

Systemes géopédologiques et production forestière sur substratum carbonaté et gréseux en zone méditerranéenne

L'exemple des chênes vert et pubescent dans les garrigues du Gard

T. Curt, Christine Marsteau

Cemagref - Division Forêt et agroforesterie - 24, Avenue des Landais - BP 50085 - 63172 Aubière Cedex 1

RÉSUMÉ

L'étude a pour objectif de mettre en évidence les relations existant entre des variables géopédologiques et la production de taillis de chênes vert et pubescent dans les garrigues du Gard, sur substratum carbonaté et gréseux. 120 placettes ont été étudiées. Pour chaque placette, on a effectué des relevés de variables de milieu (exposition, pente...), dendrométriques (hauteur dominante des peuplements) et géopédologiques (caractéristiques physiques et chimiques de la roche, de l'altérite et du sol). Des analyses multivariées (AFC et CAH) sur les variables géopédologiques ont permis de mettre en évidence 7 unités géopédologiques distinctes. Ces groupes se distinguent essentiellement par leurs faciès lithologiques (type de roche, épaisseur et pendage des bancs rocheux, degré de fracturation), et par les caractéristiques du matériau parental et du sol au sens strict (texture, charge en éléments grossiers, présence de calcaire actif). Pour le chêne pubescent, le type d'unité géopédologique permet d'expliquer 42,5 % de la variance de la production des peuplements (évaluée par leur hauteur dominante à l'âge de référence de 47 ans, ou H47). Les résultats sont comparables pour le chêne vert (variance expliquée : 41,1 %). Les tests statistiques confirment l'existence d'une forte liaison entre unités géopédologiques et hauteur dominante des chênes. Les productions les plus fortes sont observées sur grès et calcaires gréseux, avec des sols décarbonatés, généralement profonds, meubles et peu pierreux. Les plus faibles sont liées à la présence de calcaires durs et peu fracturés, de matériaux parentaux et de sols pierreux et fortement carbonatés dès la surface. Ces travaux confirment l'importance, sur des sols généralement superficiels, de la prise en compte des caractéristiques physiques et chimiques du substratum géologique pour prévoir la production forestière.

Mots clés

Unités géopédologiques - Production forestière - Garrigues du Gard - Chêne vert (*Quercus ilex* L.) - Chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.)

SUMMARY

GEOPEDOLOGICAL SYSTEMS AND FOREST YIELD IN MEDITERRANEAN AREAS ON LIMESTONES AND SANDSTONES

The example of Oaks on karstic plateaus (Gard, France)

These works aims at providing methods for estimating the yield of Downy Oak (*Quercus pubescens* Willd.) and Holm Oak (*Quercus*

ilex L. on karstic limestone and sandstone plateaus in the south-eastern part of France (garrigues du Gard). 120 forest sample plots have been studied. On each stand, three surveys were made : i) a dendrometrical survey, in order to determine the Site Index (height of dominant trees of the stand projected to the standard age, 45 years), ii) an ecological survey : aspect, slope, and so on, iii) a geopedological survey : physical and chemical properties of rock, parent material and soil. The methodology consists in building geopedological units by using multivariate methods, including correspondence analysis (DCA) followed by hierarchical clustering (HCA). These analysis resulted in the determination of 7 geopedological groups according to rocks (type of rock, rock fracturation and structure...), parent materials (nature, % of carbonates, texture, stoniness...) and surface horizons (texture, stoniness, structure...). These groups have been compared with forest yield (Site Index). Geopedological units explain 42,5 % of site Index variations for Downy Oak and 41,1 % for Holm oak. The two species have a comparable autoecology : the highest Site index can be observed on decarbonated soils and materials, developed on sandstone and calcareous sandstone (H47 = 13,1 to 14,5 m for Downy Oak and 9 to 9,8 m for Holm Oak). Their parent material are loose and favourable to root development, and they have a low active lime %. Conversely, calcareous soils developed on compact limestones are unfavourable to forest. The lowest Site Index (H47 = 5,2 m for Holm Oak and 5,8 m for Downy Oak) is observed on massive limestones and compact carbonated clay. This parent material is a gravelly clay with cryoclastic stones, whose depth is very discontinuous. The surface horizons are very stony (50 to 90 % volume). Soils on massive chalky limestone (urgonian facies) are very unfavourable, too. Root development is difficult because of stoniness and cemented calcareous horizons. Moreover, these soils are characterized by a high active lime % which limits height growth for Oaks. Medium Site Index (H47 = 12,4 to 10,5 m for Downy Oak, 8,7 to 8,5 m for Holm oak) are related to fractured limestones with decarbonated clay, and neutral or acid soils. Fracturation of rocks allows a correct root development and a good yield, as compared with massive rocks.

Key-words

Geopedological units - Forest Yield - Garrigues du Gard - Karstic plateaus - Holm Oak (*Quercus ilex* L.) - Downy Oak (*Quercus pubescens* Willd.)

RESUMEN

SISTEMAS GEOPEDOLÓGICOS Y PRODUCCIÓN FORESTAL SOBRE SUBSTRATO CARBONATADO Y ARENISCOSO EN ZONA MEDITERRÁNEA

El ejemplo de las encinas carrascas y pubescentes en los chaparrales del Gard

El estudio tiene como objetivo de poner en evidencia las relaciones existentes entre dos variables geopedológicas y la producción de tallares de encinas carrascas y pubescentes en los chaparrales del Gard, sobre substrato carbonatado y areniscoso. 120 parcelas fueron estudiadas. Para cada una, se efectuó relevados de variables del medio (exposición, pendiente), dendrométricos (altura dominante de las poblaciones) y geopedológicos (características físicas y químicas de la roca, de la alterita y del suelo). Análisis multivariados (AFC y CAH) sobre las variables geopedológicas han permitido poner en evidencia 7 unidades geopedológicas distintas. Estos grupos se distinguen esencialmente por sus facies litológicas (tipo de roca, espesor y inclinación de los bancos rocosos, grado de fracturación) y por las características del material padre y del suelo (sensu stricto: textura, carga en elementos gruesos, presencia de calcario activo). Para la encina pubescente, el tipo de unidad geopedológico permite explicar 42.5% de la variación de la producción de las poblaciones (evaluada por su altura dominante a la edad de referencia de 47 años, o H47). Los resultados son comparables para la encina carrasca (variación explicada: 41.1%). Los resultados estadísticos confirman la existencia de una fuerte relación entre unidades geopedológicas y altura dominante de las encinas. Las producciones las más importantes son observadas sobre arenisca y caliza areniscosa, con suelos decarbonatados, generalmente profundos, muebles y poco pedregosos. Las más pequeñas están ligadas a la presencia de calizas duras y poco fracturadas, de materiales generalmente superficiales y fuertemente carbonatados desde la superficie. Estos trabajos confirman la importancia, sobre suelos superficiales, de tomar en cuenta las características físicas y químicas del substrato geológico para prever la producción forestal.

Palabras claves

Unidades geopedológicas, producción forestal, chaparrales del Gard, encina carrasca (*Quercus ilex* L.) encina pubescente (*Quercus pubescens* Willd.)

Le sol exerce une influence importante sur la productivité des forêts en assurant trois fonctions essentielles pour la croissance des arbres : leur stabilité physique via le système racinaire, la fourniture d'éléments nutritifs et d'une partie importante de l'eau consommée par le peuplement. Ceci explique que différents travaux ont porté sur les relations entre les types de sols et la production forestière (Le Tacon, 1973 ; Becker et al., 1980 ; Pritchett et Fisher, 1987). La prise en compte des types génétiques de sols permet ainsi de décrire une part importante des variations de production observées sur des résineux en milieu granitique, métamorphique ou volcanique dans le Massif Central (Curt et al., 1996 a et b). Sur substratum carbonaté en milieu méditerranéen, les types génétiques de sols ne discriminent généralement qu'une faible part des variations de production des forêts (Vernet, 1995). Ceci peut s'expliquer par deux raisons :

- l'essentiel des sols de la région d'étude (les garrigues du Gard) appartient à la famille des sols bruns calcaires et calciques au sens de la typologie C.P.C.S. (1967). En moyenne montagne calcaire, Barthès et Bornand (1986) ont montré que la typologie génétique des sols tend à uniformiser le diagnostic pédologique. Elle est en effet basée sur les caractéristiques des couches supérieures du sol et ne prend pas en compte les caractéristiques et les structures des couches profondes dans lesquelles pénètre le système racinaire des arbres. La typologie des solums carbonatés proposée par le Référentiel pédologique français (AFES, 1992) prend en compte des variables supplémentaires comme l'abondance du calcaire et la lithologie de la roche sous-jacente, mais elle reste difficile à manier pour le gestionnaire de terrain car elle nécessite des analyses physico-chimiques en laboratoire ;

- les sols développés sur ces substratums carbonatés karstifiés sont fréquemment tronqués par l'érosion et remaniés par l'activité anthropique, ce qui rend difficile une interprétation génétique du sol (Vergès, 1982). La couverture pédologique est très discontinue et les affleurements rocheux sont fréquents ; les sols sont généralement peu épais et caillouteux (Barthès et Bornand, 1986), avec de faibles réserves en eau (Curt et al., 1996 a) et la présence de calcaire actif. Ces contraintes édaphiques conditionnent l'adaptation des essences forestières mais ne sont pas prises en compte dans les cartes de sols existantes.

