
Alimentation en eau et production forestière

Application d'indicateurs simples pour les résineux dans le Massif Central

T. Curt, S. Dole, G. Marmeys

Cemagref - Groupement de Clermont-Fd., Division Techniques Forestières - Domaine de Lалуas, 63200 Riom

RÉSUMÉ

L'alimentation en eau des stations contrôle une part importante de la production forestière. Elle doit pouvoir être évaluée par des indices simples, robustes et facilement mesurables sur le terrain par tout gestionnaire forestier. Cet article montre l'intérêt de méthodes de diagnostic simplifié : la valeur du réservoir en eau du sol (RES) est estimée en prenant en compte uniquement la profondeur du sol (par test-tarière), sa texture et sa pierrosité. Un bilan entre apports et départs d'eau sur le versant complète ce diagnostic. Ces deux éléments sont comparés avec l'indice de fertilité de peuplements d'épicéa commun et de sapin pectiné, qui permet d'estimer leur niveau de production. Au total, 512 placettes de relevés ont été étudiées dans deux régions écologiquement contrastées du Massif Central : les hautes Cévennes granitiques et métamorphiques (Mont Lozère, Aigoual, Lingas), et les massifs volcaniques auvergnats (Chaîne des Puys, Monts Dore). L'indice RES discrimine une part importante de l'indice de fertilité pour le sapin pectiné et l'épicéa commun dans les hautes Cévennes, en climat méditerranéo-montagnard, et dans un contexte pédologique relativement homogène. Son rôle est secondaire dans la production de l'épicéa commun en Auvergne, du fait d'un faible déficit hydrique climatique. La méthode utilisée fournit un ordre de grandeur du réservoir en eau et permet des comparaisons entre stations. Cependant, elle ne s'applique en toute rigueur que dans des conditions de relative homogénéité des matériaux parentaux et des sols. Des propositions sont faites pour compléter cette approche dans d'autres contextes édaphiques. La prise en compte du bilan en eau de la placette en fonction de sa position sur le versant permet de mieux comprendre les variations de l'indice de fertilité.

Mots clés

Réservoir en eau du sol - Production forestière - Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) - Epicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) - Massif Central.

SUMMARY

WATER SUPPLY AND FOREST YIELD

Application of simple indices for coniferous species in the French Massif Central.

The evaluation of water budget of forest sites is a good indicator of forest yield. The goal of this study is to give foresters simple tools for estimating this water budget for any site, as to predict variations of site index. Water-holding capacity of soils is calculated with a simple index, usually used in agronomy : it only takes into account depth, texture and stone content of soil. Another index ("seepage index") evaluates the balance between inputs and outputs of water according to the position of site on slope. These two indices are compared with the site index for Norway spruce and Silver fir in the French Massif Central. Site Index is the term used to express the

height of dominant and codominant trees of a stand projected to some particular standard age (Pritchett, 1979). It gives a precise evaluation of forest yield for pure and even-aged stands. These two species have been chosen because of their abundance and because they are present under various site conditions. 512 stands have been studied in the French Massif Central : about 300 in the high Cévennes, under mediterranean and mountainous bioclimatic conditions, in granitic and metamorphic middle mountains (Mont Lozère, Aigoual, Lingas). Soils are brown oligotrophic soils and podzolic soils (Alocrisols). About 200 stands are located in the volcanic areas of Auvergne (Monts Dore, Chaîne des Puys), in a wet and cold bioclimate. The results stress that a simple water-holding capacity index can explain a large part of Site Index variations. It is less under wet conditions, which are not favourable to express the effect of water reservoir on forest yield. The major part of water reservoir is located in the parent materials that cover slopes. This simple test, easy in the field, can be used in wide areas in the French Massif Central. But this method must be used carefully in other conditions : rapid changes of texture, great amount of stones... Then, it seems necessary to take into account other soil variables : stoniness parameters, description of the substratum... In any case, it seems interesting to evaluate the balance of water on slopes ("seepage index") which can explain a large part of site index variations.

Key-words

Water storage capacity - Forest soil - Site Index - Silver fir (*Abies alba* Mill.) - Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) - French Massif Central

RESUMEN

ALIMENTACIÓN EN AGUA Y PRODUCCIÓN FORESTAL,
aplicación de indicadores simples para los coníferos.

