen visuel qui permet de juger de l'adéquation du modèle à la forme des courbes aux âges maximums et minimums, donc des possibilités d'extrapolation au-delà des classes d'âge les mieux représentées dans l'échantillon.

On cherche ensuite à estimer l'erreur commise par les modèles dans l'estimation de l'indice de fertilité pour chaque arbre quand seul un couple âge / hauteur est disponible et non toute la courbe de croissance. Pratiquement, cela revient à évaluer la fiabilité du modèle pour le calcul des indices de fertilité sur des arbres dont l'âge est éloigné de l'âge de référence.

Pour répondre à cette question, on note sur chaque analyse de tige la hauteur atteinte par l'arbre lorsqu'il avait l'âge de référence : puisqu'on dispose de découpes régulières, on a souvent une ou deux mesures réalisées au niveau ou à proximité de cet âge, permettant de connaître cette hauteur avec précision. Puis pour chaque couple âge / hauteur (chaque découpe) disponible de 15 ans au sommet de l'arbre, une hauteur à l'âge de référence est calculée à l'aide du modèle de croissance, puis comparée à la hauteur observée. Le calcul est fait arbre par arbre sur toutes les analyses de tige où l'âge de l'arbre est au moins égal à l'âge de référence.

La différence est analysée en fonction :

- de l'âge de la découpe servant au calcul, pour détecter une limite inférieure d'âge en dessous de laquelle les prédictions ne sont plus possibles en raison de la variabilité de la croissance en phase juvénile.
- de l'écart entre cet âge et l'âge de référence, pour donner l'intervalle de confiance de la prédiction en fonction de cet écart,
- puis en fonction de la rapidité de la croissance des arbres pour savoir si la régularité de la croissance dépend ou non de la fertilité de la station.

2.5 Résultats

Les modèles de Bailey et Clutter sont les moins bien adaptés à décrire la croissance en hauteur du pin d'Alep. Les modèles du type Chapman-Richards, que ce soit la forme classique, celle proposée par Hervé et Brochiero ou encore celle proposée par Couhert et Duplat, sont bien adaptés à la modélisation de la croissance en hauteur du pin d'Alep. Les variances résiduelles obtenues avec ces modèles sont un peu supérieures à celles obtenues avec les modèles de Duplat et Tran-Ha, qui représentent le type de modèle le mieux adapté à la moyenne des courbes de croissance disponibles.

Cependant, ces modèles de Duplat et Tran-Ha ne sont pas adaptés aux courbes de très faible croissance. Sur les stations les moins fertiles, elles prédisent des hauteurs inférieures à 0 dans les 20 à 35 premières années.

Nous préférons donc le modèle du type Chapman-Richards déjà utilisé pour le pin d'Alep en Provence calcaire, qui présente la plus petite différence de variance avec le modèle de Duplat et Tran-Ha sans en avoir les inconvénients dans les faibles classes de fertilité.

La fiabilité de ce modèle en fonction de l'âge des arbres mesurés est aussi l'une des meilleures. Une première partie, de 0 à 35 ans est caractérisée par des erreurs de prédiction assez élevées (moyenne proche de 0.85 m). Cette partie correspond à la phase « d'installation » de l'arbre. On sait que l'arbre est alors soumis à de nombreux aléas (concurrence aérienne et racinaire, recherche de fissures dans les milieux karstiques, fragilité face aux accidents climatiques) rendant sa croissance difficile à modéliser. Une seconde partie, de 35 à 90 ans et qui forme un « plateau » stable, est caractérisée par des résidus faibles (moins de 0.6 m). Au-delà de 90 ans, le nombre de données baisse fortement et la variabilité s'accroît, rendant l'interprétation difficile.

La précision des résultats ne dépend que très peu de la rapidité de la croissance des arbres. On peut considérer que les limites ci-dessus sont valables quel que soit le niveau de fertilité des stations.

Pour la suite, nous avons donc exclu des calculs les arbres d'âge inférieur à 35 ans, et les arbres de plus de 110 ans lorsque d'autres étaient disponibles.

2.6 Ajustement des modèles régionaux

La variance résiduelle associée aux modèles ajustés régionalement est toujours inférieure ou égale à celle associée au modèle ajusté sur l'ensemble des données, ce qui montre qu'il y a des particularités constantes sur ces régions. Ces particularités de croissance peuvent résulter des facteurs du milieu ou de facteurs génétiques. Mais l'écart entre le modèle global et les modèles régionaux (nul pour la Basse Provence et les plateaux de Provence et faible pour les autres régions) est suffisamment faible pour que le modèle général soit appliqué à l'ensemble de l'échantillon et donc à l'ensemble de l'aire d'étude sans risque pour le gestionnaire.

2.7 Modèle final retenu

Nous avons retenu finalement le modèle de type Chapman-Richards proposé par Brochiero en 1997, dont les paramètres ont été optimisés sur l'ensemble de l'échantillon donc en bloc sur toute la zone méditerranéenne française.

Ce modèle se traduit par un faisceau de courbes de croissance (voir graphique du faisceau de courbes de référence avec les clefs autécologiques). L'âge de référence (70 ans) et les limites des 5 classes de fertilité définies par Brochiero sur la Provence calcaire, s'échelonnant de 6 à 25m, sont pertinentes pour l'ensemble de la zone méditerranéenne française et sont conservées, assurant ainsi la cohérence et la comparabilité entre ce travail et l'étude précédente.

2.8 Variation de la croissance dans le temps.

Une accélération de la croissance du pin d'Alep tout au long du XX^{ème} siècle avait été décelée lors de l'étude précédente sur la Provence calcaire. Nous avons vérifié que cette tendance était vraie pour l'ensemble de la zone méditerranéenne française, et du même ordre de grandeur : 4.5 cm/an depuis 80 ans. Cette tendance est calculée sur les placettes qui présentent plusieurs générations, et est donc débarrassée des variations qui pourraient résulter de différences de fertilité entre les placettes. Ce calcul qui a demandé plusieurs mois de travail a fait l'objet de deux publications qui sont annexées au rapport. Grâce aux nouvelles données, nous avons aussi calculé que cette accélération n'était pas constante dans le temps, mais augmentait progressivement, de 2 cm/an il y a 60 ans à plus de 6 cm/an actuellement.

Cette accélération a été prise en compte dans le calcul des indices de fertilité. En effet l'âge moyen des arbres par placette varie dans une fourchette allant de 35 à 120 ans, une majorité étant comprise entre 50 et 80 ans. Si on considère un milieu donné, l'estimation de sa fertilité peut aboutir à des différences dépassant 3 m, soit une classe de fertilité, suivant l'âge des arbres qui ont été mesurés. En absence de correction, tous les modèles de clef autécologique donnent un résidu qui présente une corrélation non négligeable avec l'âge moyen des arbres de la placette.

Nous avons homogénéisé les calculs en appliquant une correction individuelle à chaque arbre, tenant compte de la différence entre l'âge de chaque arbre et l'âge de référence. Après cette correction, le résidu moyen des modèles autécologiques est réduit et ne présente plus aucune tendance avec l'âge.

Les variations de croissance observées peuvent être mise en relation avec les résultats concordants des recherches sur l'ensemble de l'hémisphère nord qui montre une accélération moyenne positive de la croissance des arbres.

Les clefs autécologiques que nous proposons sont un compromis entre la nécessité d'optimiser les calculs de modélisation et le réalisme des prédictions. En pratique, la croissance actuelle des arbres étant plus rapide qu'à l'époque de la jeunesse des arbres de notre échantillon, les prédictions des clefs doivent sous-estimer systématiquement la croissance des arbres jeunes actuels. Notre échantillon étant centré entre 50 et 70 ans, nous pouvons estimer que, pour des stations de fertilité moyenne, cette sous-estimation est de l'ordre 1.5m pour des arbres âgés de 30 ans en 2000, et de plus de 2m pour des peuplements naissants.

Cependant, la forte variabilité observée montre que retenir la valeur prédite par les clefs constitue une mesure de précaution évitant les erreurs grossières de surestimation, beaucoup plus graves dans leurs conséquences que les erreurs de sous-estimation.

3 Clés de prédiction de la croissance en hauteur du pin d'Alep

3.1 Présentation des clefs autécologiques

Trois clés autécologiques ont été construites, à partir de la base de données constituée par 512 relevés retenus dans l'ensemble de la région méditerranéenne française.

Les analyses statistiques réalisées dans les deux cas sont différentes mais utilisent les mêmes relevés et exactement les mêmes variables.

- La clé globale issue d'une analyse des données par régression se présente sous forme d'un tableau. Elle liste les facteurs écologiques déterminants, et donne une note pour chacune de leurs modalités. La somme des notes replacée dans un abaque donne directement l'indice de fertilité de la station.
- La clé dichotomique issue d'une analyse par segmentation se présente sous la forme d'une arborescence. A chaque bifurcation de la clef, une variable présente deux modalités opposées entre lesquelles on choisit d'après l'observation du terrain. Au bout du cheminement dans l'arborescence, on obtient l'indice de fertilité moyen des milieux présentant l'ensemble des caractères écologiques aboutissant à cette branche de la clef. C'est une première approximation de l'indice de fertilité du milieu que l'on cherche à évaluer.

Cette prédiction est comprise dans un intervalle de confiance relativement large, dans lequel il faut trouver la position plus précise du milieu évalué à l'aide d'un tableau présentant des facteurs de compensation. Ce tableau sépare les modalités favorables et les modalités

défavorables des variables du milieu. Un nombre supérieur de facteurs favorables fera tendre la fertilité vers le haut de l'intervalle de prédiction, tandis que la dominance des facteurs défavorables aura un effet inverse, et l'équilibre entre les deux indiquera une fertilité proche de la moyenne.

En cas d'hésitation entre deux modalités (valeur observée proche de la valeur critique séparant deux branches de la clef), il faut parcourir le cheminement jusqu'au bout pour les deux branches et faire une moyenne des deux résultats.

- La clef spéciale roches fluides. Cette clef est destinée à évaluer la fertilité des milieux sur marnes et argilites, qui présentent des caractéristiques particulières rendant très aléatoire la prédiction de la fertilité par les deux autres clefs (voir le chapitre suivant consacré à ces roches). Elle a la même structure que la clef globale.

Les deux premières clefs peuvent être utilisées indifféremment. Elles donnent des résultats très concordants dans plus de 95% des cas. On peut si possible les utiliser toutes les deux et choisir la moyenne des deux résultats comme valeur de l'indice de fertilité. La clef dichotomique permet d'approcher la valeur de la fertilité avec moins de variables que la clef globale dans un premier temps, ce qui peut suffire dans certains cas. Mais une estimation par cette clef dichotomique ne sera jamais précise sans l'évaluation de la majorité des facteurs de compensation. Une fois ces facteurs de compensation observés, on dispose de tous les éléments pour utiliser aussi la clef globale.

Pour l'utilisation pratique de ces modèles voir en annexe le glossaire présentant les facteurs descriptifs du milieu et les critères de choix des différentes modalités de ces facteurs.

3.2 *Qualité d'observation du milieu*

L'expérience montre qu'on ne peut en aucun cas évaluer correctement la fertilité du milieu pour le pin d'Alep sans une observation très attentive du sol, et en particulier sans une observation de tous les horizons du sol, le plus profondément possible. Une observation superficielle (limitée aux 20 ou 30 premiers centimètres du sol), conduit souvent à des erreurs supérieures à 2 classes de fertilité.

En présence d'une colluvion, il est nécessaire de rechercher l'altérite sous-jacente, si elle est accessible.

En présence d'une altérite, il est nécessaire de dégager celle-ci aussi profondément que possible, pour déterminer son degré d'altération, le pourcentage de terre fine, la texture de cette dernière.

Les valeurs à utiliser dans les clefs pour les pourcentages d'éléments grossiers et la réserve en eau texturale sont la moyenne des différents horizons pondérés par leur profondeur respective.

Enfin l'observation directement sur des fosses pédologiques ou dans les environs des bancs de roches affleurants renseignera souvent sur le pendage des couches géologiques, et le degré de fracturation de la roche qui constitue un facteur clef en milieu calcaire.