Dans ce contexte édaphique contraignant, la démarche utilisée par différents chercheurs pour étudier l'adaptation et la productivité des essences forestières aux types de sols est de type analytique. Elle consiste à relier la production des peuplements forestiers à des variables édaphiques prises isolément : pourcentage d'affleurement rocheux, pierrosité du sol, texture, pourcentage de terre fine, etc. (Bonfils, 1977 ; Duclos, 1980 ; Boisseau, 1996). Ces méthodes permettent souvent d'expliquer une part importante de la production forestière (Ladier et

Boisseau, 1992), mais les résultats sont difficilement généralisables et ne donnent pas une estimation globale de la productivité des sols rencontrés. Il apparaît ainsi intéressant de proposer aux gestionnaires forestiers une démarche de description des sols qui soit simple et accessible sur le terrain. Celle-ci doit permettre :

- de caractériser l'ensemble du profil pédologique en prenant en compte les principales variables édaphiques susceptibles d'influer sur la production forestière comme la pierrosité ou le pendage de la roche ;

- de prendre en compte les caractéristiques de l'ensemble du substrat (roche, altérite ou formation superficielle, sol). Le substratum étant souvent proche de la surface, il influe fortement sur l'enracinement des arbres, sur la nutrition minérale et l'alimentation en eau (figure 1).

Plusieurs approches convergentes, développées en milieu calcaire, permettent de répondre à ces attentes. Callot (1978) puis Callot et al. (1982) proposent la notion de système géopédologique, élaborée et testée principalement en moyenne montagne calcaire sèche. Vergès (1982) a suivi une démarche similaire pour cartographier les sols du massif du Ventoux. Une approche comparable a été développée par Bruckert et Gaiffe (1991) en montagne humide, avec la notion de système de subsurface. Ces démarches ont en commun la distinction dans chaque profil de différents compartiments caractérisés par leur structure lithologique, leur fraction grossière et leur fonctionnement hydrique. Vergès (1982) en distingue quatre et Callot (1978) trois (figure 2) :

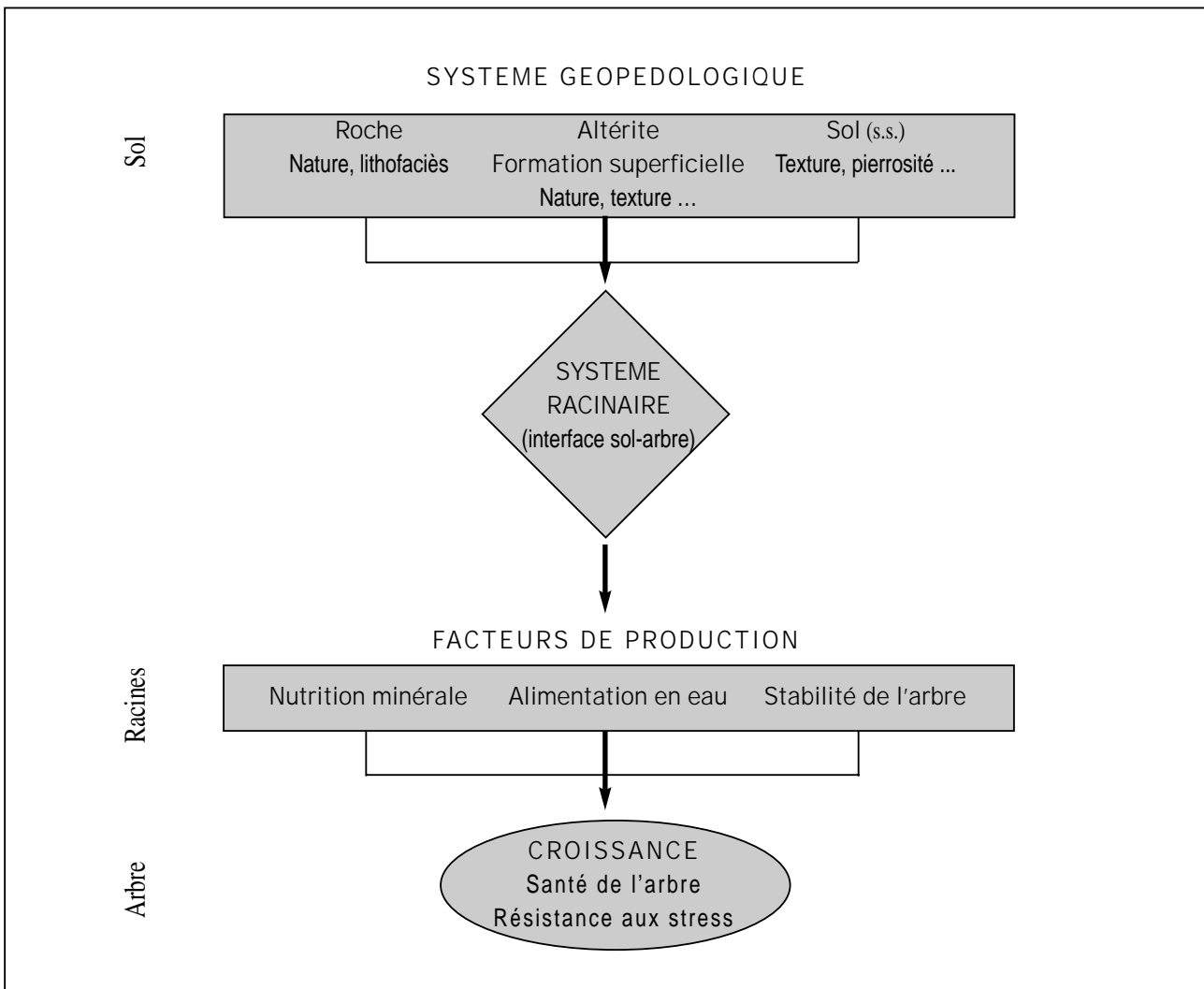
- la partie superficielle du profil, qui inclut les horizons organo-minéraux transformés par la pédogenèse ;

- l'altérite ou la formation superficielle : elle joue essentiellement un rôle dans l'alimentation en eau de l'arbre. Sa capacité de rétention en eau dépend de la structuration physique, de la texture de la matrice et de la quantité et la disposition des éléments grossiers (Lucot et Gaiffe, 1995) ;

- la partie profonde du profil incluant la roche plus ou moins altérée, fracturée et déplacée : elle correspond aux altérites et au substratum géologique proprement dit.

Ces compartiments, qui ne correspondent pas toujours à des horizons différenciés par leur pédogenèse, sont interconnectés par leur réseau poral (Bruckert et Gaiffe, 1991). L'ensemble des compartiments du sol constitue un système géopédologique (Callot et al., 1982) ou un « profil des ensembles structuraux » (P.E.S.) pour Vergès (1982). Ces méthodes ont été utilisées à des fins de description et de cartographie des sols ; l'objectif de cet article est de tester leur intérêt pour prévoir la croissance en hauteur des taillis de chêne vert et de chêne pubescent dans les garrigues du Gard sur substratum calcaire et gréseux.