La alimentación hídrica de las estaciones controla una parte importante de la producción forestal. Debe poder estar evaluada por índices simples, robustos y fácilmente medidos en el terreno por todo gestor forestal. Este artículo muestra el interés de métodos de diagnóstico simplificado: el valor de la reserva en agua del suelo está estimada teniendo en cuenta únicamente la profundidad del suelo (con taladro), su textura y su pedregosidad. Un balance entre aportes y salidas de agua en la vertiente completa este diagnóstico. Estos dos elementos son comparados con el índice de fertilidad de poblaciones de picea común y de abeto pectíneo, que permite estimar su nivel de producción. En total, 512 sitios fueron estudiados en dos regiones ecológicamente contrastadas del macizo central: los altos Cévennes graníticos y metamórficos (Mont Lozère, Aigoual, Lingas), y los macizos volcánicos del Auvergne (chaîne des Puys, Monts Dore). El índice de reserva en agua del suelo discrimina una parte importante del índice de fertilidad por el abeto pectíneo y la picea común en los altos Cévennes, en clima mediterráneo-montañoso, y en el contexto pedológico relativamente homogéneo. Su papel es secundario en la producción de la picea común en Auvergne, del hecho de un ligero déficit hídrico climático. El método usado da un orden de tamaño de la reserva hídrica y permite comparaciones entre estaciones. Todavía, se aplica en todo rigor únicamente en condiciones de relativa homogeneidad de los materiales padres y de los suelos. Proposiciones están hechas para completar este acercamiento en otros contextos edáficos. La toma en cuenta del balance hídrico del sitio en función de su posición en la vertiente permite comprender mejor las variaciones del índice de fertilidad.

Palabras claves

Reservas en agua del suelo - producción forestal - Abeto pectíneo (*Abies alba* Mill.) - picea común (*Picea abies* (L.) Kart.) - Macizo central.

L'alimentation en eau des stations contrôle une part importante de la production forestière (Becker et Le Goff, 1988 ; Pritchett, 1979) (figure 1). C'est pourquoi les forestiers cherchent depuis longtemps à la caractériser en vue de prévoir le niveau de fertilité de telle ou telle essence (Bonneau, 1963). Il faut pour cela évaluer :

- le réservoir en eau du sol, c'est-à-dire la capacité permanente d'un sol à retenir une certaine quantité d'eau (Baize et Jabiol, 1995) ; elle dépend de sa profondeur et de ses caractéristiques physiques (texture, pierrosité, structure, porosité,...)

- le bilan entre apports et départs d'eau le long du versant, en fonction de la position de la placette.