L'observation des talus de routes ou de fossés constitue un moyen souvent rapide et efficace d'approcher le sol d'une parcelle forestière, en montrant non seulement la structuration du sol mais aussi sa variabilité spatiale. Ces observations doivent être complétées par des fosses dispersées et des sondages à la tarière.

3.3 Particularité des stations sur marnes et argilites (roches fluides)

Les marnes et les argilites donnent naissance à des milieux particuliers dont la fertilité pour le pin d'Alep, comme pour les autres végétaux, est très difficile à évaluer.

Les cas extrêmes, bien connus et identifiés, sont les "*bad-lands*", zones érodées sur roche fluide affleurante, où très peu d'espèces végétales arrivent à s'implanter et à survivre, avec une croissance extrêmement lente.

3.3.1 Contraintes de croissance sur marnes et argilites

Les contraintes exercées sur la végétation par ces roches sont de plusieurs natures :

- contrainte chimique, avec des teneurs en calcaire actif qui peuvent être très élevées,
- contraintes mécaniques, avec une compacité souvent très forte, aidée par la faible variabilité texturale, et une tendance à devenir très dures lors du dessèchement.
- contrainte hydrique, avec à la fois
 - une tendance à se dessécher profondément par évaporation en période sèche (effet de mèche), aucune discontinuité texturale ni élément grossier ne s'opposant à la remontée capillaire de l'eau,
 - une tendance à s'engorger et devenir asphyxiant en surface lors des épisodes pluvieux,
 - une imperméabilité partielle qui empêche l'eau de pénétrer en profondeur lors des épisodes de pluies violentes caractéristiques du climat méditerranéen, seules les pluies fines et prolongées, rares ici et inconnues en été, participant à la réhydratation des horizons profonds.
 - et une très forte capacité de rétention de l'eau, qui freine l'absorption de l'eau par les plantes.

Les sols développés sur marnes et argilites sont facilement érodables, faute d'éléments grossiers paillant la surface du sol, et de bancs de roche pour limiter et canaliser le ruissellement. Dans les secteurs en pente forte, ils ont fréquemment été dégradés à l'extrême dans le passé, les difficultés de réinstallation de la végétation derrière incendie ou exploitation ayant accentué les phénomènes érosifs.

Les croissances observées sur ces sols peu évolués sont souvent inférieures à très inférieures aux prédictions par la clef globale. C'est pourquoi une clef particulière a été développée pour les stations sur marnes et argilites.

Pour l'évaluation de la fertilité des milieux sur ces roches fluides, on a obtenu de bons résultats en considérant que les horizons peu ou pas altérés se comportaient comme une roche dure non altérée, c'est à dire qu'ils ne contribuaient pratiquement pas à la fertilité du sol. On leur attribue un taux "d'éléments grossiers" de 95% lorsqu'on les prend en totalité ou en partie en compte dans le calcul de la profondeur, notamment lorsque des racines peuvent y être observées en nombre significatif.

De même l'affleurement de couches non altérées doit être considéré dans l'esprit des clefs autécologiques comme affleurement rocheux.

3.3.2 Milieux favorables sur marnes et argilites profondément altérées.

Par contre, les sols développés sur des marnes et argilites très profondément et intensément altérées peuvent se révéler particulièrement fertiles : les contraintes chimiques y ont été levées par la décarbonatation partielle et l'altération, les contraintes mécaniques sont également limitées car le matériau d'altération, surtout lorsqu'il est enrichi en matière organique, est beaucoup moins compact que la roche mère. Sur ces sols, la croissance des arbres est souvent

sous-évaluée par les clefs autécologiques, mais dans une fourchette imprévisible sans analyse chimique détaillée.

La différence entre les états "peu altérée" et "fortement altérée" d'une roche fluide n'est pas toujours facile à évaluer. Elle se remarque :

- à la disparition progressive de la structure grossière et du litage de la roche mère, qui a tendance à fondre pour donner une structure beaucoup plus fine et floue,
- à la décompaction des horizons qui deviennent beaucoup plus pénétrables par une lame de couteau par exemple.

Mais la levée des contraintes chimiques n'est pas possible à évaluer sans analyse et contribue à une grande variabilité des croissances sur des milieux qui paraissent physiquement semblables.

3.3.3 Facteurs de compensation sur marnes et argilites

Lorsqu'on se trouve dans des alternances de marnes ou argilites avec d'autres types de roches, notamment des roches dures, la fertilité du milieu s'accroît en général avec la proportion des autres roches, particulièrement si les bancs de roches intercalés sont bien fracturés et permettent le passage et le développement des racines. Cet effet favorable des bancs de roche intercalés est d'autant plus favorable que le pendage est incliné par rapport à l'horizontale, permettant aux racines de descendre via ces bancs à grande profondeur en profitant à l'interface des couches de la réserve en eau des roches fluides voisines, sans souffrir de leurs contraintes chimiques et mécaniques. Les bancs de roche dure inclinés permettent aussi à l'eau de pluie et de ruissellement de s'infiltrer en profondeur rapidement, même en cas de pluie courte et forte, compensant l'imperméabilité des roches fluides.

Pour que les effets négatifs de marnes ou argilites non profondément altérées soient compensés, il faut que des bancs de roches dures et fracturées ou de roches très perméables occupent au moins 50% du volume dans le premier mètre de sol, et si possible dans les 2 premiers mètres. Cette proportion peut être réduite (40%) si le pendage est incliné par rapport à l'horizontale.

Les effets négatifs des substrats de roches fluides s'atténuent aussi avec la présence d'une colluvion d'épaisseur supérieure à 50 cm. Au-delà de 80 cm de colluvion, les effets négatifs disparaissent le plus souvent, surtout si l'origine de la colluvion n'est pas la roche fluide. On peut alors utiliser la clef globale.

3.4 *Particularité de quelques autres types de roches et sols*

3.4.1 Substrats sableux

Les substrats sableux purs peuvent se rencontrer dans deux cas différents :

- soit des altérites de roches en place : les grès et dolomies pures peuvent donner des altérites sableuses.
- soit dans le cas de sables sédimentaires, représentant la roche mère en place.

Dans le premier cas, les clefs définies pour l'ensemble des autres substrats (sauf marnes et argilites) donnent des résultats en moyenne correcte malgré de fortes variations autour de cette moyenne. La faible capacité de rétention en eau de ces altérites peut être plus ou moins compensée par la grande profondeur de l'altération.

Dans le cas de sables en place, les fertilités observées sur le terrain sont souvent un peu surévaluées par les clefs, mais pas systématiquement. On considérera donc avec prudence les

valeurs obtenues. Les très faibles surfaces concernées par ces substrats dans les régions étudiées ne rendent pas nécessaire l'établissement d'une clef particulière.

3.4.2 Sols acides lessivés

C'est un cas rare dans l'aire française du pin d'Alep, mais il a été rencontré quelques fois au cours de l'étude. La végétation de ces sols traduit ces conditions de milieu particulières : forte présence de la callune par exemple.

Dans ces cas, le pin d'Alep souffre d'un déficit nutritionnel qui réduit de plusieurs mètres l'indice de fertilité prédit par les clefs. Les faibles surfaces concernées et le tout petit nombre de relevés qui y ont été réalisés ne permettent pas de faire une clef particulière.

Il faut dans ce cas utiliser les clefs normales et réduire de 25 à 30% la valeur obtenue.

D'autres espèces que le pin d'Alep sont mieux adaptées à ces conditions dès que la pluie est suffisante, notamment le pin maritime.

3.4.3 Le pin d'Alep sur roches acides

Le pin d'Alep se plaît et pousse très correctement sur roches acides dès que le sol n'est pas particulièrement pauvre. On le trouve ainsi sur la bordure occidentale du massif des Maures et dans d'autres régions naturelles acides du Languedoc-Roussillon. C'est en général la concurrence naturelle exercée par le pin maritime sur ces milieux qui l'en a exclu, ainsi que la préférence de l'homme pour le pin maritime, plus droit, meilleur producteur de résine, et à croissance potentiellement plus rapide dans les zones acides pas trop sèches.

La prédiction par les clefs dans les stations à sols profonds développés sur ces substrats acides sous-estime souvent un peu la croissance réelle du pin d'Alep. Mais cette sous-estimation n'est pas suffisamment forte pour être statistiquement fiable et ne mérite pas de correction systématique.

3.5 *Les clefs autécologiques*

Elles sont représentées dans les tableaux ci-après.

Climat

| variable | Pluies d'été | | | | | | Pluies moyenne annuelle (mm) | | | | | | Température moyenne annuelle | | | | | | | | | |
|----------------|--------------|---------|---------|----------|-----------|------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------|---------------------|
| Classes | <70 | 70 - 85 | 85 - 95 | 95 - 115 | 115 - 160 | >160 | <600 | 600 - 700 | 700 - 780 | 780 - 850 | 850 - 1050 | >1050 | <10.9 | 10.9 - 11.6 | 11.6 - 12.1 | 12.1 - 12.6 | 12.6 - 13.2 | 13.2 - 14.4 | 14.4 - 15 | 15 - 15.5 | >15.5 | |
| Valeur | -0.5 | -0.3 | 0 | 0.3 | 0.5 | 0 | -1.8 | -0.6 | 0 | 0.9 | 1.8 | 0 | -0.9 | -0.7 | -0.3 | 0 | 0.5 | 0.9 | 0.47 | 0 | -0.3 | Total climat |
| Note | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Relief

| Variable | Topographie générale | | | | | Topo transversale | | | Terrasses | | Altitude | | | | | |
|----------------|----------------------|--------------|----------------|-------------------|--------------------------|-------------------|------|-------------|-----------|-----|----------|-----------|-----------|-----------|------|---------------------|
| Classes | vallon vallée | bas de pente | plaine plateau | pentec et replats | sommet croupe haut pente | con-cave | plan | con-convexe | oui | non | <100 | 200 - 300 | 300 - 450 | 450 - 600 | >600 | |
| Valeur | 2.2 | 0.7 | 0 | -0.3 | -1.5 | 2.0 | 0 | -2.0 | 4.0 | 0 | 0 | 1.2 | 0 | -0.4 | -1.2 | Total relief |
| Note | | | | | | | | | | | | | | | | |

Surface du sol

| Variable | Affleurements cailloux | | | Affleurements rocheux | | | | |
|----------------|------------------------|--------|------|-----------------------|-------|--------|------|----------------------|
| Classes | <10% | 10-30% | >30% | 0 | 1-10% | 10-30% | >30% | |
| Valeur | 0.5 | 0 | -0.5 | 1.0 | 0.4 | -0.4 | -1.0 | Total surface |
| Note | | | | | | | | |

Roche

| Variable | Pendage stationnel | | | | | Fracturation roche | | | Plaquettes | | |
|----------------|--------------------|-------|---|-----|----------|--------------------|-----|-----------|------------|-----|--------------------|
| Classes | Très défav | défav | 0 | fav | très fav | peu | moy | beau-coup | oui | non | |
| Valeur | -0.6 | -0.3 | 0 | 0.3 | 0.6 | -0.6 | 0 | 0.6 | -1.8 | 0 | Total roche |
| Note | | | | | | | | | | | |