Figure 1 - Systèmes géopédologiques et production forestière
 Figure 1 - Geopedological Systems and Forest Yield



MATÉRIELS ET MÉTHODES

Contexte écologique et pédologique

La zone d'étude est située dans la région des garrigues du Gard, entre le plateau des Gras ardéchois au nord, le Rhône à l'est, les Costières du Gard au sud et les Cévennes à l'ouest (figure 3). Elle est constituée de plateaux calcaires crétacés entaillés par des gorges et séparés par des dépressions remplies de matériaux gréseux. La surface du plateau principal, celui de Lussan, a été aplanie et tronquée, ce qui a dégagé par érosion différentielle des combes et des boutonnières marneuses dans le substratum géologique plissé, et a favorisé le développement d'un relief karstifié. A échelle moyenne, la zone

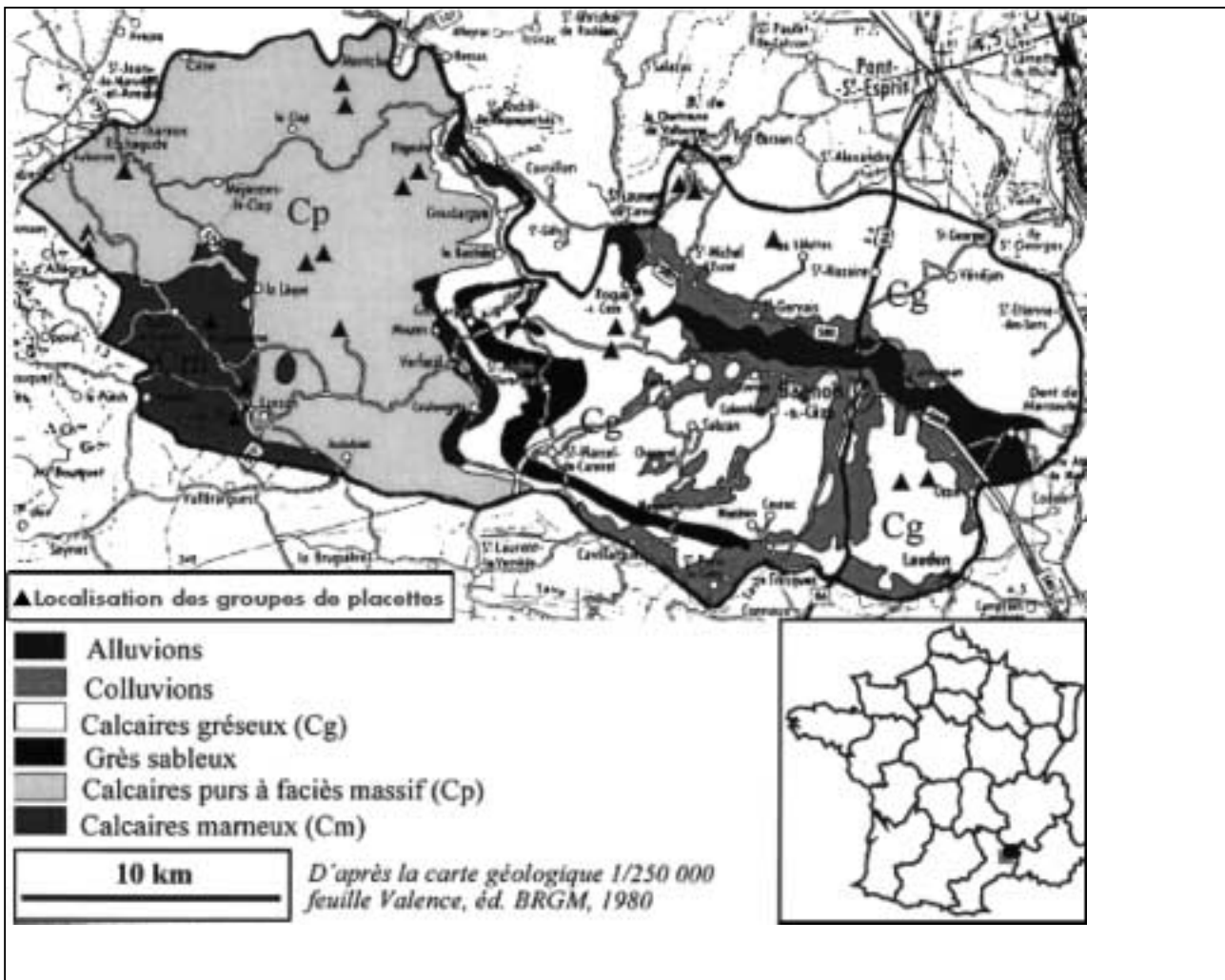
d'étude comprend des reliefs de plateaux dominés par des serres (Tharoux, Rivières et Rochegude), et entaillés par une dépression (Fons), bordés par la basse vallée de la Cèze et les coteaux de Valbonne. Les altitudes sont comprises entre 100 et 472 mètres.

Le bioclimat est de type humide à hiver froid. Il existe un gradient assez important sur la zone d'étude, entre les plateaux plus frais et relativement plus humides, et la basse vallée de la Cèze plus chaude et sèche. La pluviométrie varie entre 780 et 920 mm, et la température moyenne annuelle entre 12 et 14°C. Le déficit hydrique estival (méthode Turc) est compris entre 330 et 445 mm pour un sol présentant une réserve en eau de 60 mm.

Figure 2 - La notion de système géopédologique (d'après Callot et al., 1982, modifié) et de profil d'ensemble structural (d'après Vergès, 1982).
 Figure 2 - Geopedological Systems (After Callot et al., 1982, modified) and PES (After Vergès, 1982).

Ensembles structuraux (d'après Vergès, 1982)		Système géopédologique (d'après Callot et al., 1982, modifié)		
		Horizons	Fonctionnement hydrique	Rôle dans la croissance
IV	Ensemble meuble superficiel riche en éléments grossiers remaniés	Horizon de surface (organo-minéral)	Contrôle climatique (fortes variations de la teneur en eau)	Fourniture en eau et surtout en nutriments
III	Ensemble fragmenté (roche en place mais disjointe)	Horizon intermédiaire («racinaire») = structure-relai	Teneur en eau dépendante de la demande climatique et de la transpiration de l'arbre	Fourniture en nutriments et accessoirement en eau
II	Ensemble fissuré (roche en place et cohérente)	«Horizon» profond (matériau parental et roche)	Variations quasi-nulles sauf remontées capillaires et infiltrations	Alimentation en eau en période de sécheresse et de forte demande climatique
I	Roche peu ou pas fissurée			

Figure 3 - Situation de la zone d'étude et des placettes de relevé
 Figure 3 - Location of Study Area and Forest Stands



Le substratum géologique est constitué de calcaires purs, argileux ou gréseux, mais aussi de grès et de sables gréseux. Ces substrats sont variés au plan géochimique, mais aussi par leurs faciès qui vont des calcaires massifs à faciès urgonien aux sables meubles. Les matériaux parentaux sont constitués par des argiles de décarbonatation (terra rossa, argiles brun-jaunâtres), des dépôts gréziformes issus de gélifraction, des sables argileux développés sur calcaires gréseux et grès, et des dépôts éoliens quaternaires. Les sols prédominants sont de type brunifié plus ou moins carbonatés : CALCARISOLS, CALCO-SOLS, CALCISOLS (sols bruns calciques et calcaires, rendzines). On observe aussi des FERSIALSOLS (sols fersiallitiques) hérités de puissantes phases d'altération au Tertiaire, évoluant actuellement par brunification.

Evaluation de la production des taillis de chêne

Les massifs forestiers étudiés présentent de grandes surfaces de taillis de chênes dans des conditions édaphiques variées, ce qui permet une analyse détaillée des relations entre les variables géopédologiques et la production forestière. Ces taillis sont composés de chêne vert (*Quercus ilex* L.) et de chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.) associés à des essences secondaires comme l'arbousier, les alisiers, le sorbier domestique et l'érable de Montpellier. Les brins sont issus de rejets de souche dont l'âge est inconnu. Ces deux chênes sont autochtones dans la zone d'étude et leurs principaux caractères autécologiques sont connus (Ladier et Boisseau, 1992 ; Bonin et Romane, 1996) :

- le chêne vert est une essence xérophile largement présen-

te dans l'étage mésoméditerranéen (250 à 600 mètres d'altitude, pluviométrie minimale de 400 mm/an). Elle supporte les sols superficiels et pierreux mais avec une croissance très réduite. Elle est mal adaptée aux sols compacts et asphyxiants (sur marnes, sur argiles compactes) ou à la présence de roches affleurantes ou de faciès lithologiques massifs et compacts (calcaires massifs, brèches, poudingues). Sa croissance est souvent nettement améliorée sur roches fortement fracturées ou sur sols profonds car son système racinaire lui permet d'exploiter les fractures rocheuses ;

- le chêne pubescent est une essence xérophile à mésoxérophile, dont l'optimum bioclimatique est situé dans l'étage supraméditerranéen ou mésoméditerranéen en exposition fraîche. Il est très sensible aux conditions édaphiques, surtout dans les conditions climatiques sèches rencontrées dans les garrigues du Gard. Il préfère les sols profonds et meubles, les matériaux de texture légère, sableuse à sablo-limoneuse, développés sur des calcaires dolomitiques, des calcarénites et des grès siliceux.

La démarche d'analyse de la production des peuplements forestiers a consisté à installer des placettes de relevés dans des conditions géopédologiques variées (figure 4). Cent vingt placettes d'une surface de 2 ares ont été étudiées dans des taillis de composition prédominante de chêne vert (69 placettes) ou de chêne pubescent (52 placettes). Tous les peuplements analysés sont gérés par l'Office National des Forêts ; ils sont sains au plan phytosanitaire et leur histoire sylvicole est bien connue, ce qui permet d'éviter les effets perturbateurs des maladies ou des actions anthropiques sur la croissance en hauteur des taillis.