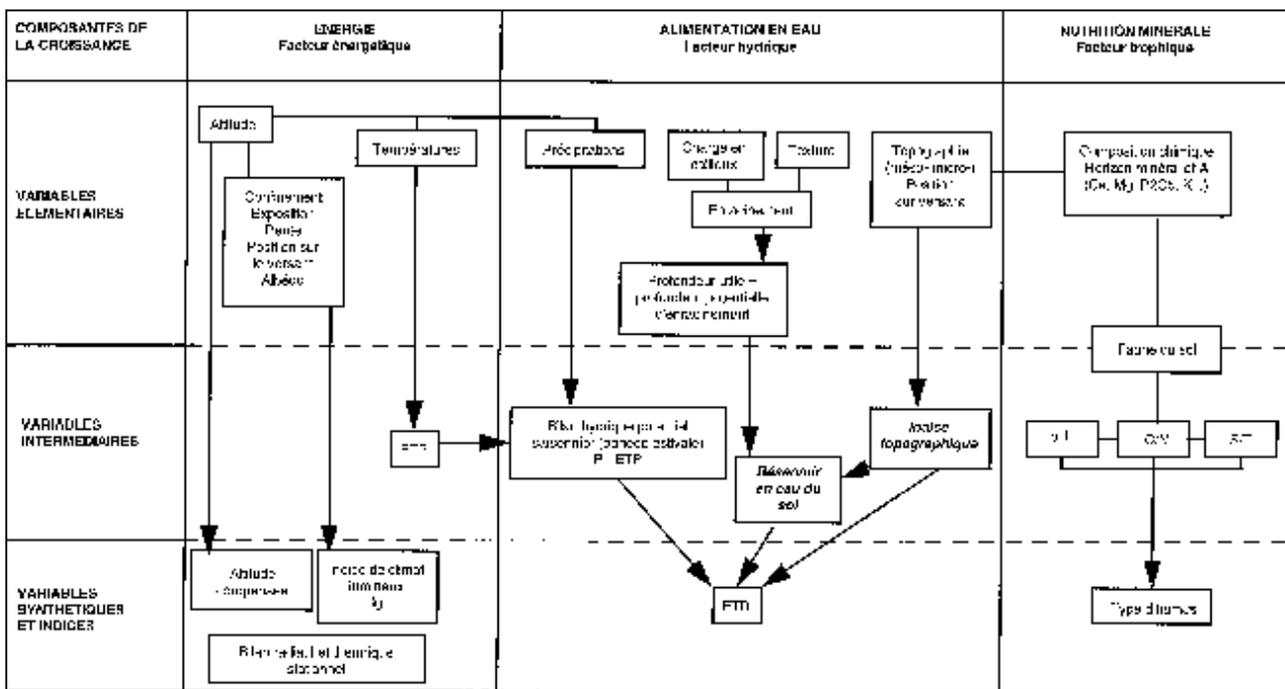
L'alimentation en eau des stations forestières peut être caractérisée à l'aide de bio-indicateurs, comme la composition de la végétation herbacée et la présence d'espèces indicatrices du régime hydrique (Long et al., 1972 ; Duchaufour, 1989). On peut ainsi classer les stations les unes par rapport aux autres, suivant leur position sur un axe de gradient hydrique qui va d'un pôle "très sec" jusqu'à un pôle "mouillé, inondé en permanence" (Rameau et al., 1993). Cette apprécia-

tion qualitative s'avère efficace pour distinguer les cas extrêmes (sols très secs ou mouilleux), mais moins utile dans les situations intermédiaires.

Il apparaît alors nécessaire de chiffrer le réservoir en eau, ou du moins d'en effectuer une estimation quantitative, particulièrement lorsque l'on souhaite étudier l'influence de l'alimentation en eau sur la production d'une essence forestière. Des analyses de laboratoire permettent une estimation précise de la réserve utile du sol (Hallaire, 1963) mais sont coûteuses. Elles sont communément utilisées pour des sols agricoles ou prairiaux, mais sont plus difficiles à appliquer pour des sols forestiers. En effet, les racines des arbres peuvent prospector dans les fissures rocheuses difficiles d'accès avec les techniques de terrain. L'évaluation de la capacité de stockage en eau du sol est ainsi rendue plus difficile. Les gestionnaires forestiers ont besoin de méthodes de diagnostic simples, robustes et facilement reproductibles sur le terrain. L'objectif de cet article est de tester l'efficacité de méthodes de diagnostic simplifiées de l'alimentation en eau des stations pour la prédiction de la production forestière.

Figure 1 - Variables prises en compte pour décrire la production forestière.

Figure 1 - Main Site Variables of Forest Growth.



(Tableau d'après C. GRANDJEAN, 1984, modifié)

CEMADREF - T. CURT, 1994

Signification des termes :

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

P-ETP : Bilan hydrique saisonnier (précipitations - ETP)

TCPO : Indice topographique (bilan des apports et pertes d'eau par écoulement latéral, lié à la position topographique - Le Coff et Lévy, 1991)

Ig : Indice de climat humide (normalisation pente/exposition/orientement) : aspect énergétique du climat local (d'après Becker, 1974)

S/T : Taux de saturation en oxides du sol / CN : rapport carbone/azote dans le sol / pH : mesure de l'acidité du sol

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le Cemagref a mené cinq études visant à mettre en relation la production forestière avec différents facteurs du milieu, notamment des variables décrivant l'alimentation en eau des stations. On a étudié la production de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) et du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans les hautes Cévennes et en Auvergne (figure 2). Ces essences ont été choisies car elles couvrent de vastes surfaces et sont présentes dans des conditions stationnelles variées. Elles présentent d'importantes différences de production en fonction des conditions de milieu. Par ailleurs, on a pu comparer leur comportement sur socle granitique et métamorphique, en contexte climatique méditerranéo-montagnard (hautes Cévennes), et sur substrat volcanique en climat frais et humide (Auvergne).