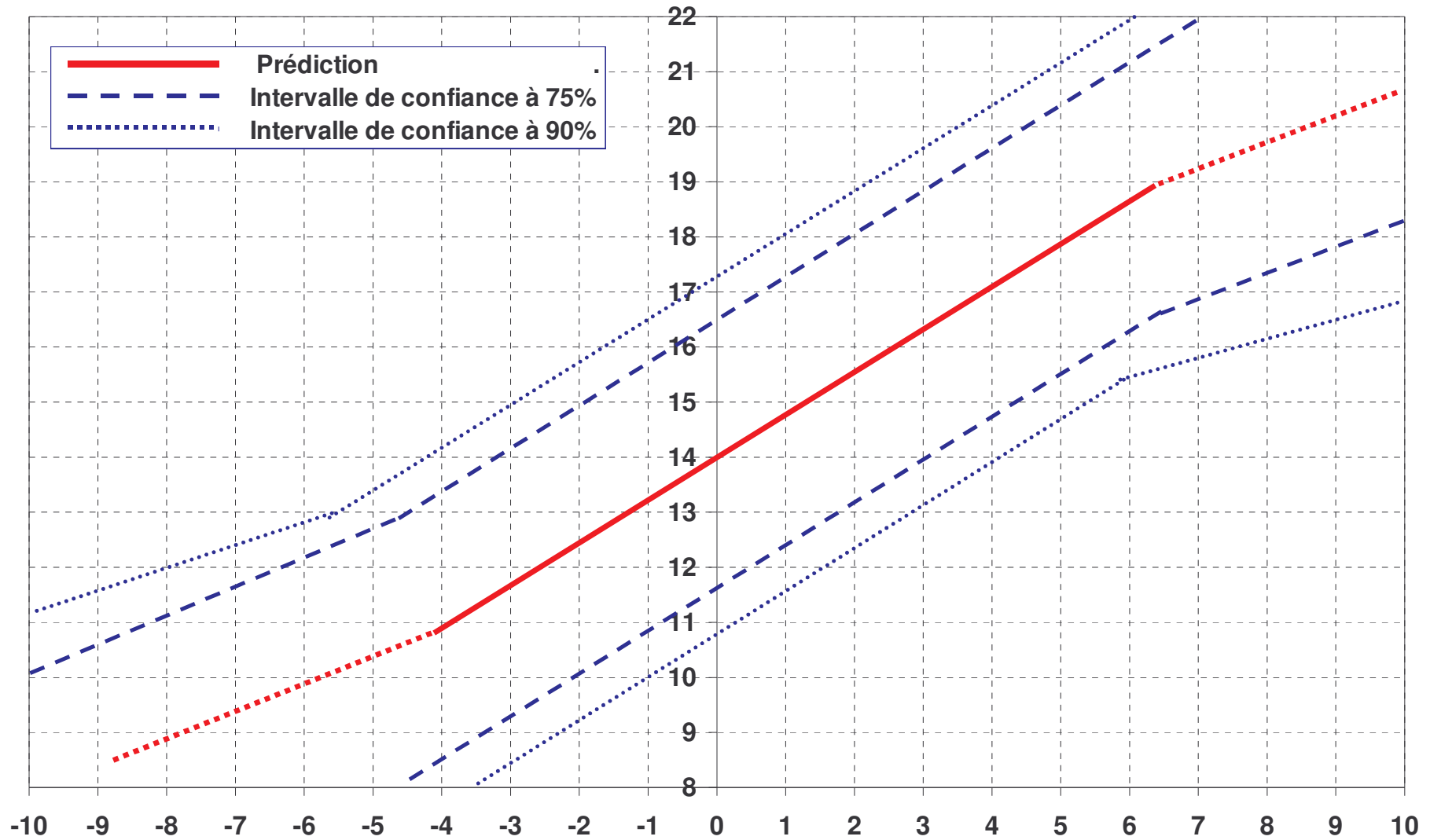
Sol

| Variable | Réserve en eau texturale (mm/m) | | | | | Profondeur totale du sol (cm) | | | | | | | % éléments grossiers | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|------|-------------------------------|---------|---------|---------|----------|-----------|------|----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|------|------------------|--|
| Classes | <100 | 100 - 140 | 140 - 180 | 180 - 196 | >196 | <35 | 35 - 60 | 60 - 75 | 75 - 90 | 90 - 110 | 110 - 180 | >180 | 0 | 1 - 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 | 80 - 95 | >95 | | |
| Valeur | -1.3 | -0.6 | 0 | 0.8 | 1.3 | -2.6 | -0.9 | -0.3 | 0 | 0.6 | 1.2 | 1.7 | 0 | 1.4 | 0.5 | 0 | -0.5 | -1.0 | -1.4 | Total sol | |
| Note | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

La hauteur est déduite du total général par l'abaque page suivante

| | |
|----------------------|--|
| Total général | |
|----------------------|--|

Abaque de prédiction de l'indice de fertilité à partir de la clef autécologique
Clef globale marnes et argilites exclues



Climat

| variable | Pluies moyenne annuelle (mm) | | | | | | Pluies d'été | | | | | | T° moy annuelle | | |
|----------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|--------------|---------|---------|----------|-----------|------|-----------------|-----------|------|
| | <600 | 600 - 700 | 700 - 780 | 780 - 850 | 850 - 1050 | >1050 | <70 | 70 - 85 | 85 - 95 | 95 - 115 | 115 - 160 | >160 | <11.6 | 11.6 - 15 | >15 |
| Classes | | | | | | | | | | | | | | | |
| Valeur | -1,3 | -0,5 | 0 | 0,7 | 1,3 | 0 | -0,5 | -0,3 | 0 | 0,3 | 0,5 | 0 | -0,9 | 0 | -0,6 |
| Note | | | | | | | | | | | | | | | |

| |
|---------------------|
| Total climat |
| |

Relief

| variable | Topographie générale | | | | | Topo transversale | | | Terrasses | |
|----------------|----------------------|--------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------|------|---------|-----------|-----|
| | vallon vallée | bas de pente | plaine plateau | pent. et replats | sommet croupe haut pente | concave | plan | convexe | oui | non |
| Classes | | | | | | | | | | |
| Valeur | 1,8 | 0,6 | 0 | -0,2 | -1,2 | 2,2 | 0 | -2,2 | 2 | 0 |
| Note | | | | | | | | | | |

| |
|---------------------|
| Total relief |
| |

Roche

| variable | Affleurements rocheux | | | | Pendage stationnel (*1) | | | | |
|----------------|-----------------------|-------|--------|------|-------------------------|------|-----|-----|-----|
| | 0 | 1-10% | 10-30% | >30% | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
| Classes | | | | | | | | | |
| Valeur | 0,5 | 0,2 | -0,2 | -0,5 | -1,9 | -1,0 | 0,0 | 1,0 | 1,9 |
| Note | | | | | | | | | |

| |
|--------------------|
| Total roche |
| |

Sol

| variable | Epaisseur colluvion | | | | | Réserve en eau texturale (mm/m) | | | | | Profondeur totale du sol | | | | | | |
|----------------|---------------------|--------|---------|---------|----------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|------|--------------------------|---------|---------|---------|----------|-----------|------|
| | 0 | 5 - 30 | 30 - 50 | 50 - 80 | >80 (*2) | <100 | 100 - 140 | 140 - 180 | 180 - 196 | >196 | <35 | 35 - 60 | 60 - 75 | 75 - 90 | 90 - 110 | 110 - 180 | >180 |
| Classes | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Valeur | -1,7 | -0,8 | 0 | 1,3 | | -0,6 | -0,3 | 0 | 0,4 | 0,6 | -3,2 | -1,1 | -0,4 | 0 | 0,8 | 1,5 | 2,2 |
| Note | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| |
|------------------|
| Total sol |
| |

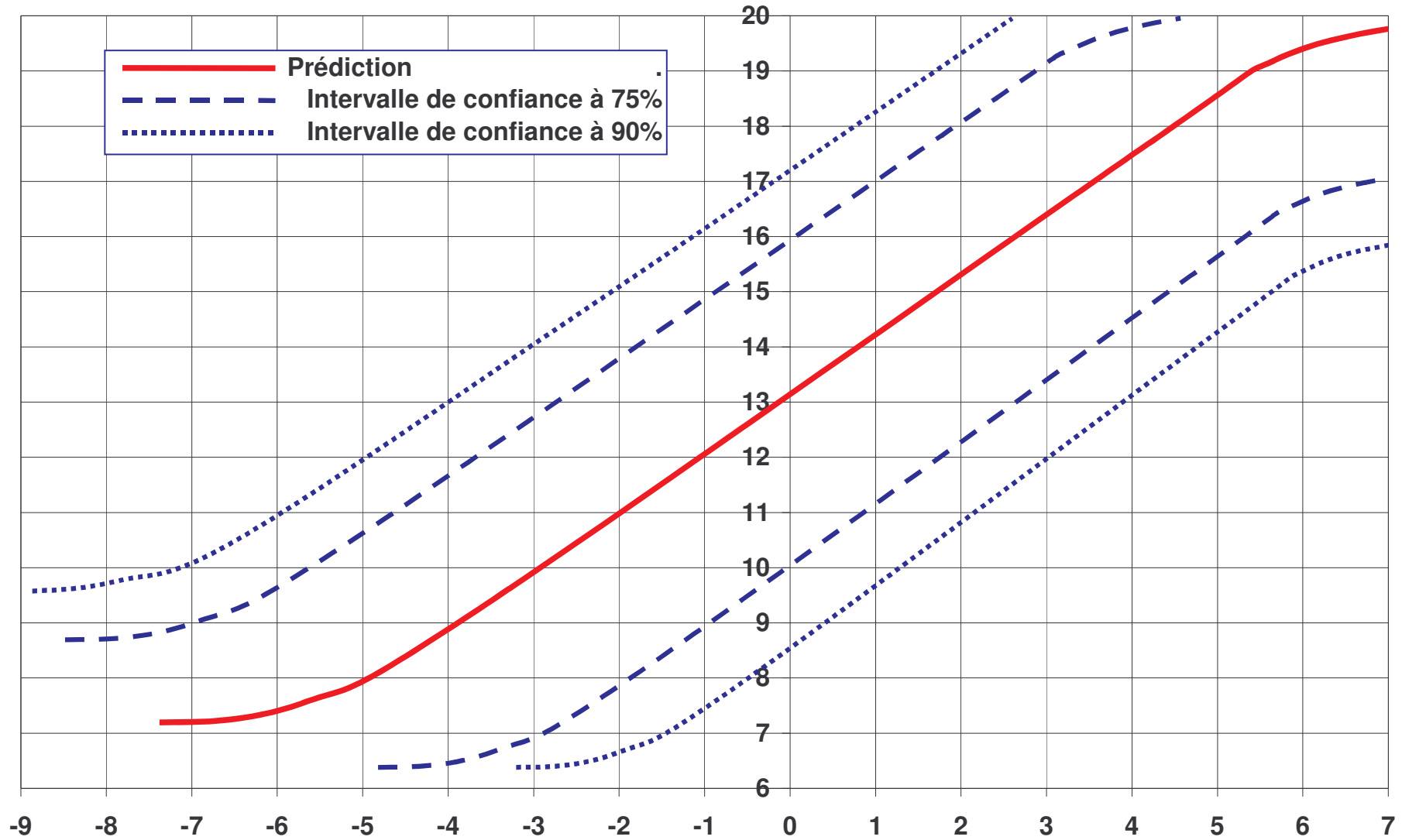
| |
|----------------------|
| Total général |
| |