On a effectué sur chaque placette des mesures dendrométriques afin de connaître la production du peuplement. Le protocole, inspiré de celui proposé par Bichard (1982), consiste à mesurer la hauteur de cinq des plus grosses tiges situées sur la placette. Pour pouvoir comparer la production de peuplements d'âges différents, on a ramené la hauteur réelle des arbres mesurée sur le terrain à une hauteur théorique à l'âge de référence de 47 ans. Ces corrections ont été effectuées à l'aide de courbes hauteur-âge établies par l'Inventaire forestier national. La hauteur moyenne des cinq tiges à l'âge de 47 ans (ou H47) constitue un bon indicateur de la production du peuplement, improprement dénommé indice de fertilité. En toute logique, ce protocole ne s'applique qu'aux peuplements purs et équiennes, c'est-à-dire constitués d'une seule essence et d'âge comparable. Les peuplements étudiés étant en partie mélangés (chêne vert et chêne blanc) et traités en taillis, on a vérifié préalablement que la composition et la structure du peuplement n'exercent pas une influence prédominante sur la croissance en hauteur de chaque essence (Curt et Marsteau, 1997).

Relevés écologiques et géopédologiques

Sur chaque placette, on a effectué des relevés de variables

écologiques stationnelles (pente, topographie, confinement...). Nous avons ouvert une fosse de dimensions 1 m x 1 m ; certaines fosses sont moins profondes du fait de la présence de la roche. L'observation sur fosse est complétée par des observations sur des coupes de talus rafraîchies. Pour chaque horizon du système géopédologique, on a relevé la profondeur, la texture, l'intensité et la profondeur de la réaction à l'acide chlorhydrique (moyenne de 3 tests de réaction à l'HCl), le volume d'éléments grossiers en 1/10 par classes de diamètre, le pH terrain, etc. Le substratum a fait l'objet de relevés détaillés : nature de la roche, épaisseur des bancs rocheux, pendage, intensité de la fracturation et espacement des fractures. Le protocole suivi pour ces relevés est rappelé dans le tableau 1.

RÉSULTATS

Constitution des unités géopédologiques

L'objectif de cette première étape est de constituer des unités géopédologiques présentant des caractéristiques structurales et édaphiques comparables (figure 4). Nous avons pour cela construit un fichier contenant toutes les informations relatives aux caractéristiques géopédologiques des 120 placettes d'étude, décrites dans le tableau 1. Nous avons tout d'abord effectué une AFC (analyse factorielle des correspondances) sur ces variables géopédologiques utilisées comme variables actives. La hauteur des peuplements de chêne vert et de chêne pubescent codée en classes de même effectif a été intégrée dans cette analyse comme variable supplémentaire. Seules les variables géopédologiques entrent dans la formation des axes de l'AFC et la hauteur des peuplements est projetée sur les plans factoriels aux fins d'analyse sans être prise en compte dans la formation des axes. Nous avons ensuite effectué une CAH (classification ascendante hiérarchique) sur les variables géopédologiques. Les groupes ainsi constitués ont été reportés sur les plans factoriels de l'AFC. Ces groupes constituent les unités géopédologiques qui seront comparées ensuite par analyse de variance avec la hauteur des peuplements.

L'analyse du plan factoriel 1-2 de l'AFC sur lequel sont projetées les groupes de variables issues de la CAH (figure 5) montre que l'axe 1 exprime un gradient lithologique : il permet de distinguer les roches calcaires sur la partie positive de l'axe, et des roches non calcaires comme des sables, des grès et des loess sur la partie négative. Il prend aussi en compte le lithofaciès en distinguant les roches dures et massives comme les calcaires à faciès urgonien (partie positive de l'axe) des roches meubles, mal consolidées ou fortement fracturées. L'axe 2 représente un double gradient de degré de décarbonatation des matériaux parentaux et des sols, et de charge en éléments grossiers. Il distingue ainsi, sur la partie positive de l'axe, des unités géopédologiques à sols décarbonatés et

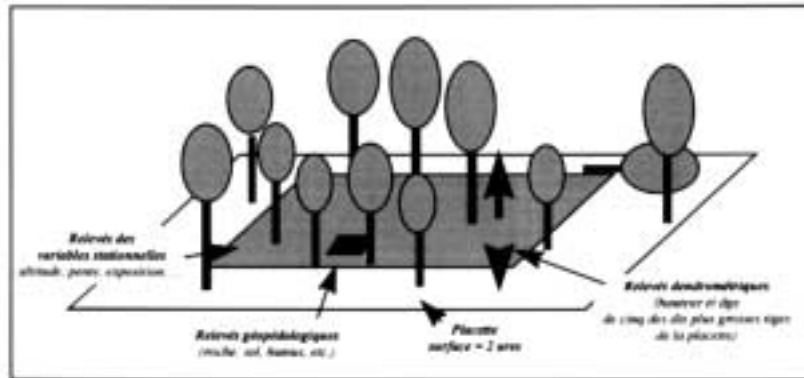
Tableau 1 - Principales variables géopédologiques relevées et relation avec la production des chênes

Table 1 - Main Geopedological Variables and Relationships with Oaks Yield

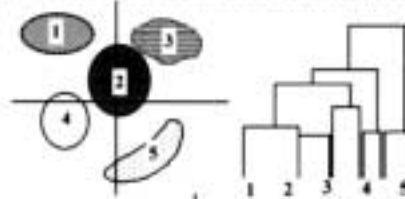
	Variable prise en compte	Observations, protocole	Contraintes principales pour la production des chênes (% de variance expliquée)	Contraintes secondaires pour la production des chênes
Sol et matériau parental (horizons de surface)	Type morphologique d'humus	Définition d'après AFES (1992)		
	Nature du matériau parental		44 %	
	Structure			
	Epaisseur de chaque horizon, limites entre horizons... (description morphologique)			
	Densité des racines	Codage par classes (cf. Baize et Jabiol, 1995)		
	Compacité	Test au couteau		
	Texture	Appréciation tactile (+analyses de sols)		
	Profondeur, intensité et fréquence de réaction à l'acide chlorhydrique	Moyenne de 3 tests par horizons dans la terre fine (cf. Baize et Jabiol, 1995)	32 %	
	Nature, volume et disposition des éléments grossiers	Volume par classe de diamètre (en dixièmes) et disposition	40 %	
	pH	Moyenne de 3 tests au pH-mètre colorimétrique		
	Couleur	Code Munsell		
	Profondeur utile	Profondeur prospectable par les racines (terre fine)	42 %	
	Réservoir en eau des 40 premiers cm	Evaluation par la méthode des textures sur les 40 premiers cm	32 %	
	Continuité spatiale	Codage simple		
Roche (horizons profonds)	Faciès lithologique	D'après carte géologique et terrain		
	Compacité	Epaisseur des bancs en cm, alternance de bancs, etc.	Lithofaciès : 44 %	
	Fracturation	Espacement des fractures en cm		
	Pendage des couches	Valeur en degrés		
	Affleurements rocheux	Corniche, tête de banc, lapiès	30 %	

Figure 4 - Démarche générale de l'étude
Figure 4 - Approach for this Study

Relevés des variables géopédologiques et dendrométriques pour les 120 placettes



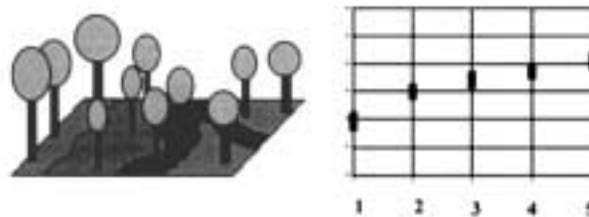
Analyse multivariée des variables géopédologiques
AFC + CAH
(type de roche, profondeur du sol, pierrosité, etc.)