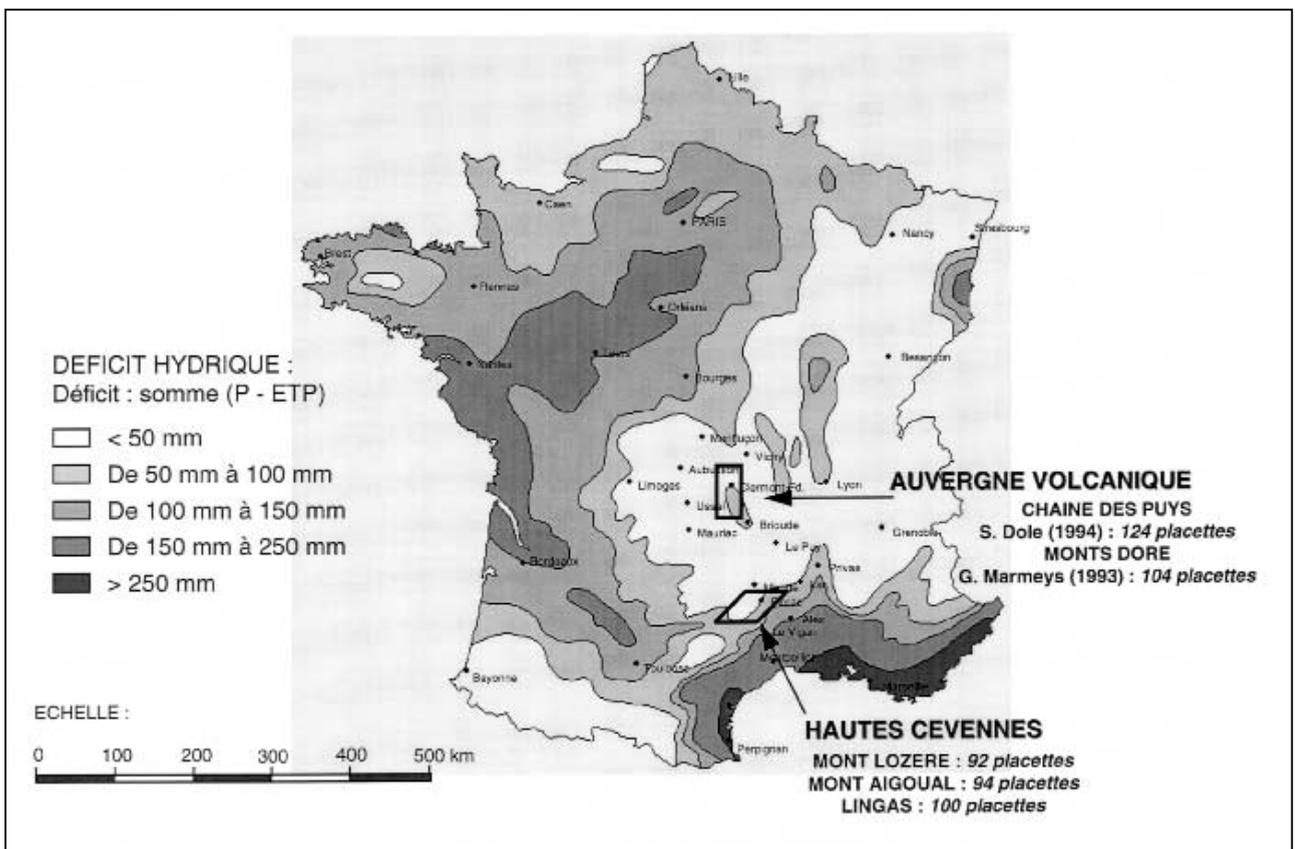
Présentation des milieux étudiés

Trois études ont été conduites dans les hautes Cévennes, dans les massifs du Mont-Lozère (Franc et Curt, 1990), de l'Aigoual et du Lingas (Curt, 1991). Il s'agit de secteurs de