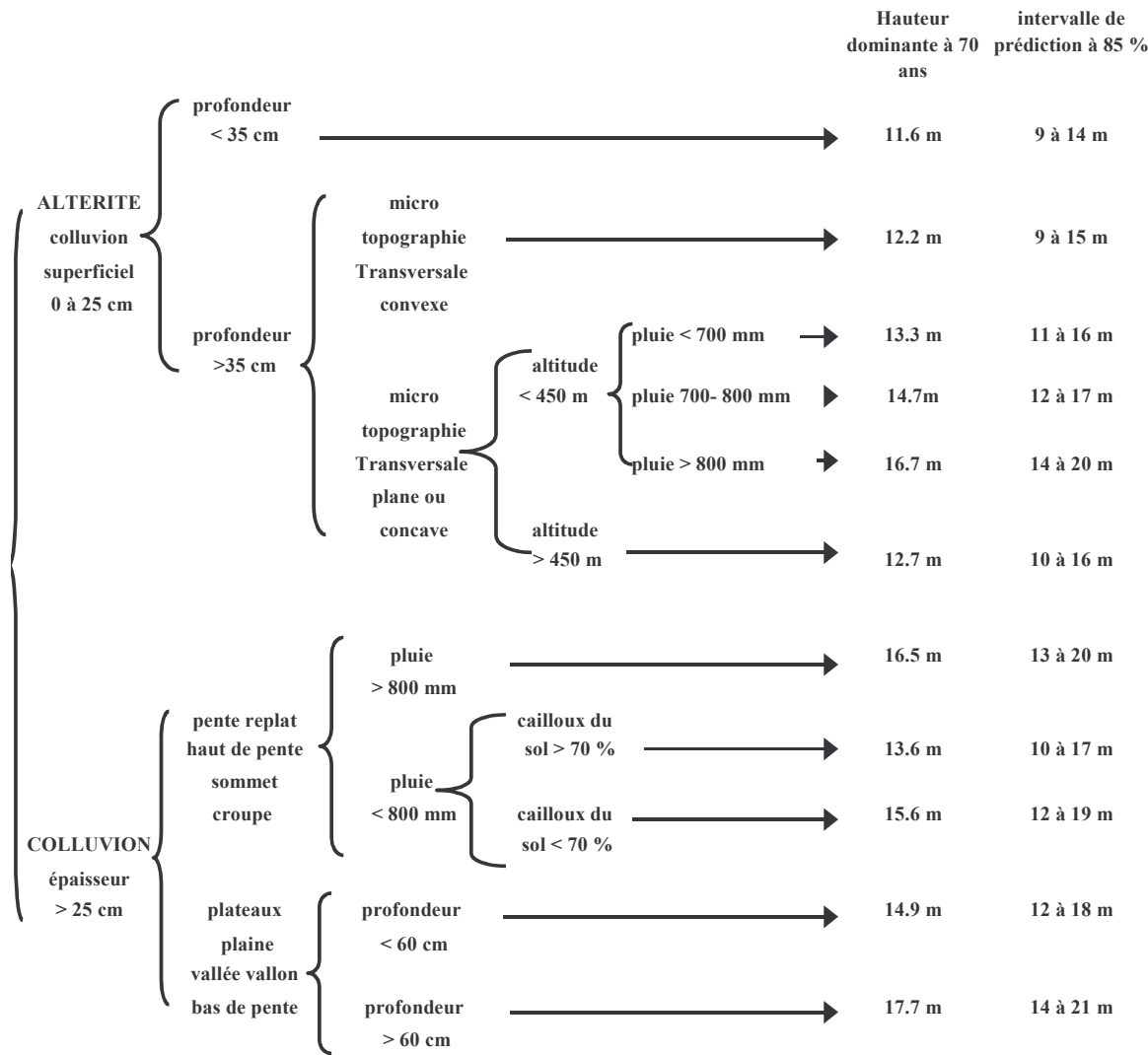
(*1) Le pendage stationnel est à prendre en compte seulement si on est en présence d'une alternance de couches de natures différentes, d'une épaisseur d'ordre métrique ou inférieure permettant aux arbres de pénétrer entre les couches défavorables de marnes ou argilites.

(*2) Au delà de 80 cm de colluvion, surtout si la colluvion n'est pas de même nature que la roche mère, on considère que l'on ne se situe pas sur marne ou argilites. Dans ce cas, revenir à la clef générale.

| | | | | | |
|--|---------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| Fiabilité de la clef marnes et argilites | résidu | <1.5m | <2.5m | >4m | >5m |
| | % | 55% | 70% | 15% | 7% |

Abaque de prédiction de l'indice de fertilité à partir de la clef autécologique
Clef spécifique pour marne et argilites





| Facteurs de compensation secondaire | | | |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|
| | modalités défavorables | modalités très favorables | |
| climat | - | ← | ++ |
| | -- | ← très défavorable | → défavorable |
| pluie d'été | - | < 85 mm | > 100 |
| pluie moyenne annuelle | - | < 700 mm | > 800 |
| altitude | - | > 450 m | 200 à 300 m |
| | -- | > 600 m | |
| relief | | | |
| Topographie générale | - | pente et replat | vallon, vallée |
| | -- | sommet croupe | bas de pente |
| | -- | haut de pente | |
| micro-topographie | - | transversale convexe | transversale concave |
| terrasse | | | présence |
| surface du sol | | | |
| affleurement rocheux | - | > 10% | |
| | -- | > 30% | |
| affleurement de cailloux | - | > 30% | < 10% |
| Roche | | | |
| pendage stationnel | - | parrallèle et conforme | rentrant et oblique |
| fracturation de la roche | | | |
| débit de l'altérite | - | Graviers cailloux | toutes dimensions |
| | -- | plaquettes | pierres blocs |
| Sol | | | |
| texture | - | S et Sl (<100) | S L A (>196) |
| | -- | Sa Sla SL (100-140) | Al et AL (180-196) |
| profondeur totale | - | 35 à 75 | > 180 |
| | -- | < 35 cm | 90 à 180 |
| % d'éléments grossiers | - | 60 à 95 % | 1 à 20 % |
| | -- | > 95 % | 20 à 40 % |
| Total - | | Total + | |

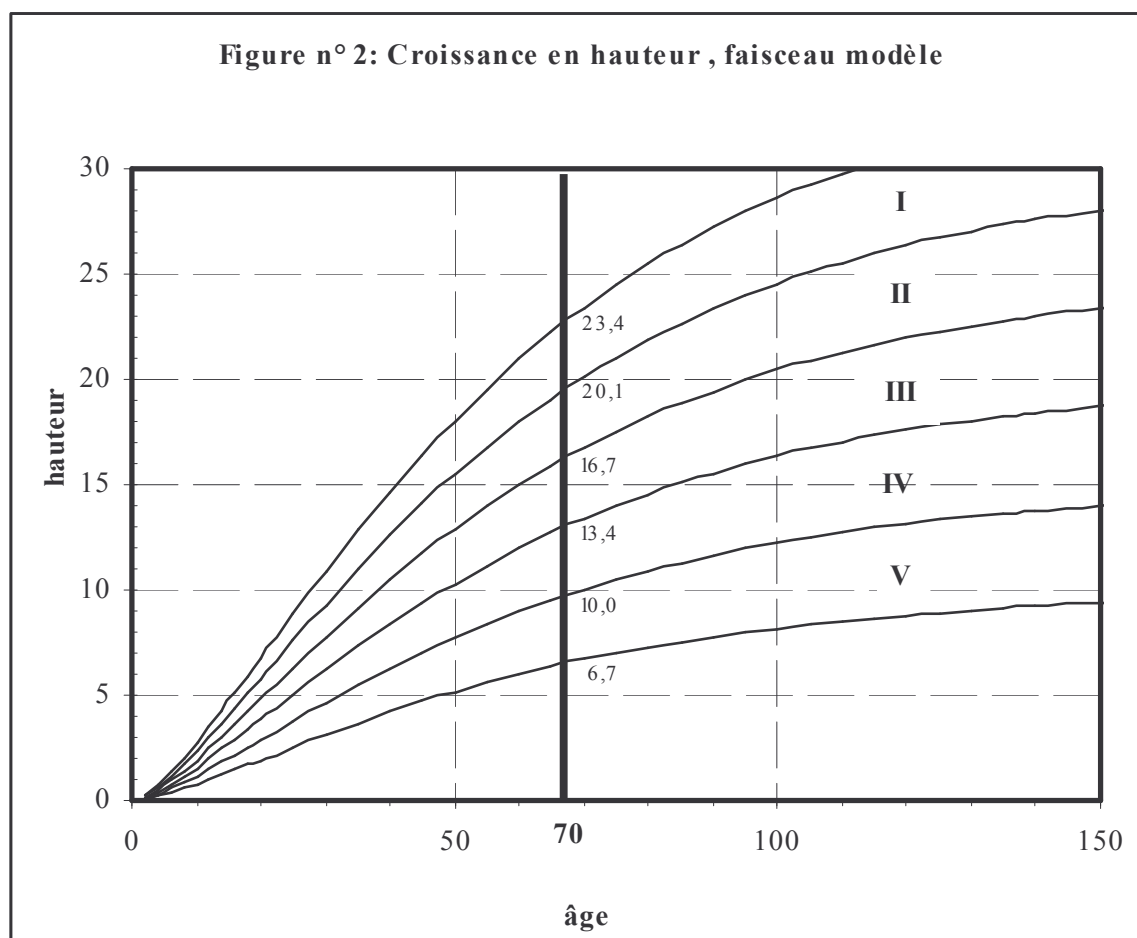
correction de la moyenne :



mode d'emploi: cheminer dans l'arborescence en fonction des modalités des facteurs du milieu observés sur le terrain jusqu'à atteindre le bout d'une branche. On obtient ainsi une évaluation de hauteur à 70 ans et un intervalle de confiance. Pour se situer plus précisément dans l'intervalle, faire le décompte des modalités de facteurs favorables et défavorables : suivant la balance obtenue on se situera au dessus ou au dessous du H70 moyen tout en restant dans l'intervalle donné (X =intervalle de prédiction).

| | | | | | |
|-------------------|------------|----------------|-----------------|------------|----------------|
| balance <-2 à -4> | H = H70moy | -(1 / 6 de X) | balance <2 à 4> | H = H70moy | +(1 / 6 de X) |
| balance <-5 à -7> | H = H70moy | -(2 / 6 de X) | balance <5 à 7> | H= H70moy | +(2 / 6 de X) |
| balance <= -8 | H = H70moy | -(3 / 6 de X) | balance >= 8 | H = H70moy | +(3 / 6 de X) |

3.6 Limites des classes de fertilité



Les classes de fertilité extrêmes (I et V) sont peu représentées dans la nature. Elles sont difficiles à prédire par les modèles, car elles résultent de la conjonction de facteurs naturels rarement réunis et de l'interaction entre ces facteurs qui est impossible à modéliser systématiquement. Elles doivent sans doute aussi à des facteurs génétiques qui sont pour l'instant inconnus.

Les peuplements notés en classe 5 résultent aussi fréquemment de facteurs humains (exploitation sélective, tassement du sol par des activités humaines), d'accidents qui ont fait souffrir des peuplements déjà en difficulté (bris de neige ou de tempêtes, incendies) ou de conditions locales particulières (embruns salés, exposition à des vents violents).

Les peuplements notés en classe 1 sont souvent mal prédits par les clefs qui les sous-estiment. L'impossibilité d'accéder au sol profond en est sans doute une des causes :

- les milieux karstiques peuvent ménager des larges poches d'altérites et des fissures comblées de matériau fin à grande profondeur.
- d'autre part, un banc de roche peu fissuré près de la surface peut cacher lors de la réalisation de la fosse pédologique des bancs plus profonds qui sont plus favorables aux racines.
- enfin, il n'est pas toujours possible de remarquer en surface des niveaux de circulation de nappes qui alimentent les arbres en profondeur dans des milieux paraissant arides en surface.

L'enjeu d'une prédiction précise est de toute façon faible dans ces classes : en dessous de 10m, il n'y a plus d'enjeux de gestion. Au-delà de 18 m, le gestionnaire ne prend aucun risque à sur- ou sous-évaluer de quelques mètres.

4 GLOSSAIRE ET MODE D'EMPLOI

Présentation des facteurs du milieu nécessaire à l'usage des modèles autécologiques de prédiction de la fertilité du Pin d'Alep en région méditerranéenne française
Conseil pour l'observateur

4.1 Opérations préparatoires a une évaluation de la fertilité

Les variables utilisées dans les modèles ne sont pas toujours très faciles à observer et à mesurer sur le terrain (pendage et diaclase pour la roche par exemple).

L'acquisition préalable de connaissances sur la zone à évaluer, grâce à la documentation existante (cartes physiques, géologiques, carte de végétation et autres études préexistantes sur la zone ou éventuellement sur une zone voisine présentant le même contexte géologique et paysager) associée à une ou deux prospections bien orientées sur le terrain permettront de délimiter des unités paysagères ou géomorphologiques présentant un ensemble de caractéristiques physiques homogènes, qui pourront souvent apporter des réponses ou des éléments de réponses à certaines questions posées par le modèle (nature de la roche, pendage, épaisseur des bancs, type d'altération, propension intrinsèque de la roche à la fissuration ou la fracturation etc. ...).

L'objectif est d'avoir une compréhension globale du fonctionnement du système écologique de la zone, sachant qu'en région méditerranéenne le bilan hydrique est le critère essentiel pour l'évaluation de la fertilité forestière.