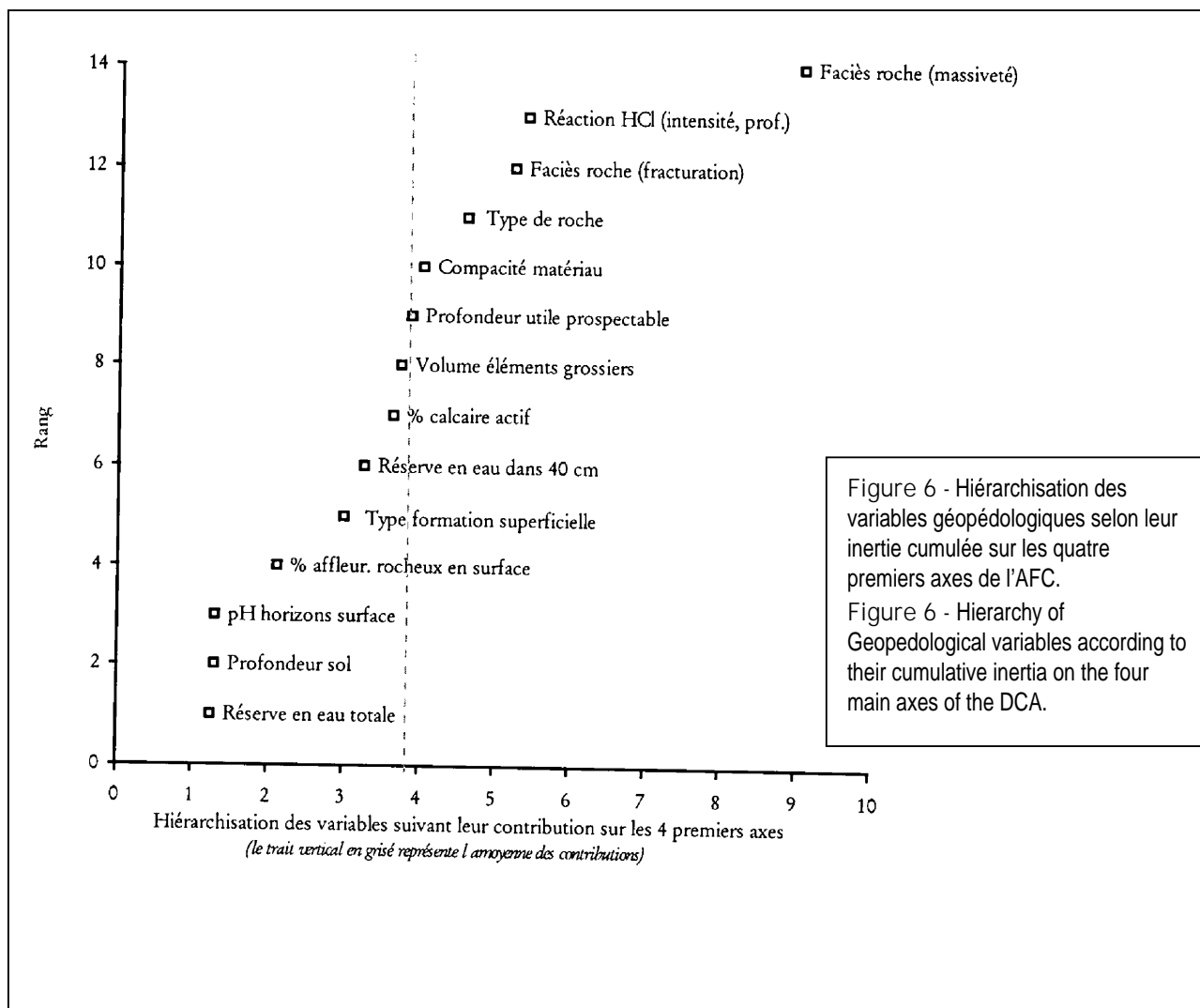


Constitution d'unités géopédologiques



Analyse des relations entre unités géopédologiques et hauteur dominante des peuplements





acides à faible charge en éléments grossiers (sur loess notamment), et sur sa partie négative des unités présentant des sols fortement carbonatés et saturés, très caillouteux (éboulis, dépôts gréziformes, argiles de décarbonatation). La projection des valeurs de H47 en variables supplémentaires permet d'observer que la hauteur des chênes pubescents et des chênes verts augmente régulièrement depuis les unités de sols fortement carbonatés sur calcaires durs jusqu'aux sols décarbonatés sur sables et grès.


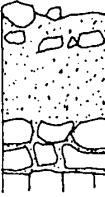

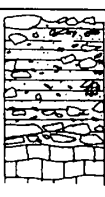


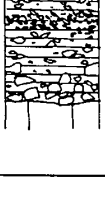
Ces analyses montrent donc que les variables les plus significatives pour constituer les unités géopédologiques sont celles qui décrivent la roche et le lithofaciès (type de roche, épaisseur des bancs, fracturation), la présence de calcaire actif (intensité, vitesse et profondeur de réaction à l'acide), la compacité du sol et du matériau parental et la présence d'éléments grossiers. Cette hiérarchie est confirmée par la figure 6 qui

indique les principales variables ayant contribué à la formation des six premiers axes de l'AFC, et par l'analyse de variance simple sur les variables géopédologiques (tableau 1).

Les 7 unités géopédologiques issues de l'AFC et de la CAH sont décrites dans le tableau 2. Cette typologie permet de distinguer en premier lieu deux familles lithologiques qui sont associées à des systèmes géopédologiques différents au sens de Callot (1978) : les unités sur grès et calcaires gréseux (unités 1 et 2), et les unités sur calcaires sensu stricto (4 à 7). L'unité 3 appartient au système colluvial. Ces résultats confirment le rôle prépondérant du substratum géologique dans la différenciation des sols de ces régions. Ils justifient la prise en compte de la lithologie comme première clef de détermination des types de stations forestières sur substratum carbonaté et gréseux, à l'instar de Darracq et al. (1984) pour les garrigues du Gard ou de Marsteau et Agrech (1995) pour les grands

Tableau 2 - Description des unités géopédologiques

Table 2 - Description of geopedological units

Unité géopédologique	Système géopédologique	Roche et lithofaciès	Altérite et formation superficielle	Caractéristiques physiques du sol	Caractéristiques chimiques du sol	Ensembles structuraux
1	Siliceux	Sables et grès (faciès meubles ou consolidés)	- Sables d'altération des grès - Loess (matériaux meubles)	- Texture AS ou AL - Epaisseur moyenne : 50cm - Absence d'éléments grossiers	- Sols acides - pH = 5 en profondeur - Réaction HCl nulle (recarbonatation locale possible)	
2	Siliceux	Grès Présence de barres rocheuses affleurantes localement	Altérites sablo-argilo-graveleuses	- Sols assez profonds (moy. 50 cm), meubles - Texture SA - Fort pourcentage d'éléments grossiers	- Sols acides - pH = 5 en profondeur - Réaction HCl nulle dans tout le profil	
3	Colluvial	Calcaires argileux et calcaires gréseux	Argiles de décarbonatation brun-gris ou brun-jaunâtre à cailloutis (60-90 % d'éléments gr.) Eboulis	- 60 à 90 % d'éléments grossiers - Profondeur 50 à 70 cm - Texture AS- SA	- Calcaire actif dans tout le profil (effervescence généralisée) - pH = 8 dans tous les horizons	
4	Dissolution Désagrégation granulaire	Calcaires argileux et calcaires gréseux	Argile calcique brun-jaunâtre ou brun-rougeâtre	- Charge moyenne en él. grossiers (10 à 30 %) - Texture A-AL - Compacité moyenne	- Sols neutres (pH = 6 à 7) partiellement décarbonatés (décarbonatés en surface)	
5	Gélifraction Karstification	Calcaires durs cristallins fracturés et karstifiés Altern. d'affleur. rocheux et de poches d'altér.	- Argile de décarbonatation rougeâtre (<i>terra rossa</i>) avec des gélifraacts	- 70 à 90 % d'éléments grossiers - Texture AL - 80-100 % d'affleurement rocheux surface	- Sols neutres (pH = 6 à 7) partiellement décarbonatés avec réaction HCl locale et modérée	
6	Karstification	- Calcaires durs cristallins en gros bancs très fissurés et fracturés (<i>lapiés</i>) à pendage inv. ou oblique	- Argile de décarbonatation rougeâtre (<i>terra rossa</i>) en «poches» - Plaquettes décim. ou cm.	- Abondance de plaquettes - 30 à 80 % d'él. grossiers - Matériau et sol compact à très compact	- Sols décarbonatés : pH = 6 - Absence d'effervescence à l'acide	
7	Gélifraction Karstification	Calcaires crayeux très purs à faciès massif urgonien, peu fracturés	- Argiles de décarbonatation - Présence locale d'induration calcaire	- Abondance des gélifraacts - Présence locale d'indurations calcaires - Profondeur sol : 25 à 45 cm	- Sols décarbonatés en surface (réaction HCl nulle) - Réaction gén. dans les hor. prof. (pH=7 à 8)	

Causses. Au sein d'un même groupe lithologique, les unités géopédologiques sont ensuite définies par la nature de leur matériau parental, le degré de décarbonatation du profil et son pH, et par la profondeur de sol prospectable par les racines.