moyenne montagne granitique et métamorphique, d'altitude comprise entre 900 et 1 700 mètres. La variabilité des types de stations est liée essentiellement à l'étagement altitudinal et aux variations de réservoir en eau des sols (Franc et Curt, 1990). Le contexte géochimique est acide. Les matériaux parentaux sont constitués par des formations d'origine périglaciaire, dont la texture est liée au substratum géologique. La couverture pédologique est dominée par des sols bruns acides (Brunisols oligo-saturés) associés à des sols bruns ocreux (Alocrisols). La situation de ces massifs sur la bordure sud-est du Massif Central, au contact des influences méditerranéennes, conduit à l'individualisation d'un climat de type méditerranéo-montagnard assez humide. Cependant, l'irrégularité pluviométrique estivale entraîne un déficit hydrique climatique important, de l'ordre de 50 à 150 mm selon l'altitude et la situation, qui peut constituer une contrainte importante pour la production forestière.

Deux autres études ont été menées en moyenne montagne volcanique auvergnate, sur l'épicéa commun : dans les Monts Dore (Marmeys, 1993) et dans la Chaîne des Puys (Dole, 1994). La diversité stationnelle y est plus importante que dans

Figure 2 - Carte de situation des zones d'étude en fonction du déficit hydrique estival.
Figure 2 - Map of location of surveys areas according to climatic deficit.



les Cévennes, du fait d'un contexte géologique, géomorphologique et pédologique plus varié (Curt, 1994 a). La couverture pédologique est organisée en une véritable mosaïque (Hétier, 1975). La gamme des niveaux trophiques est plus large que sur les roches acides du socle. Les Brunisols et les sols andiques désaturés (Andosols désaturés) prédominent, mais on observe aussi des sols eutrophes et mésotrophes (Andosols eutriques). Ces régions diffèrent aussi des précédentes par leur contexte bioclimatique froid et humide, caractérisé par un déficit hydrique climatique estival réduit, généralement compris entre 0 et 60 mm. Les contraintes bioclimatiques y sont plutôt d'ordre thermique (froid hivernal, gelées, effets de crête...).

Autécologie des essences étudiées

Le sapin pectiné et l'épicéa commun sont résistants au froid et leur optimum écologique est situé dans l'étage montagnard ; tous les peuplements étudiés sont situés entre 900 et 1 400 mètres d'altitude, dans l'étage montagnard. Ces essences sont réputées assez peu sensibles au niveau trophique de la station, et tolèrent des sols assez acides et désaturés (Oswald, 1969). En matière d'alimentation en eau, le sapin pectiné est réputé plus exigeant que l'épicéa et plus sensible à la sécheresse climatique et édaphique, même si des travaux récents montrent qu'il possède une stratégie d'évitement précoce (Guicherd, 1994). Le sapin pectiné présente un système racinaire profond (supérieur à 1 mètre) en conditions non contraignantes, mais Lucot (1994) a montré qu'il peut être sensible à des contraintes physiques dans le premier mètre du sol. La réputation de frugalité hydrique de l'épicéa (Lu et al., 1995) est partiellement remise en cause à la suite d'échecs répétés sur des sols à faible réserve en eau. Il est réputé avoir un enracinement traçant, essentiellement situé avant 40 cm de profondeur, et la ramification de ses pivots est située avant 1 mètre de profondeur. Il serait donc particulièrement sensible à des obstacles peu profonds dans le sol, même si le système racinaire profond prend le relais pour l'alimentation en eau en période sèche (Lucot, 1994). Lévy (1968) rappelle que cette essence peut prospector en profondeur dans les sols meubles, notamment s'ils sont insuffisamment pourvus en éléments nutritifs ; nous avons pu l'observer dans des fosses pédologiques ouvertes dans des sols ocreux sur socle granitique et métamorphique, ou dans des Andosols désaturés sur substrat volcanique.

Protocole d'analyse de la production forestière

L'objectif de ces recherches était de mettre en relation, sur un grand nombre de placettes, la production du sapin pectiné et de l'épicéa commun avec différents facteurs du milieu. La première étape a consisté à construire un plan d'échantillonnage raisonné en fonction de la variabilité du milieu analysé et de la hiérarchie des facteurs écologiques mis en évidence par la

typologie des stations forestières. On s'est notamment appuyé sur des cartes morphopédologiques (Curt, 1991, 1994 b). 512 placettes d'une surface de 6 ares ont été étudiées au total dans les hautes Cévennes et l'Auvergne (figure 2). Les données relevées sur chaque placette sont de deux ordres (figure 3) :