Cette pré-étude permettra :

- de bien situer et de mieux répartir les sondages (plan d'échantillonnage).
(Le plan d'échantillonnage étant fonction du découpage en unités paysagères, de la surface de chacune des unités, et des éventuels gradients de variations écologiques résiduels au sein de chacune d'elles).
- de réaliser enfin les relevés de terrain avec un capital d'information que les observations de terrain serviront bien souvent à vérifier ou préciser.

L'essentiel étant de réaliser les test de fertilité en sachant à peu près ce qu'on doit trouver.

Bases de l'évaluation

Le climat et le substrat sont les éléments de base pour apprécier la fertilité d'une station. Le premier donne les quantités brutes d'eau et d'énergie disponibles, le second constitue l'élément récepteur qui va les recueillir et les mettre à la disposition de la végétation.

Ce système est très influencé par le relief environnant : altitude, exposition et position topographique.

L'observation des facteurs descriptifs du milieu est lié à ces relations

4.2 Facteurs climatiques

La pluie moyenne annuelle et la pluie d'été

En l'absence de carte climatique suffisamment détaillée, l'évaluation de la pluviométrie sur une parcelle forestière consiste à rechercher la ou les stations météorologiques les plus proches et de faire une extrapolation tenant compte de la différence d'altitude, du relief, des changements de végétation (bien que ceux-ci soient également liés à la température), éventuellement en se renseignant auprès de sources locales. La pluie d'été est la somme des pluies moyennes des mois de juin, juillet et août.

La température

L'extrapolation se fait de la même manière, mais elle est plus facile car à l'échelle où on la fait, la seule variation significative est souvent le gradient thermique lié à l'altitude, 0.6°C par 100 m. A proximité de la côte, il faut cependant tenir compte de l'influence maritime qui tempère le climat, et de l'effet de barrage des premiers reliefs littoraux vis à vis de ces influences, qui peut être important.

L'observation supplémentaire de l'exposition des sites (phénomènes d'adret et d'ubac) permet d'affiner la première approximation et d'ajouter ou soustraire quelques dixièmes de degré et parfois jusqu'à 1 degré.

4.3 Facteurs topographiques

La topographie générale indique sur quel type de forme du relief on se trouve. Cette détermination s'entend dans une approche géomorphologique de formation des reliefs et de répartition des matériaux.

Crête, sommet, croupe sont des positions topographiques émergentes, convexes, toujours propices à l'érosion, au départ des matériaux et à l'écoulement de l'eau, généralement dans plusieurs directions à la fois. Les substrats types correspondent à des altérites superficielles, caillouteuses ou rocheuses. Crête et sommet sont par ailleurs très exposés aux vents et à l'ensoleillement.

La croupe correspond à une arête de forme bombée à convexité marquée, en général dans une pente à la jonction de deux parties de versants d'exposition différente. Il peut aussi s'agir de la partie saillante entre deux ravines proche sur un versant.

Le haut de pente, situé tout en haut du versant, est également une zone de départ de matériau et de transit hydrique déficitaire mais il n'y a qu'une seule direction globale d'écoulement. Le haut de pente classique est en général associé à une topographie stationnelle longitudinale convexe. Le substrat type correspondant est une altérite.

En bordure de plateau, sous corniche ou falaise, le haut de pente est en général longitudinalement plan. Et le substrat type correspondant peut être à un éboulis superficiel.

La micro-topographie transversale des hauts de pente peut être plane, concave ou convexe.

La pente est la situation qui caractérise 90% d'un versant entre le haut et le bas de pente ; c'est une zone de transition où théoriquement flux entrants et sortants de matériau et d'eau se compensent. Elle correspond donc à des situations relativement équilibrées. En fait elle présente une grande variété de situations due à l'action de facteurs secondaires (exposition, pente, micro-topographie, pendage etc. ...); on peut donc y rencontrer une grande diversité de matériaux et de classes de fertilité.

Le bas de pente, situé tout en bas du versant, est le symétrique du haut de pente mais en positif. Une micro-topographie concave y est systématiquement associée et correspond à une zone d'accumulation des eaux et des matériaux d'origine allochtone. L'épaisseur de ceux-ci y est souvent importante et constitue une situation édaphique favorable mais bien souvent de faible surface.

Il peut exister des situations en bas de versant qui, n'étant pas concave, ne seront pas à considérer comme des bas de pente mais des pentes.

Le vallon est le symétrique du sommet en positif, tant en terme géomorphologique que climatique. C'est en effet une situation propice à l'accumulation de l'eau et des matériaux provenant de plusieurs directions (l'axe du vallon et ses flancs); c'est aussi une situation abritée du vent et de l'ensoleillement.

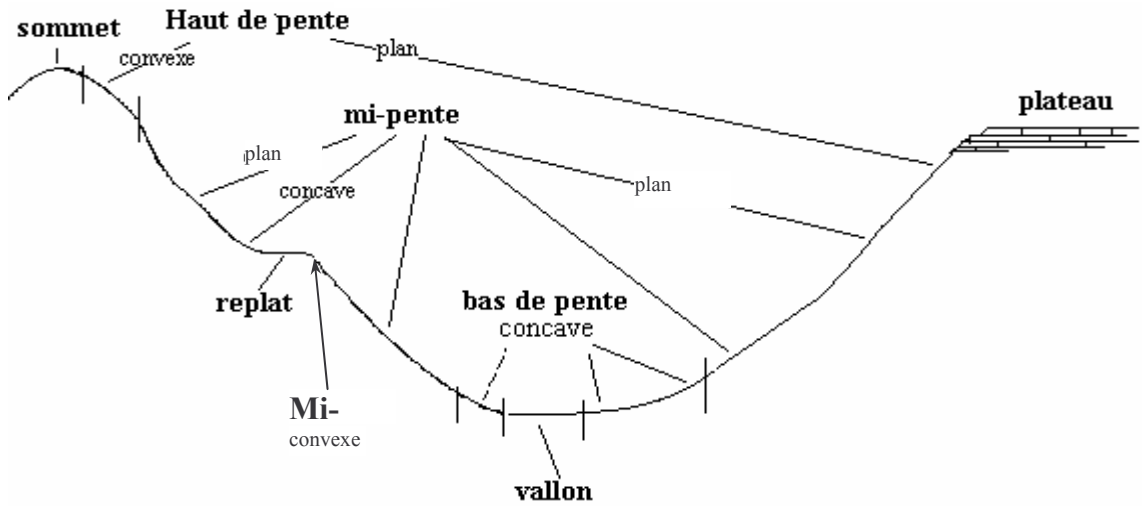
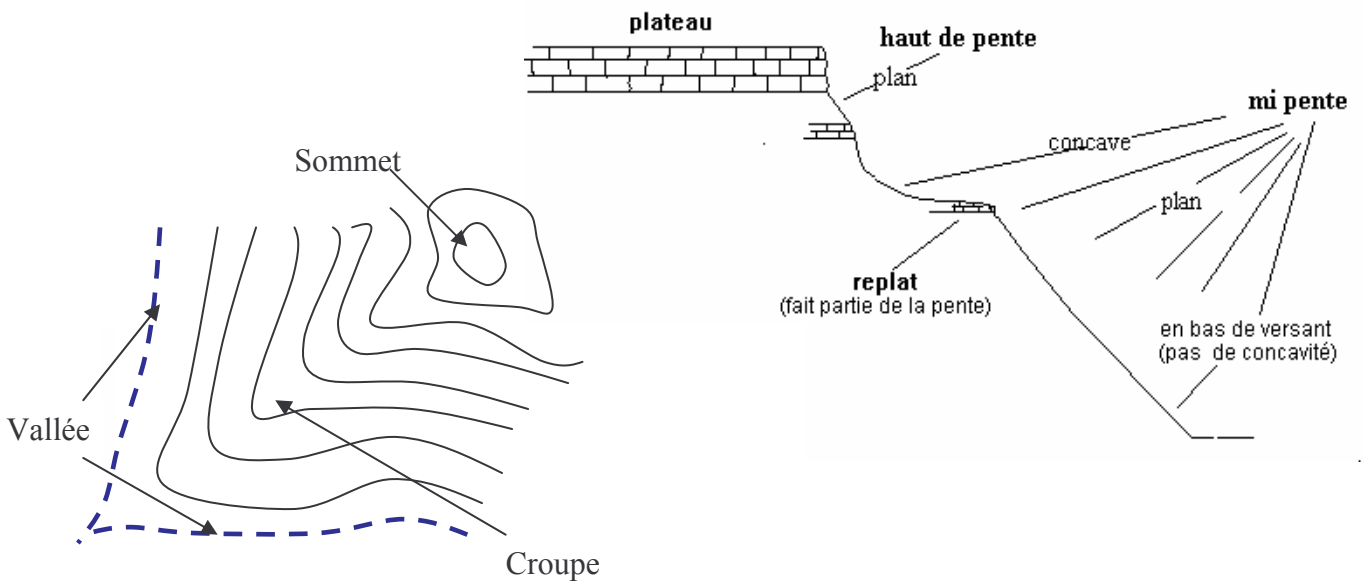
Le phénomène d'encaissement plus ou moins prononcé peut en outre induire un effet de confinement qui piège la fraîcheur ; ce phénomène est toutefois variable suivant l'orientation du vallon vis à vis de la direction du vent dominant et de l'ensoleillement. En plus de ses effets thermiques favorables, un confinement important est favorable à la croissance en hauteur des arbres, agissant comme la concurrence d'autres arbres vis à vis de la lumière.

La vallée et la plaine sont également des zones d'accumulation des eaux et des matériaux, mais sans effet d'exposition. La vallée se distingue en général par des matériaux allochtones récents, épais et fertiles et la circulation de nappes phréatiques peu profondes. Vallées et vallons sont en moyenne les milieux de loin les plus favorables à la croissance des arbres.

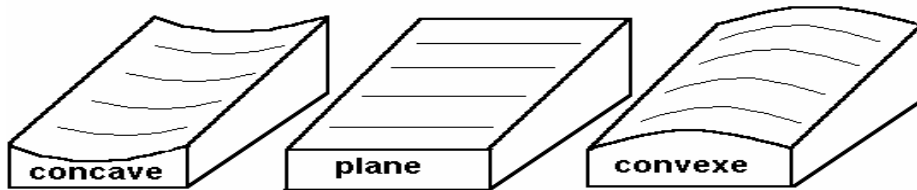
Le plateau est une zone plate ou faiblement pentue à l'échelle kilométrique comme la plaine mais surélevée. On y trouve des matériaux assez divers qui dépendent souvent de la genèse du plateau (arasement , basculement, exhaussement, dépôts etc. ...)

La topographie stationnelle ou micro-topographie apporte une précision à l'échelle de la station (échelle décamétrique) ou de la parcelle en précisant si la forme du terrain est concave (sous-entendue susceptible d'accumuler eau et matériau) convexe (situation inverse) ou plane (situation neutre). C'est la topographie transversale de la station (concavité ou convexité dans le sens perpendiculaire à la pente) qui a le plus d'importance en général pour la fertilité d'une station. La forme longitudinale du micro-relief (concavité ou convexité dans le sens de la pente) a moins d'importance dans les situations de versant (pente) et prend de l'importance surtout en bas et en haut de versant, où la topographie générale porte déjà l'information.

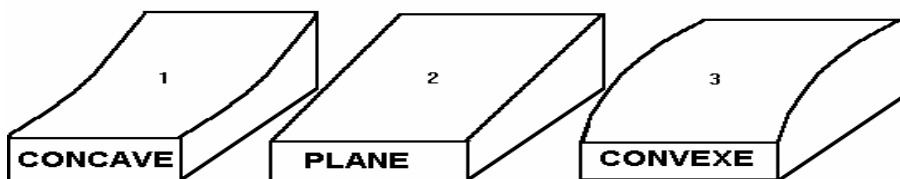
TOPOGRAPHIE GENERALE



TOPOGRAPHIE STATIONNELLE TRANSVERSALLE



TOPOGRAPHIE STATIONNELLE LONGITUDINALE



4.4 La roche

Affleurements rocheux : il s'agit de la roche mère qui affleure à la surface du sol. On les distingue des affleurements de cailloux car ils sont inébranlables lorsqu'on tente de les sortir avec le pied ou la pioche, sauf si la roche est en partie altérée. Dans ce cas, on les reconnaît aussi car ils se présentent souvent alignés suivant l'orientation des couches géologiques et le pendage (c'est un critère de reconnaissance). Une attention particulière doit être portée dans les situations possibles d'éboulis pour ne pas confondre les affleurements de bancs de roche mère et l'affleurement de gros blocs de roche allochtones.