Un deuxième fichier a été constitué à partir des résultats d'analyses physico-chimiques sur des échantillons de sols prélevés sur des fosses caractéristiques de la zone d'étude. 30 échantillons ont été prélevés dans l'horizon A du sol et 23 dans l'horizon C. Les variables issues de ces analyses ont été codées par classes et ont fait l'objet d'une AFC combinée à une CAH. Des variables géopédologiques et la hauteur des peuplements ont été introduites comme variables supplémentaires. L'interprétation du plan factoriel 1-2 de l'AFC montre que l'axe 1 (inertie : 33 %) oppose les résultats d'analyses de sols situés sur roches siliceuses à ceux obtenus sur roches calcaires. L'axe 2 (inertie : 26,5 %) représente un gradient de capacité d'échange cationique (CEC) et de richesse chimique du sol. Trois groupes principaux ont été déterminés par la CAH et reportés sur l'AFC :

- le premier groupe est caractérisé par des sols et des matériaux de texture argilo-sableuse à argilo-sablo-limoneuse, faiblement acides à acides (pH = 6 en laboratoire, pH = 5 sur le terrain avec un pH-mètre colorimétrique), l'absence de carbonates et une CEC comprise entre 5 et 15 %. Il correspond à des relevés sur sables et grès et sur sables argileux ;

- le deuxième groupe correspond à des sols avec présence de calcaire actif (1 à 12 %) et de carbonates (7 à 50 %), qui se traduisent par de fortes réactions à l'acide sur le terrain. Ces sols sont saturés et leurs pH basiques (pH = 8 en laboratoire). La texture prédominante est argilo-limoneuse (AL, AL, LAS). Ce groupe correspond aux éboulis sur calcaires et calcaires gréseux ;

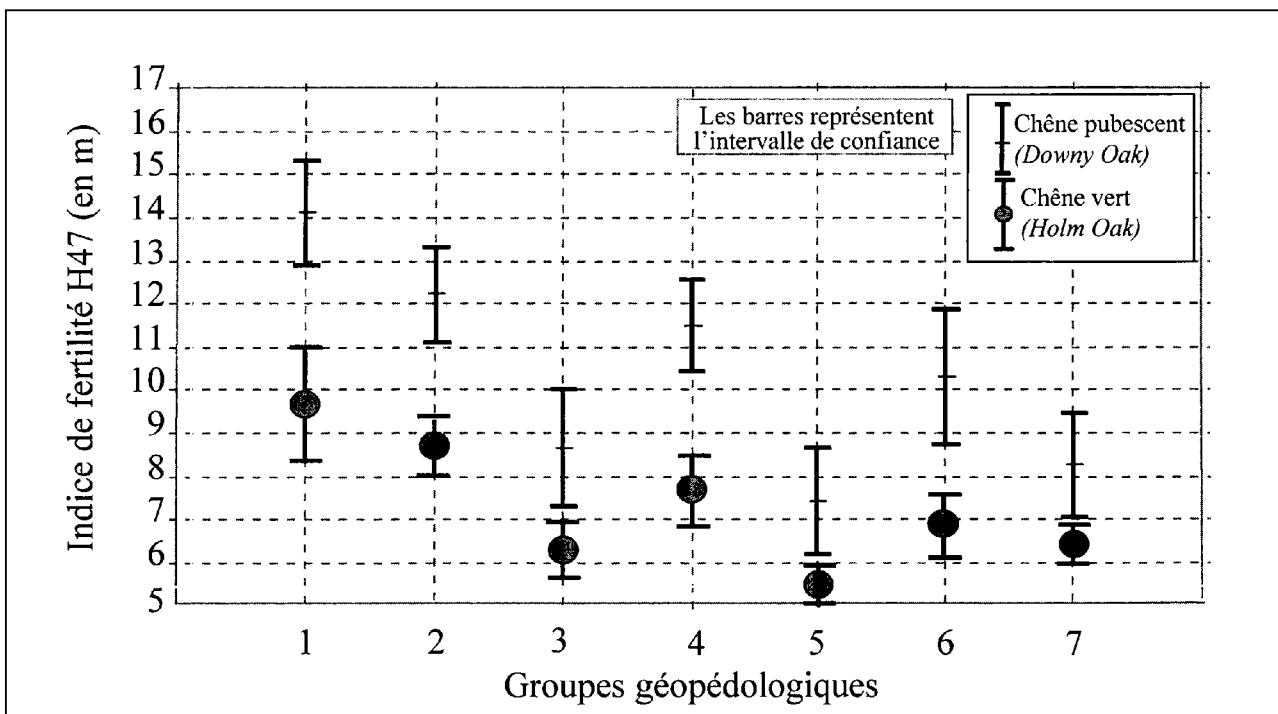
- le troisième groupe est constitué par des sols de texture lourde (A, ALO) avec des taux de carbonates moyens (0,2 à 5 %), peu ou pas de calcaire actif, une CEC moyenne à forte, et un pH neutre (pH = 7 en laboratoire). Il correspond à des argiles de décarbonatation rougeâtres sur calcaire dur (terra rossa).

Relation entre unités géopédologiques et croissance en hauteur des chênes

Une analyse de variance a été effectuée pour comparer les indices de fertilité des chênes avec chacune des 7 unités géopédologiques. Le type d'unité géopédologique permet d'expliquer 42,5 % de la variance de H47 pour le chêne pubescent (F-Ratio = 7,6 ; P-Value = 0,0000), et 41,1 % pour le chêne vert (F-Ratio = 8,6 ; P-Value = 0,0000). Les tests statistiques sont fortement significatifs dans les deux cas.

La figure 7 représente l'intervalle de confiance de H47 en fonction des unités géopédologiques. On observe tout d'abord que le chêne vert est toujours moins haut que le chêne pubes-

Figure 7 - Relation entre groupes géopédologiques et hauteur dominante du chêne pubescent et du chêne vert à 47 ans.
Figure 7 - Relationships between geopedological units and dominant height for downy oak and holm oak (H47 years)



cent dans des conditions comparables. Les unités géopédologiques 1 et 2 sont les plus favorables à la croissance des deux chênes. H47 y est respectivement de 14,1 m, 12,3 m pour le chêne pubescent, et de 9,8 m et 8,8 m pour le chêne vert. Ces unités géopédologiques sont développées sur grès ou calcaires gréseux fortement fracturés ou altérés, avec des matériaux meubles et non asphyxiants généralement décarbonatés. Leurs sols profonds et décarbonatés sont favorables à la croissance des chênes, même si ceux-ci supportent la présence de calcaire actif et les sols superficiels (Ladier et Boisseau, 1992). On observe que dans l'unité 2, la présence de petits bancs rocheux peu profonds freine la croissance des chênes ; H47 est plus élevé sur l'unité 1 dont le substratum rocheux est recouvert de loess et de sables (unité 1). L'unité 4, située sur calcaires argileux et gréseux, est aussi favorable à la croissance des chênes. Ceci peut s'expliquer par la présence d'argile de décarbonatation assez pauvre en éléments grossiers et par l'absence de calcaire actif dans la partie supérieure du profil. L'unité 6 a un indice de fertilité moyen : 10,3 m pour le chêne pubescent et 6,9 m pour le chêne vert. Elle est située sur des calcaires durs mais fortement fracturés. Le pendage rocheux est inverse ou oblique par rapport à la pente, ce qui favorise la pénétration racinaire et la croissance en hauteur des chênes, de même que la présence de poches de terra rossa.

Les plus faibles hauteurs de peuplements sont observées dans les unités 3, 7 et 5. L'unité 3 sur calcaire gréseux ou argileux est caractérisée par une effervescence généralisée dans tout le profil pédologique, ce qui réduit fortement la croissance en hauteur des peuplements. L'unité 7 est située sur calcaire crayeux dur et massif à faciès urgonien, ce qui limite la prospection racinaire. Ces matériaux sont fortement caillouteux, peu épais, avec des dépôts de calcaire diffus. Le profil est fortement carbonaté et le pH est supérieur ou égal à 7 dès la surface. L'unité 5 est la moins favorable aux chênes : H47 y est de 6,7 m pour le chêne pubescent et 5,8 m pour le chêne vert. Cette unité est située sur calcaire dur karstifié. Le matériau est une argile rouge avec des géli-fracts (50 à 70 % de cailloux et au total de 70 à 90 % d'éléments grossiers de toutes dimensions). Cette pierrosité très forte est un frein majeur à la croissance forestière, de même que la présence de calcaire actif dans l'altérite et le sol.