- des paramètres dendrométriques permettant d'évaluer la production du peuplement forestier, selon un protocole mis au point par Duplat (In Buffet et Girault, 1989). On choisit des peuplements monospécifiques, équiennes et fermés. Sur chaque placette de 6 ares, on mesure l'âge par carottage, la circonférence et la hauteur de trois des arbres dominants. La hauteur moyenne de ces trois arbres, ramenée à un âge de référence (80 ans dans les hautes Cévennes, 40 ans en Auvergne), constitue l'indice de fertilité du peuplement (Buffet et Girault, 1989). En effet, en futaie régulière, le niveau de production d'une essence peut être estimé par la hauteur dominante du peuplement à un âge de référence. On peut ensuite comparer cet indice de fertilité aux variables décrivant le milieu ;

- des facteurs du milieu entrant dans la définition des types de stations et jouant le rôle de facteurs explicatifs de la production : type de sol, position topographique, etc. Ces relevés ont été complétés par des analyses physico-chimiques d'échantillons prélevés sur fosses pédologiques.

Les critères d'alimentation en eau de la station

Évaluation du réservoir en eau du sol

Rappelons que l'alimentation en eau d'une station est liée à la capacité de stockage du sol (réservoir en eau du sol) et au bilan entre apports et départs sur le versant. L'estimation du réservoir en eau du sol (RES) a été effectuée sur le terrain en utilisant une démarche mise au point pour des productions annuelles (Hallaire, 1963 ; Duhamel, 1984). Elle ne nécessite que trois critères édaphiques appréhendés directement sur le terrain sur fosse pédologique :

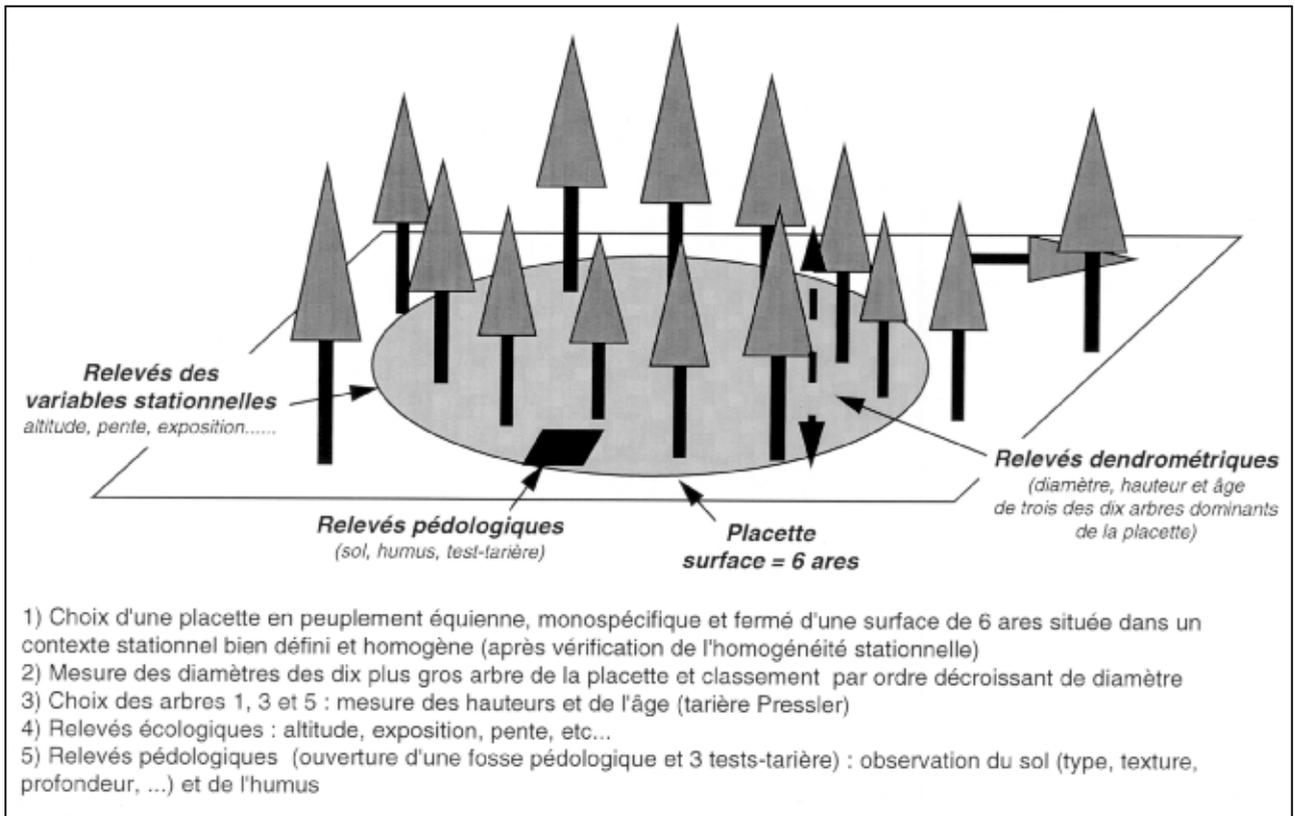
- la profondeur du sol, observée sur fosse et complétée par trois tests-tarière ;
- la texture du sol (évaluée tactilement) ;
- le pourcentage d'éléments grossiers (par convention les éléments de diamètre supérieur à 2 mm).