La proportion croissante d'affleurements rocheux laisse supposer un sol d'autant plus superficiel.

L'appréciation du pourcentage d'affleurement est toujours délicate car on a tendance à le surévaluer :

- < à 10 % correspond aux affleurements rares et diffus que l'on peut facilement ne pas voir.
- 10 à 30 % correspond à des affleurements évidents mais dont le recouvrement reste toujours assez faible.
- > à 30 % correspond à des affleurements très évidents et abondants.

Les affleurements rocheux concernent les roches dures comme les roches fluides : pour une marne affleurante non altérée on pourra facilement noter > 30% .

Affleurements de cailloux : ils ne font pas partie de la roche mais leur observation se fait en même temps que celle des affleurements rocheux avec lesquels il ne faut pas les confondre.

Il s'agit des éléments grossiers à partir de 2 mm (taille du gravier) déposés à la surface du sol sous la litière et entre les affleurements rocheux s'il y en a. Leur abondance indique souvent des phénomènes d'érosion superficielle plus ou moins ancienne et donc une diminution de la profondeur du sol, mais parfois inversement d'apport de matériaux par éboulis. Ils témoignent aussi en partie de la proportion d'éléments grossiers dans le sol.

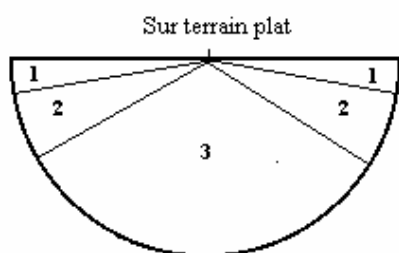
Pour évaluer le pourcentage de recouvrement des cailloux il faut dégager la litière lorsqu'elle existe sur des carrés de 50 cm de côté au minimum et évaluer à l'œil ce paramètre :

- 0 : pas de cailloux du tout,
- 1 à 10 % : recouvrement rare et diffus,
- 10 à 30% : recouvrement évident mais toujours assez faible,
- > à 30 % : recouvrement abondant à très abondant.

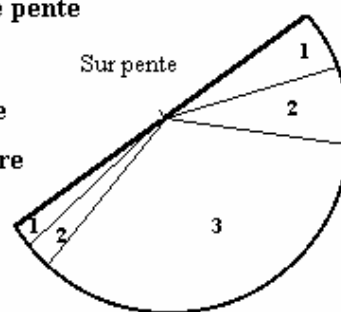
L'observation est à faire en au moins à 5 endroits de la placette, davantage suivant l'importance de la surface et la variabilité observée aux alentours.

Le pendage concerne les roches en bancs durs plus ou moins épais et compacts qui constituent des plans de glissement. L'inclinaison de ces bancs par rapport au plan topographique peut être plus ou moins sécante et favorable à la pénétration en profondeur de l'eau et des racines, ou inversement parallèle à ce plan et donc défavorable.

Pendage par rapport au plan de plus grande pente



- 1= zone de pendage défavorable
- 2= zone de pendage intermédiaire
- 3= zone de pendage favorable



Les diaclases : au cours des temps géologiques les accidents tectoniques (plissements, basculements etc. ...) ont engendré, sur les roches dures, des cassures perpendiculaires au sens des couches. Ces

diaclasses favorisent la circulation de l'eau et la pénétration des racines en profondeur notamment lorsque le pendage est défavorable.

Le paramétrage du pendage et des diaclasses :

| concerne les roches dures | ne concerne pas les roches fluides |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> . tous les calcaires (dur, marneux, dolomitique, crayeux, pseudobrèchique, siliceux etc. ...) . les alternances équilibrées (calc. dur / marne, grès / marne ...) . grès, molasse, calcarénite, brèche, poudingue, . les roches métamorphiques, ayant souvent une structure litée. | <ul style="list-style-type: none"> . marnes, argilites, sables, alluvions lorsque les couches de ces roches sont très épaisses . les alternance roche fluide / roche dure lorsque la roche fluide est dominante. |

Pour les roches fluides de type marnes et argilites qui sont meubles mais massives (absence de banc) et dont la compacité constitue très souvent un véritable obstacle à la pénétration des racines en profondeur, on considère que le pendage est défavorable et qu'il n'y a pas de diaclasses. D'ailleurs très souvent la tarière hélicoïdale ne pénètre pas très profondément dans ces roches à cause de la compacité. On code donc pendage défavorable et sans diaclasses.

Les sables plus ou moins meubles constituent un cas particulier très difficile à évaluer, et heureusement rare hors littoral.

Comment observer le pendage et les diaclasses

Sur la station même :

- au fond d'une fosse pédologique : ce n'est pas toujours suffisant, voir totalement impossible, notamment en sol profond (c'est moins important aussi dans ce cas là),
- en surface : les affleurements rocheux peuvent renseigner sur le pendage quelquefois sur les diaclasses ; c'est assez facile en condition de sols superficiels.

Dans l'environnement immédiat :

- observations de la surface et des talus des pistes, des fossés et autres accidents de terrain laissant voir un front de roche ; à condition toutefois qu'on puisse rapprocher cette observation de la station à caractériser,
- en procédant à une petite pré-étude comme indiqué au début de la présente note.

4.5 Le matériau

La roche en place est en général recouverte de matériaux qui proviennent soit de l'altération de la roche elle-même (altérite) soit d'éléments déplacés (colluvions, éboulis, alluvions) qui viennent la recouvrir, elle ou l'altérite qu'elle a générée et qui est restée en place.

Les altérites (matériaux autochtones) sont issus de l'altération de la roche en place soit par des actions physiques soit par des actions chimiques ou biochimiques qui attaquent la cohésion de la roche et la déstructure. Une altérite possède donc un lien parental très fort avec la roche mère dont elle est issue.

L'action physique ou mécanique d'altération suit le processus classique suivant :

Sur les roches proches de la surface qui présentent soit des défauts de structure ou une microfissuration initiale (calcaires durs, calcaire marneux, gneiss, micaschistes), ou qui sont poreuses (calcaire gréseux, calcarénite) les phénomènes d'alternances gel/dégel favorisent la fragmentation de la roche qui se délite en éléments de forme et de taille diverses suivant leur nature. Cette première agression de la roche permet la fixation de plantes pionnières dont les racines, pénétrant dans les fissures élargies, continuent le travail d'éclatement de la roche.

Les éléments grossiers (blocs, pierres, cailloux, graviers) issus de cette fragmentation sont de même nature que la roche mère, ils présentent des arêtes vives et sont en place mais disjoints. Ils conservent l'orientation des couches constitutives de la roche mère (pendage), mais ils sont disloqués comme les éléments d'un puzzle aux jointures plus ou moins lâches. La texture de la terre interstitielle dépend directement de la nature de la roche mère (sableuse pour les grès et les dolomies, limoneuse pour les marnes et les calcaires marneux, argileuse ou argilo-limoneuse pour le calcaire dur, etc.).

Sur roches meubles (marnes, argilites) ce sont plutôt les cycles alternatifs humectation / dessiccation qui altèrent la roche et génèrent une pellicule de desquamation (petites plaquettes limoneuses carbonatées) constituant un matériau peu cohérent, soumis au ravinement.

L'action chimique ou biochimique agit par hydrolyse du carbonate de calcium sur calcaire ou des minéraux ferro-magnésiens sur roches cristallophylliennes. La dissolution est due à l'eau chargée de CO₂ et à l'action des acides rejetés par les racines et la matière organique. Elle est maximale sous climat pluvieux (actuel ou ancien) et affecte plutôt les roches recouvertes de matériaux et de végétation. Elle génère des matériaux fins et, sur zone karstique, décarbonatés (argile de décarbonatation, arène).

Les calcaires durs et les dolomies altérés de cette façon prennent un aspect de rognons, souvent perforé, quelquefois sculptés ou cariés. Cette altération se prolonge en profondeur le long de fissures élargies ; l'altération lisse les parois des diaclases qui se remplissent des résidus constitués de terre fine argileuse ou argilo-limoneuse. Ce matériau d'altération est parfois complètement décarbonaté et sans élément grossier (cas des lapiaz).

Les amphibolites (roche métamorphique sombre très dure) fondent sur place sur une grande épaisseur.

Les granites s'altèrent en boule et génèrent une arène sableuse.

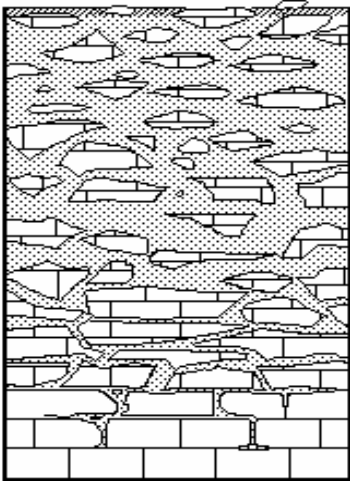
Très souvent les altérites sont issues d'actions successives ou conjointes mécaniques et chimiques ; les caractères de reconnaissance dans ces cas-là sont mixtes et peuvent être plus difficiles à mettre en évidence.

Les altérites peuvent être plus ou moins superficielles. La présence d'affleurements rocheux en est un bon indicateur ; cette présence n'est toutefois pas exclusive. Elles peuvent, inversement, être recouvertes d'autres matériaux, plus ou moins épais, d'origine allochtone (colluvions, éboulis, alluvions, etc. ...) qui présentent, en général, des caractéristiques différentes et dont il faut pouvoir les distinguer.

Voir ci-contre les cas-types d'altération que l'on peut rencontrer, sur calcaire dur, marneux, dolomitique.

Certaines roches n'entrent pas dans ce schéma : les grès, molasses, certaines calcarénites fines, la dolomie, le granit, dont l'altération génère une arène sableuse et des éléments grossiers (blocs) en forme de boule.

→ des altérites issues de la fracturation de la roche mère :



Les éléments grossiers (blocs et cailloux) ont des arêtes vives et sont disposés suivant le pendage de la roche.

Le processus d'altération est dû, entre autre, à l'alternance gel-dégel et à la pénétration des racines dans les interstices de la roche.

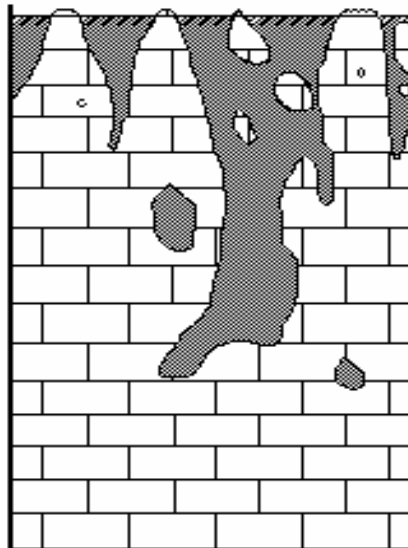
Ces éléments sont en place mais disjoints, car l'altération a rempli les interstices d'un matériau plus ou moins épais qui sépare les éléments les uns des autres.

→ des altérites issues de la dissolution de la roche mère :

C'est l'action combinée de l'eau et du CO_2 qui dissout le calcaire.

Dans le cas des lapiaz, l'altération est ancienne et a été surtout chimique.

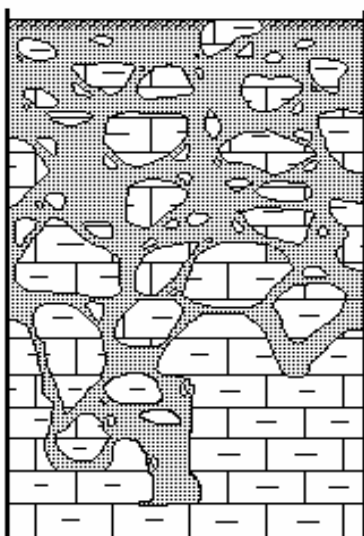
Le calcaire s'altère le long des fissures et se fragmente sous forme de rognons plus ou moins arrondis et perforés. Les cavités se remplissent de terra rossa décarbonatée et sans élément grossier.