Construction d'une clé pour la prévision de la hauteur des peuplements

La figure 8 présente une clé indiquant la valeur moyenne de H47 en fonction des caractéristiques géopédologiques : elle permet au gestionnaire de prévoir la hauteur moyenne du peuplement à 47 ans en fonction des observations géopédologiques de terrain. Elle a été construite par analyse multivariée (CAH) sur les relevés et sur les variables. Les hauteurs suivies d'un astérisque correspondent aux valeurs

moyennes acquises sur un grand nombre de relevés ($n > 10$). Dans certains cas, l'effectif est insuffisant pour l'une ou l'autre des essences et les hauteurs dominantes n'ont donc qu'une valeur indicative et non prédictive. Cette clé a été validée par des tests de terrain effectués par les personnels de l'Office National des Forêts.

DISCUSSION

Les hauteurs dominantes des peuplements de chênes varient fortement dans la zone d'étude : H47 est compris entre 5,2 et 14,5 mètres pour le chêne pubescent et entre 5,5 et 9,8 mètres pour le chêne vert. Les caractéristiques géopédologiques expliquent une part importante de ces variations de hauteur. Chacun des compartiments de l'unité géopédologique joue un rôle dans l'explication des variations de H47 :

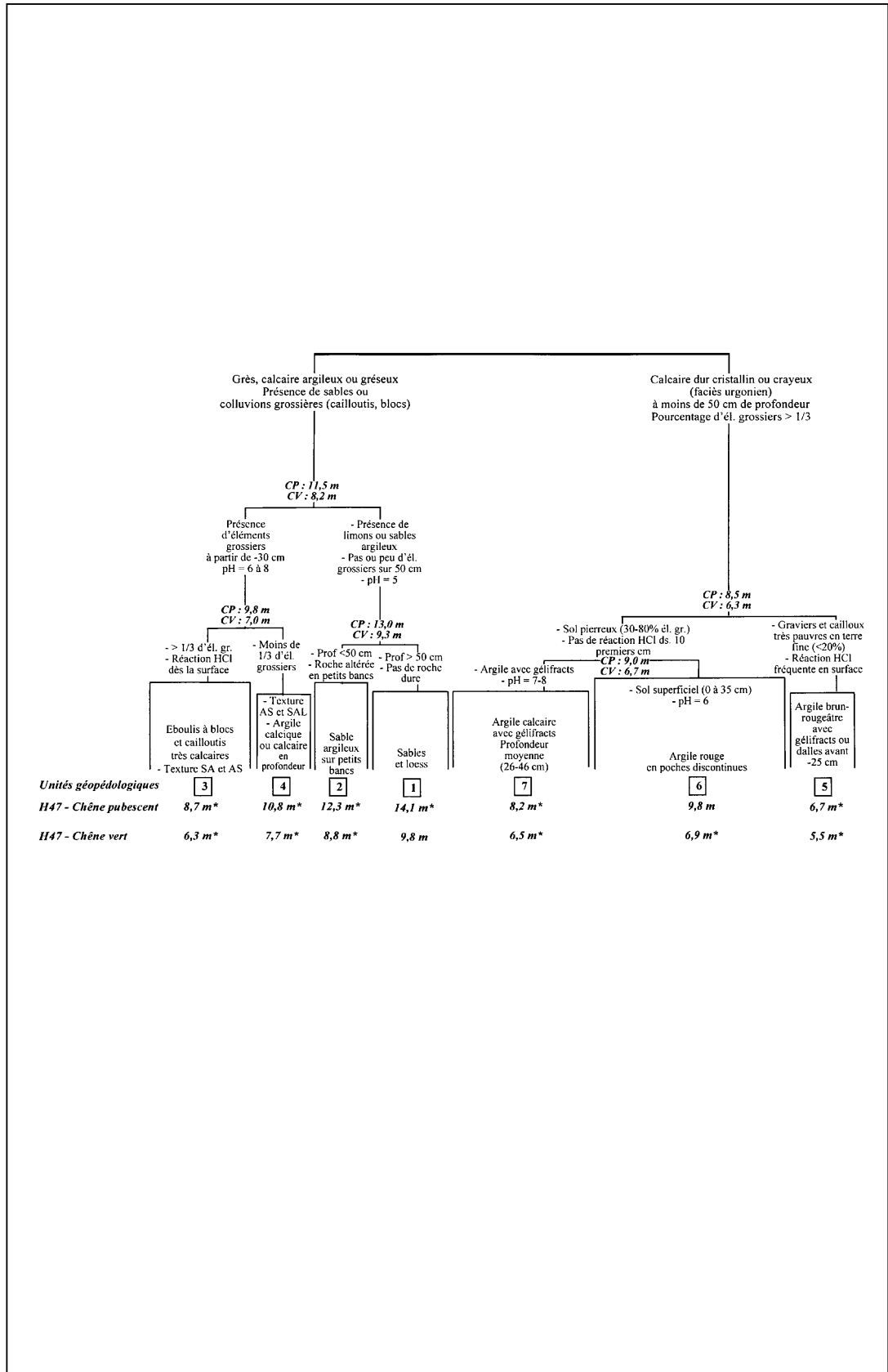
- la partie superficielle du profil : quand il existe un sol meuble bien développé, la hauteur des chênes dépend avant tout de la présence de calcaire actif. On observe que sur les unités 3 et 4, développées sur calcaires gréseux et calcaires argileux et présentant des matériaux parentaux assez comparables, H47 augmente nettement quand on passe de sols carbonatés dès la surface (unité 3) à des sols décarbonatés en surface (unité 4). La productivité dépend aussi de la capacité de rétention en eau du sol, qui est liée à la texture de la terre fine et à la quantité et à la disposition des éléments grossiers ;

- l'altérite ou la formation superficielle : même si elle est souvent peu épaisse et parfois absente, elle joue un rôle important dans la croissance des chênes. Les altérites épaisses, décarbonatées et présentant une texture équilibrée ou sablo-argileuse sont les plus favorables (unités 1 et 2). Les altérites très argileuses, compactes et fortement carbonatées (unités 5 et 7) sont défavorables à l'alimentation hydrique et minérale des chênes. La prise en compte de la charge en éléments grossiers de l'altérite est essentielle. H47 varie fortement en fonction du volume total d'éléments grossiers, mais aussi en fonction de leur disposition et de leur taille (Curt et Marsteau, 1997). Les unités 5 et 6 sur calcaires durs ont des volumes importants d'éléments grossiers (respectivement 70 à 90 % et 30 à 80 %) mais dans l'unité 5, il s'agit de plaquettes de grandes dimensions qui freinent la prospection racinaire et qui ralentissent la croissance en hauteur des peuplements. Dans l'unité 6, se sont des plaquettes de toutes dimensions disposées dans toutes les directions, qui sont plus favorables ;

- la nature lithologique du substratum et le lithofaciès : les calcaires durs et massifs sont les plus défavorables du fait des contraintes qu'ils entraînent pour la prospection racinaire. Les grès altérés et les sables meubles sont les plus favorables pour des raisons inverses. Pour un même substratum, le degré de fracturation de la roche et l'orientation des fractures peuvent modifier fortement la croissance en hauteur des chênes. Ce

Figure 8 - Clef géopédologique pour la détermination de la hauteur dominante des peuplements de chênes vert et pubescent à 47 ans (H47, en m) - Nota : les hauteurs suivies d'un astérisque correspondent aux valeurs moyennes acquises sur un grand nombre de relevés (10) ; les valeurs sans astérisque sont indicatives mais non prédictives du fait d'un nombre insuffisant de relevés

Figure 8 - Geopedological Key for the Determination of Dominant Height of Holm Oak and Downy Oak Stands at 47 years of age (meters) - Nota Bene : Numbers followed by an asterisk correspond to average values on large samples (10 or more data) ; values without asterisk are indicative but not predictive because of the sample size



phénomène s'observe sur différents types de roches : dans l'unité 1, la roche gréseuse est altérée en profondeur et la production est très forte. H47 diminue de 10 à 20 % dans l'unité 2 du fait de la présence d'affleurements gréseux sous la forme de barres rocheuses dures proches de la surface. Sur calcaires durs, la présence d'une fracturation inverse à la pente ou oblique (unité 6) permet d'augmenter la valeur de H47 de 2 à 3 mètres par rapport à l'absence de fracturation (unité 7).

Au plan pratique, il est parfois difficile d'observer la roche en place pour caractériser les contraintes engendrées sur le système racinaire. Il est alors nécessaire d'ouvrir des fosses pédologiques de grandes dimensions (supérieures à 1 m de largeur et 2 m de profondeur), ce qui constitue une contrainte de temps et de coût. Par ailleurs les lithofaciès et certaines caractéristiques du profil peuvent varier à l'échelle de la placette de relevé : il est recommandé de répéter certains diagnostics comme le test de réaction à l'acide ou celui de la profondeur du sol, pour s'assurer de leur reproductibilité et de la qualité de la description du sol.