→ des altérites issues des deux types d'altération combinées :

Les éléments grossiers sont disposés de la même façon que sur un substrat issu de fracturation, mais les arêtes sont émoussées et leurs surfaces sont altérées chimiquement.

Ce cas de figure se rencontre fréquemment sur calcaires marneux et argileux, ainsi que sur les roches dolomitiques et gréseuses.



Les matériaux déplacés et superposés

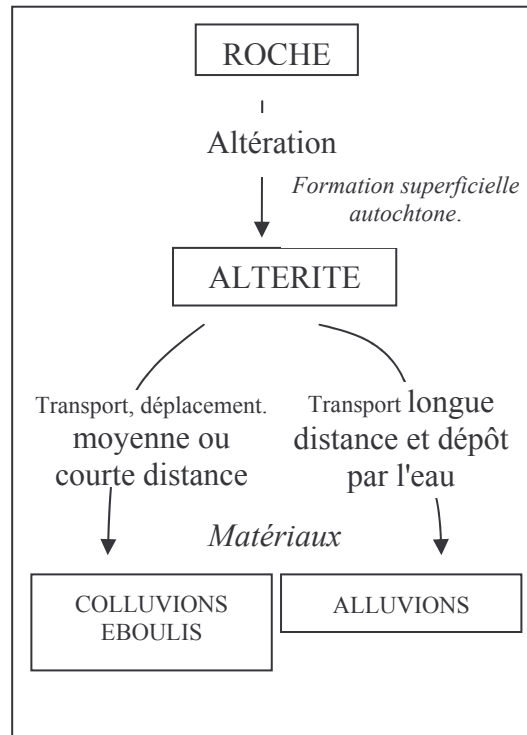
colluvion, éboulis, alluvions (matériaux allochtones)

Les matériaux générés par l'altération d'une roche en situation de pente restent rarement en place et ont tendance à glisser vers l'aval par effet de la pesanteur, de l'entraînement par l'eau, ou de phénomènes de solifluxion. L'altérite en déplacement se déstructure, se mélange éventuellement à d'autres matériaux et recouvre plus bas les matériaux restés en place. La colluvion ainsi créée améliore normalement les potentialités du substrat, d'une part parce qu'elle augmente l'épaisseur du sol en venant recouvrir une altérite ou une fraction d'altérite restée en place, ensuite parce qu'elle-même présente bien souvent de meilleures caractéristiques physiques qu'une altérite, notamment une compacité moindre. La colluvion est souvent moins caillouteuse, mais il y a des exceptions.

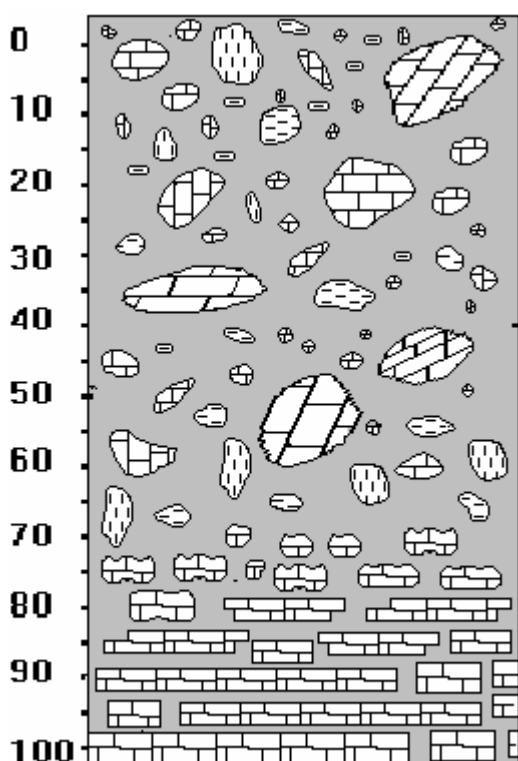
Il y a évidemment une grande diversité des matériaux déplacés suivant leur origine, leur âge et leur composition (colluvion classique, grès, éboulis etc.). L'identification et la description du matériau sont donc très importantes car tous ne présentent pas les mêmes caractéristiques ni les mêmes propriétés en fonction de leur origine et des éléments qui les constituent.

Il faut également inclure dans ce type de matériau les alluvions qui proviennent d'un transport de matériaux, par les rivières ou les fleuves, sur de longues distances.

Elles se rencontrent dans des situations topographiques différentes (plaine, vallée) mais se décrivent de manière similaire.



Des alluvions anciennes peuvent avoir par compaction et induration perdu leurs qualités d'origine et se comporter comme une roche mère en place, sur laquelle un nouveau sol se développe.



Une colluvion se reconnaît par un mélange de terre et d'éléments grossiers de dimensions variées disposés dans tous les sens (bien que l'on puisse quelquefois distinguer des lits). Ces éléments grossiers ont leurs arêtes émoussées par le transport qu'ils ont subi et ont souvent une forme plus ou moins arrondie.

La présence de cailloux de natures différentes constitue un des moyens les plus sûrs de reconnaître une colluvion, *a fortiori* s'ils sont différents de la roche mère sous-jacente.

Les éléments grossiers d'une colluvion sont en général sains et durs alors que ceux d'une altérite peuvent être plus ou moins altérés et friables.

4.6 Le sol

4.6.1 Les éléments grossiers

Il s'agit d'évaluer la proportion de graviers (>2mm), de cailloux, de pierres et de blocs dans la matrice du matériau de référence. Comme pour les affleurements l'évaluation n'est pas très facile. Voici quelques moyens plus ou moins empiriques qu'on peut évidemment combiner :

- 1- c'est d'abord en creusant le trou que l'on se rend compte de la charge en cailloux, notamment pour les gros éléments qu'on est obligé de sortir un par un.
- 2- l'appréciation de la charge sur le profil de sol (après l'avoir nettoyé au pinceau pour faire ressortir les éléments grossiers) s'appuie sur quelques critères visuels exposés ci-dessous :

| | | | |
|---------|--|----------|--|
| < 20 % | On voit surtout de la terre, les éléments grossiers sont rares | 60 –80 % | On voit surtout des éléments grossiers, mais la proportion de terre est encore appréciable |
| 20-40 % | On voit encore beaucoup de terre | 80-95% | La proportion de terre est faible |
| 40-60% | On a du mal à trancher | > 90 % | On ne voit presque que les éléments grossiers |

- 3- on peut prendre un certain volume de matériau brut et trier la terre d'un côté les éléments grossiers de l'autre et apprécier à l'œil la proportion. Solution bien adaptée lorsque les éléments grossiers sont de petites dimensions (gravier, cailloux).

Texture : il s'agit ici :

- 1 – d'apprécier la composant texturale (proportion de sable, de limon et d'argile) qu'il faut pouvoir identifier au toucher.
- 2 – de lui attribuer ensuite une réserve utile théorique qui s'exprime en mm d'eau par cm d'épaisseur.

Caractéristiques permettant de reconnaître les trois composants texturaux :

| Sable (< 2mm) | limon | argile |
|---|---|--|
| Fraction la plus grossière | Fraction intermédiaire | Fraction la plus fine |
| Grains détectables entre les doigts à l'état sec, humide et mouillé (et même à l'œil nu pour le sable grossier). - Plus il est fin, moins il est détectable mais à sec il crisse toujours à l'oreille. | - à sec soyeux et poussiéreux, dessèche et tache les doigts. - humidifié il est doux peu collant quelquefois presque savonneux. Ne résiste pas à la pression, difficile à modeler (boudin impossible roulant une boulette dans la paume de la main) | - à sec forme des blocs très durs, elle est difficile à humidifier. - à peine humidifiée, elle est dure à malaxer. -Très humidifiée elle est plastique et très collante. – humidité intermédiaire on peu faire un boudin qui peut sans casser se plier en anneau. |

La difficulté réside dans les échantillons de terre qui sont des mélanges des trois granulométries.

sable + limon : l'échantillon a une certaine cohésion quand le limon est dominant même si le boudin est impossible à faire quand le sable est dominant la cohésion est très faible.

sable + argile : le caractère collant et plastique apparaît de suite.

argile + limon : échantillon doux comme le limon mais moins souple et légèrement collant, on peu faire un boudin mais il casse plus ou moins rapidement suivant la proportion d'argile quand on fait un anneau.

sable + limon + argile : lorsque les trois sont équilibrés il est difficile de distinguer les caractères particuliers des trois composants. Lorsque l'un d'entre eux est dominant ses caractéristiques ressortent rapidement.

4.6.2 Détermination d'une composition texturale simplifiée

La composition texturale des échantillons de terre fine s'effectue de manière simplifiée et adaptée aux possibilités d'analyse purement tactiles que l'on peut effectuer sur le terrain :

- si l'élément n'est pas détecté
on estime qu'il est absent → on note 0
- si l'élément est seulement détecté
on estime qu'il est présent → on note 1
- si l'élément semble abondant par rapport
aux autres
on estime qu'il est dominant → on note 2

On procède successivement de cette manière pour le sable, le limon et l'argile.

Cette appréciation est évidemment subjective puisqu'elle est faite au toucher et que celui-ci varie d'un individu à l'autre.

Il est donc nécessaire d'abord d'étalonner son propre toucher, ensuite de le comparer avec les autres acteurs.

Afin d'avoir des observations homogènes il est toutefois fortement recommandé d'effectuer l'évaluation de la texture par le même individu au cours d'une étude même s'il le fait contrôler par un autre.

Réserve utile texturale

Selon cette méthode on obtient pour un échantillon de terre une formule à 3 chiffres correspondant à une composition texturale simplifiée qui permet grâce au tableau ci-contre de situer le niveau de la réserve utile théorique de la terre fine qui s'exprime en mm d'eau par m d'épaisseur de terre.

Clef de lecture des textures et correspondance entre texture et réserve utile

| composition texturale | | | codage de la composition texturale | | | réserve utile en mm/m | composition texturale favorable et défavorable |
|-----------------------|-------|--------|------------------------------------|---|---|-----------------------|--|
| sable | limon | argile | S | L | A | | |
| | | 0 | | | | | |
| | | 1 | | | | | |
| | | 2 | | | | | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 175 | 0 |
| | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 185 | + |
| | 2 | 2 | 0 | 1 | 2 | 180 | + |
| | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 150 | 0 |
| | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 195 | ++ |
| | 2 | 2 | 0 | 2 | 2 | 185 | + |

| sable | limon | argile | S | L | A | réserve utile (mm/m) | composition |
|-------|-------|--------|---|---|---|----------------------|-------------|
| | | 0 | | | | | |
| | | 1 | | | | | |
| | | 2 | | | | | |
| | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 155 | 0 |
| | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 170 | 0 |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 130 | - |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 200 | ++ |
| | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 175 | 0 |
| | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 145 | - |
| | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 182 | + |
| | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 178 | 0 |

| sable | limon | argile | S | L | A | réserve utile (mm/m) | composition |
|-------|-------|--------|---|---|---|----------------------|-------------|
| | | 0 | | | | | |
| | | 1 | | | | | |
| | | 2 | | | | | |
| | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 70 | -- |
| | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 135 | - |
| | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 | 155 | 0 |
| | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 100 | - |
| | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 150 | 0 |
| | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 160 | 0 |
| | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 | 130 | - |
| | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 160 | 0 |
| | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 200 | ++ |

Les signes - et + indiquent les textures défavorables ou favorables pour le pin d'Alep. 0 indique une texture neutre

Calcul de la réserve utile texturale moyenne du sol

On observe généralement plusieurs horizons et souvent plusieurs matériaux superposés dans un sol : il peut s'agir de différents niveaux d'altération de la roche mère, ou de matériaux allochtones recouvrant une altérite, mais aussi parfois plusieurs matériaux allochtones superposés.

La réserve texturale du sol s'obtient en calculant la moyenne de ses horizons pondérée par la profondeur et le pourcentage d'éléments grossiers de chacun d'eux.