CONCLUSIONS

Ce travail confirme l'intérêt d'une approche géopédologique pour prévoir la production de peuplements forestiers sur substrats carbonatés et gréseux en milieu méditerranéen. Cette approche s'avère robuste et permet de prévoir avec une bonne précision le niveau de production des essences étudiées. Elle permet une description rapide mais précise des caractéristiques du substrat qui peuvent influencer sur la croissance forestière ; la plupart de ces variables sont directement accessibles sur le terrain à l'aide de tests simples reproductibles par tout gestionnaire formé à la démarche (réaction à l'acide chlorhydrique, calcul du volume d'éléments grossiers...). Le point fort de cette démarche consiste à étudier simultanément les caractères physiques et chimiques de l'ensemble du substrat prospecté par les racines des arbres : la roche, l'altérite et le sol sensu stricto.

La démarche géopédologique permet de montrer l'influence prépondérante du substratum dans les conditions de fortes contraintes édaphiques rencontrées dans de nombreuses régions calcaires méditerranéennes. Le type de roche mais aussi le lithofaciès (nature, direction et intensité de la fracturation, pendage...) doivent être pris en compte. Ces caractéristiques sont acquises lors des processus de sédimentation et diagenèse des roches calci-magnésiques (Bruckert et Gaiffe, 1991), lors des phases tectoniques postérieures qui ont conduit à l'apparition d'une macrofracturation et d'une mésofracturation (Dubois, 1985), ou par cryoclastie en contexte périglaciaire lors du Würm. On sait que le lithofaciès influence sur la pédogenèse (Bruckert et Gaiffe, 1985), sur l'humification par l'intermédiaire du régime hydrique et des flux d'éléments miné-

raux (Vergès, 1982 ; Bruckert et Gaiffe, 1985 ; Blonde et al., 1986 ; Legros et al., 1987 ; Gras, 1994), sur la disponibilité en calcaire actif dans le profil et les potentialités agronomiques des sols (Baize, 1989). En forêt, Tan (1988) a montré son action sur la composition floristique des forêts et la régénération naturelle des sapinières ; son rôle dans la croissance des peuplements forestiers est confirmé ici.

Les meilleures productions sont observées sur des sols meubles et décarbonatés, sur des grès et des calcaires gréseux. Inversement, tous les obstacles majeurs s'opposant au développement racinaire et réduisant le volume prospectable par les racines, même dans les horizons profonds du substrat, entraînent une forte réduction de la croissance des arbres.

Des travaux complémentaires doivent être menés pour améliorer la connaissance des relations entre sol et production forestière sur ces substrats. Ils porteront sur la caractérisation de l'état hydrique par des mesures in situ et en laboratoire, et sur l'étude de l'enracinement en fonction des contraintes géopédologiques, notamment de la pierrosité (Lucot et Gaiffe, 1995). L'analyse détaillée du système racinaire, qui constitue un interface entre le sol et l'arbre, devrait permettre de mieux comprendre les mécanismes de la croissance en fonction des caractéristiques géopédologiques.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Office National des Forêts (service départemental du Gard) pour l'aide apportée sur le terrain ainsi que MM. G. Callot et E. Lucot pour leur lecture très constructive du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1992 - Référentiel pédologique 1992. Principaux sols d'Europe. INRA, Paris, 222 p.
- Baize D., 1989 - Typologie des sols de l'Yonne. Les plateaux de Bourgogne. INRA, Orléans, 148 p.
- Baize D., Jabiol B., 1995 - Guide pour la description des sols. INRA éd., Paris, 375 p.
- Barthès J.P., Bornand M., 1986 - Cartographie des sols en moyenne montagne calcaire sèche : une méthode d'approche possible. In : Agrométéorologie des régions de moyenne montagne. Colloque INRA n° 39, Toulouse, avril 1986, 107-115.
- Becker M., Le Tacon F., Timbal J., 1980 - Les plateaux calcaires de Lorraine. Type de station et potentialités forestières. ENGREF, Nancy, 216 p.
- Bichard D., 1982 - Essai sur les relations entre milieu et productivité du chêne vert au Lubéron. Thèse Univ. Aix-Marseille, 126 p.
- Blonde J.L., Gaiffe M., Contini D., Bruckert S., 1986 - Relations entre le

- caractère humifère des sols des plateaux jurassiens et la régime hydrique induit par la perméabilité des bancs calcaires. *Pédologie*, XXXVI-2, 155-177.
- Boisseau B., 1996 - Ecologie du Pin pignon et du pin brutia : définition d'un indice de fertilité en fonction du milieu. *Rev. Forest. Fr.*, 1996, XLVIII(4), 321-335.
- Bonfils P., 1977 - Le classement des sols en vue de la reforestation en zone méditerranéenne. Doc. Polycopié, ENSA-SES, Montpellier, 14 p.
- Bonin G., Romane F., 1996 - Chêne vert et chêne pubescent. Histoire, principaux groupements, situation actuelle. *Forêt Médit.*, XVII (3), 1996, 119-128.
- Bruckert S., Gaiffe M., 1985 - Les sols de Franche-Comté. CUER, Univ. Franche-Comté, 185 p.
- Bruckert S., Gaiffe M., 1991 - Déterminisme paléoécologique des écosystèmes actuels du Haut-Jura, en relation avec la fracturation des roches. *Ann. Sci. Forest.* (1991) 48, 575-591.
- Callot G., 1978 - Analyse des lithosystèmes carbonatés. Rôle du substratum calcaire dans la pédogenèse. INRA-ENSA Montpellier, Serv. Etude Sols, note interne, 94 p.
- Callot G., Chamayou H., Maerstens C., Salsac L., 1982 - Mieux comprendre les interactions sol-racine. Incidence sur la nutrition minérale. INRA, Paris, 35 p.
- C.P.C.S. (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols), 1997 - Classification des sols. Multicopie, 96 p.
- Curt T., Dôle S., Marmey G., 1996 a - Alimentation en eau et production forestière. Application d'indicateurs simples pour les résineux dans le Massif Central. *Etude Gestion des Sols*, 3, 2, 1996, 81-96.
- Curt T., Bouchaud M., Agrech G., Plaisse L., 1996 b - Relations station-production pour le douglas et l'épicéa commun en Limousin. Cemagref Clermont-Fd, 99 p.
- Curt T., Marsteau C., 1997 - La gestion des taillis de chêne vert et pubescent dans les garrigues du Gard. Analyse du milieu et de la productivité des peuplements. *Ingénieries-EAT*, 1997 (11), 71-84.
- Darracq S., Godron M., Romane F., 1984 - Typologie forestière de la région des garrigues du Gard. ENGREF, Nancy, 181 p.
- Dubois P., 1985 - Notes karstologiques sur les Grands Causses. *Bull. Soc. Languedoc. Géogr.*, 1985, 19 (3-4), 197-226.
- Duclos G., 1980 - Pédologie et aménagement rural : appréciation de l'aptitude à la mise en valeur forestière et agricole des sols des zones accidentées de Provence. *Forêt médit.*, t. II, n° 1, 1980, 5-16.
- Gras R., 1994 - Sols caillouteux et production végétale. INRA éd., 175 p.
- Ladier J., Boisseau B., 1992 - Typologie des stations forestières du massif de la Sainte-Victoire. Cemagref Aix, 238 p.
- Legros J.P., Party J.P., Dorioz J.M., 1987 - Répartition des milieux calcaires, calciques et acidifiés en haute montagne calcaire humide. Conséquences agronomiques et écologiques. *Doc. Cartogr. Ecol.*, XXX, 1987, 137-157.
- Le Tacon F., 1973 - Sol, nutrition et production ligneuse. *Ann. Sci. Forest.*, 1973, 30 (3), 259-285.
- Lucot E., Gaiffe M., 1995 - Méthode pratique de description des sols forestiers caillouteux sur substrat calcaire. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 2, 1995, 91-104.
- Marsteau C., Agrech G., 1995 - Typologie des stations forestières des Grands Causses. Cemagref, Clermont-Fd., 178 p.
- Pritchett W.L., Fisher R.F., 1987 - Properties and Management of Forest Soils. J. Wiley et Sons, N.-York, 494 p.
- Tan B.S., 1988 - La régénération du sapin (*Abies alba* Mill.) dans le Jura : influence des facteurs physiques, édaphiques et biotiques sur les stades précoces du développement des semis. Thèse Univ. Besançon, 1988, 150 p.
- Vergès V., 1982 - Contribution à l'analyse et à la représentation cartographique des formations pédologiques en moyenne montagne calcaire (Mont Ventoux, France). Thèse 3è cycle, Univ. Paris 7, 226 p.
- Vernet B., 1995 - Etude des relations station-production pour le Pin noir

d'Autriche sur les Causses gardois (région de Trèves). Rapport BTS,

Cemagref / ONF, 50 p.