La moyenne pondérée s'écrit :

$$RU_{\text{sol}} = \frac{(RU_1 * P_1 * (100 - EG\%_1) + RU_2 * P_2 * (100 - EG\%_2) + \dots)}{P_1 * (100 - EG\%_1) + P_2 * (100 - EG\%_2) + \dots}$$

avec

RU_n = Réserve utile texturale de l'horizon n

P_n = profondeur de l'horizon n

$EG\%_n$ = % d'éléments grossiers dans l'horizon n

La proportion de terre fine de chaque horizon est ainsi respectée dans le calcul.

On peut en général se contenter de 2 horizons.

Réserve utile des éléments grossiers

Certains éléments grossiers, notamment sur les roches calcaires altérées, ont une capacité d'absorber de l'eau dans la masse, dans des pores ou dans les micro-fissures. Bien que peu abondante, cette réserve d'eau a l'avantage d'être relâchée lentement dans le sol lorsque celui-ci a atteint un fort degré de sécheresse. Dans les sols très caillouteux, elle peut être aussi importante que la réserve de la terre fine. Elle explique certaines différences de fertilité entre des sols qui paraissent semblables. Nous ne l'avons pas intégrée dans les clefs, car son calcul est délicat.

4.6.3 Profondeur du sol

La profondeur totale du sol est un des facteurs clefs de la fertilité.

L'appréciation de la profondeur nécessite le plus souvent l'ouverture d'une fosse pédologique. L'idéal est d'atteindre la roche mère non altérée, afin de bien voir l'épaisseur de l'éventuelle colluvion puis celle de l'altérite, la somme des deux donnant la profondeur totale.

On peut parfois l'éviter lorsque des talus d'une hauteur suffisante sont disponibles le long de routes, pistes ou fossés. On doit cependant dans ce cas s'assurer par une étude de la structure géomorphologique locale des limites spatiales de validité des observations ainsi effectuées, notamment :

- dans une pente lorsque le talus peut représenter une situation particulière par rapport au haut ou au bas de pente,
- lorsque le pendage des roches n'est pas parallèle à la pente, et que différentes roches ou des bancs rocheux de même nature mais de caractéristiques variables peuvent se juxtaposer dans un espace réduit.

L'observation du sol sur la plus grande profondeur possible est de toute façon nécessaire pour déterminer :

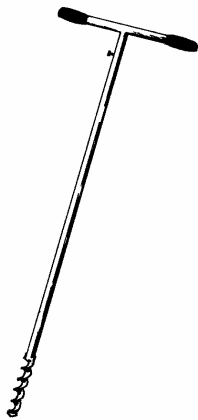
- d'une part le type de matériau superficiel (altérite, colluvion, éboulis, ...)
- d'autre part la charge en éléments grossiers et la texture de la terre fine.

Considérant par ailleurs qu'une colluvion devient significative à partir de 30 cm d'épaisseur, il faut au minimum faire un trou légèrement supérieur à cette profondeur dans les sols colluviaux.

Utilisation de tarières

Tarière hélicoïdale

Le test tarière mesure la moyenne et la valeur maximale des profondeurs d'enfoncement d'une tarière hélicoïdale de 4 cm de diamètre en divers points du terrain. Ce test, qui ne signifie rien en soi, s'est révélé souvent très bien corrélé avec la fertilité des stations forestières. Il semble synthétiser en fait la pierrosité, la profondeur et la compacité du sol.



Ce test peut donner une idée de l'épaisseur d'un matériau lorsqu'elle pénètre très profondément. Inversement une forte compacité ou une forte charge en cailloux limitera ou arrêtera la pénétration de la tarière mais le sol peut être beaucoup plus profond que le test.

Les mesures de ce test ne permettent donc pas de se passer de la fosse. Mais elles permettent de vérifier rapidement sur l'ensemble d'une parcelle la variabilité des matériaux et de certaines observations faites localement sur un talus ou dans une fosse pédologique. Elles présentent un intérêt particulier quand on soupçonne, dans une unité paysagère bien définie, la présence d'un gradient de profondeur ou de pierrosité.

On peut effectuer le long d'un transect une série de tests permettant de vérifier ce gradient et de fixer les limites de zones à étudier séparément.

L'enfoncement profond de la tarière en certains points alors que la fosse révèle un banc de roche proche de la surface et que la moyenne des tests est faible, signifiera la présence de poches d'altération ou de larges fissures, qui peuvent compenser ou atténuer la présence de ce banc rocheux. Une étude détaillée et un nombre important de tests tarière peuvent être alors utiles pour évaluer correctement le milieu.

La valeur du test tarière est fortement liée à l'humidité du sol, particulièrement en sol peu pierreux. Dans des marnes humidifiées par exemple, la tarière peu s'enfoncer d'un mètre alors qu'on se trouve sur un *bad-land*. A l'inverse, une colluvion marneuse fertile ou une altérite très argileuse peuvent se révéler presque impénétrables à sec. Dans un milieu donné, les tests doivent être réalisés dans des conditions d'humidité du sol comparables, et si possible hors sécheresse.

On pratique au moins 5 tests à l'échelle d'une station : un à proximité de la fosse pédologique et quatre autres à 5 ou 10 m du trou dans quatre directions différentes.

Pour évaluer la profondeur d'un matériau très profond où la fosse ne permet pas d'atteindre la roche mère, on peut enfoncer la tarière dans le fond de la fosse pédologique.

Le test tarière fait donc partie des méthodes incontournables d'appréciation de la qualité d'une station mais il faut être conscient de ses limites.

Tarière pédologique

L'utilisation d'une tarière pédologique permettant de retirer des carottes de sol à différentes profondeurs complète les moyens d'évaluation du sol. Mais elle n'est possible qu'en sol peu caillouteux en raison du fort diamètre de cette tarière.

Elle permet notamment de repérer les ruptures texturales.

4.7 *Liste du matériel nécessaire pour mesurer les facteurs topographiques et édaphiques*

Pour la Topographie :

Topographie générale : elle s'apprécie sur le terrain mais il est bon de consulter aussi une carte physique (IGN au 1/25 000^{ème} par exemple) pour replacer la station dans son contexte.

Topographie stationnelle : appréciation sur le terrain

Pente : il faut un **clisimètre**

Pour l'observation du sol :

Une pioche : un petit pic Piémontais suffit généralement pour le creusement de la fosse pédologique. Dans des sols très meubles et profonds, une bêche peut être plus adaptée.

Une pelle américaine : pour vider la fosse, il existe un modèle pliable.

Une tarière hélicoïdale : diamètre de la vis 4 cm pour le test tarière et des mesures de contrôle.

Une tarière pédologique : pour le recueil d'échantillons profonds et ou des mesures de contrôle.

De l'acide chlorhydrique dilué à 10%, pour tester la teneur de la terre fine ou des roches en calcaire actif. L'acide du commerce est souvent dilué à 33 % ; il faut y rajouter 23cl soit ¼ de litre d'eau distillée par litre de solution.

Un tamis à maille 2 mm : une passoire de cuisine de 10 ou 15 cm de diamètre, à maille métallique, fera l'affaire, pour tamiser la terre fine, afin d'évaluer sa texture et son pH (test à l'acide).

Un petit récipient concave (genre petit mortier) solide pour écraser la terre fine, la mouiller et la malaxer.

Un couteau : type Opinel n° 10 avec virole de sécurité, pour tester la compacité du sol.

Un pinceau : assez gros et grossier pour nettoyer le profil avant d'observer la charge en cailloux.

Un mètre : pour la mesure de profondeurs des horizons et des tests tarière.

De l'eau distillée : pour mouiller la terre fine lors de la détermination de la texture.

5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Abbas H., Barbéro M., Loisel R., Quézel P., Les forêts de pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français analyses écodendrométriques, première partie Forêt Méditerranéenne VII, 1 (1985) 35-42.
- [2] Abbas H., Barbéro M., Loisel R., Quézel P., Les forêts de pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français analyses écodendrométriques, deuxième partie, Forêt Méditerranéenne VII, 2 (1985) 123-130.
- [3] Acherar M., Lepart J., Debussche M., La colonisation des friches par le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Miller) en Languedoc méditerranéen. Oecol. Plant. 5, 19 (1984) 179-189.
- [4] Bailey R.L., Clutter J.L., Base-Age Invariant Polymorphic Site Curves, Forest Sci. 20 (1974) 155-159.
- [5] Bard Y., Non linear parameter estimation, Academic press, New York, 1974.
- [6] Barbéro M., Quézel P., La déprise rurale et ses effets sur les superficies forestières dans la région Provence Alpes Côte d'Azur, Bull. Soc. Linn. Provence 41 (1990) 77-87.
- [7] Brochiero F., Écologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire, Mémoire de fin d'étude CEMAGREF Aix en Provence, ENGREF, 1997.
- [8] Brochiero F., Chandioix O., Ripert C., Vennetier M., Autécologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire, Forêt Méditerranéenne XX, 2 (1999) 83-94.
- [9] Couhert B., Duplat P., Le pin d'Alep dans la région Provence Alpes Côte d'Azur proposition pour une sylviculture et un modèle de production, Bulletin Technique de l'ONF 25, 1993.
- [10] Darracq S., Godron M., Romane F., Typologie forestière de la région des Garrigues du Gard, GREF, Nancy, 1984.
- [11] Debouche C., Application de la régression non linéaire à l'étude et à la comparaison de courbes de croissance longitudinale, faculté des sciences agronomiques, Gembloux, 1977.
- [12] Douheret J., Pin d'Alep Comment choisir une sylviculture ?, Forêt Méditerranéenne XIII, 3 (1992) 216-219.
- [13] Duplat P., Indice de fertilité basé sur un modèle de croissance en hauteur, in : Buffet M., Girault D. (éd.), Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques, CEMAGREF, Nogent-sur-Vernisson, 1989, pp. 51-71.
- [14] Duplat P., Tran-Ha M., Modèles de croissance en hauteur dominante pour le hêtre, le sapin pectiné et le pin sylvestre (dans le massif de l'Aigoual), Office national des forêts, Paris, 1986.
- [15] Duplat P., Tran-Ha M., Modélisation de la croissance en hauteur dominante du chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl) en France. Variabilité inter - régionale et effet de la période récente (1959 - 1993), Ann. Sci. For. 54 (1997) 611-634.
- [16] Neveux M., Duhén L.M., Corti J.M., Devallois P., Fontanel J.L., Boiseau P., Plaidoyer pour une sylviculture du Pin d'Alep par les techniciens de terrain, Forêt Méditerranéenne VIII 1 (1986) 13-18.
- [17] ONF, CRPF PACA, Sylviculture du pin blanc, Forêt Méditerranéenne, XIII, 3 (1992) 204-206.
- [18] ONF, CRPF PACA, Le pin blanc : une espèce provençale en plein essor, XIII, 3 (1992) 207-215.
- [19] Pardé J., La productivité des forêts de pin d'Alep en France, Annales de l'école nationale des eaux et forêts, XV, 2 (1957) 365-414.
- [20] Pauwels D., Thibaut A., Lejeune P., Rondeux J., Élaboration de courbes de croissance en hauteur dominante pour les mélèzes (*Larix decidua* Mill. et *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) en Belgique méridionale, Ann. For. Sci. 56 (1999) 27-34.

- [21] Quézel P., Barbéro M., Le pin d'Alep et les espèces voisines : répartition et caractères écologiques généraux, sa dynamique récente en France méditerranéenne, *forêt méditerranéenne* XIII, 3 (1992) 158-170.
- [22] Ripert C., Nouals D., Proposition de découpage inter-régional en secteurs écologiques homogènes dans la zone méditerranéenne française, CEMAGREF, Aix-en-Provence, 1998.
- [23] Richards F.J., A flexible growth function for empirical use, *J Exp Bot* 10 (1959) 290-300.
- [24] Vennetier M., Ripert C., Brochiero F., Chandieux O., Evolution à court et long terme de la croissance du pin d'Alep en Provence, conséquence sur la production de bois, *Forêt Méditerranéenne* XX, 4 (1999) 147-156.