On utilise un tableau de correspondance entre texture et réserve en eau par unité volumique (U), mis au point par l'INRA dans un but agronomique (Jamagne et al., 1977). Chaque famille texturale présente en effet des caractéristiques hydriques propres, et notamment une valeur de "réserve en eau" théorique. A l'aide de ces trois éléments, un calcul rapide permet d'obtenir une valeur approximative de réserve en eau pour chaque horizon (Baize et Jabiol, 1995) :

$$\text{RUM de chaque horizon} = U \times (100 - \text{EG}) / 100 \times E$$

Figure 3 - Protocole de relevés sur placettes d'étude.

Figure 3 - Protocol for the survey of stands.



avec : RUM : réserve en eau maximale (en mm)

U : réservoir en eau selon le type de texture (en mm par cm d'épaisseur de sol)

E (profondeur du sol en cm) ; EG (% d'éléments grossiers dans le sol)

Le réservoir en eau du sol est estimé en additionnant les valeurs obtenues pour chaque horizon, ou plus précisément pour chaque compartiment du sol présentant une texture, une structure et une pierrosité constantes. En pratique, cela revient à évaluer la capacité de stockage en eau dans les horizons facilement pénétrables par test-tarière (figure 4). Cela inclut l'ensemble de la couverture meuble (matériaux parentaux et sol sensu stricto). La réserve en eau "cachée", notamment dans les fissures rocheuses, n'est pas prise en compte. Cette démarche s'appuie donc sur des hypothèses simplificatrices qui seront discutées plus loin : les variations intra-stationnelles de profondeur de sol ou de microtopographie sont négligées, de même que les contraintes édaphiques secondaires (enracinement, structure du sol, etc.).

Évaluation de l'alimentation en eau à

l'échelle du versant

On sait que, même sur pente faible, se produisent des transferts hydriques latéraux dans les matériaux parentaux et les sols, par ruissellement de surface, drainage hypodermique ou profond. Les volumes d'eau qui transitent ainsi sur les versants peuvent être plus importants que la capacité de stockage en eau du sol proprement dite (Dunne, 1978). Il apparaît donc nécessaire de compléter l'évaluation du réservoir en eau du sol par une estimation du bilan hydrique stationnel entre les apports et les départs le long du versant. Le Goff et Lévy (1984) ont proposé un "indice topographique" destiné à caractériser qualitativement le bilan entre apports et départs d'eau le long d'un versant. Cet indice est déterminé en prenant en compte la position de la placette sur la pente, la forme de la pente à l'endroit de la placette, et la présence éventuelle d'eau. On peut classer toute placette en fonction d'un bilan simple : soit les pertes sont supérieures aux apports, soit égales, soit inférieures. Ces auteurs ont ainsi obtenu une bonne prédiction de l'indice de fertilité du frêne en milieu faiblement différencié topographiquement. Ces résultats ont été confirmés pour le chêne rouge d'Amérique (Le Goff et al., 1994). Sur versants

Figure 4 - Méthode d'évaluation du réservoir en eau.

Figure 4 - Method for assessing Soil Water Reservoir.

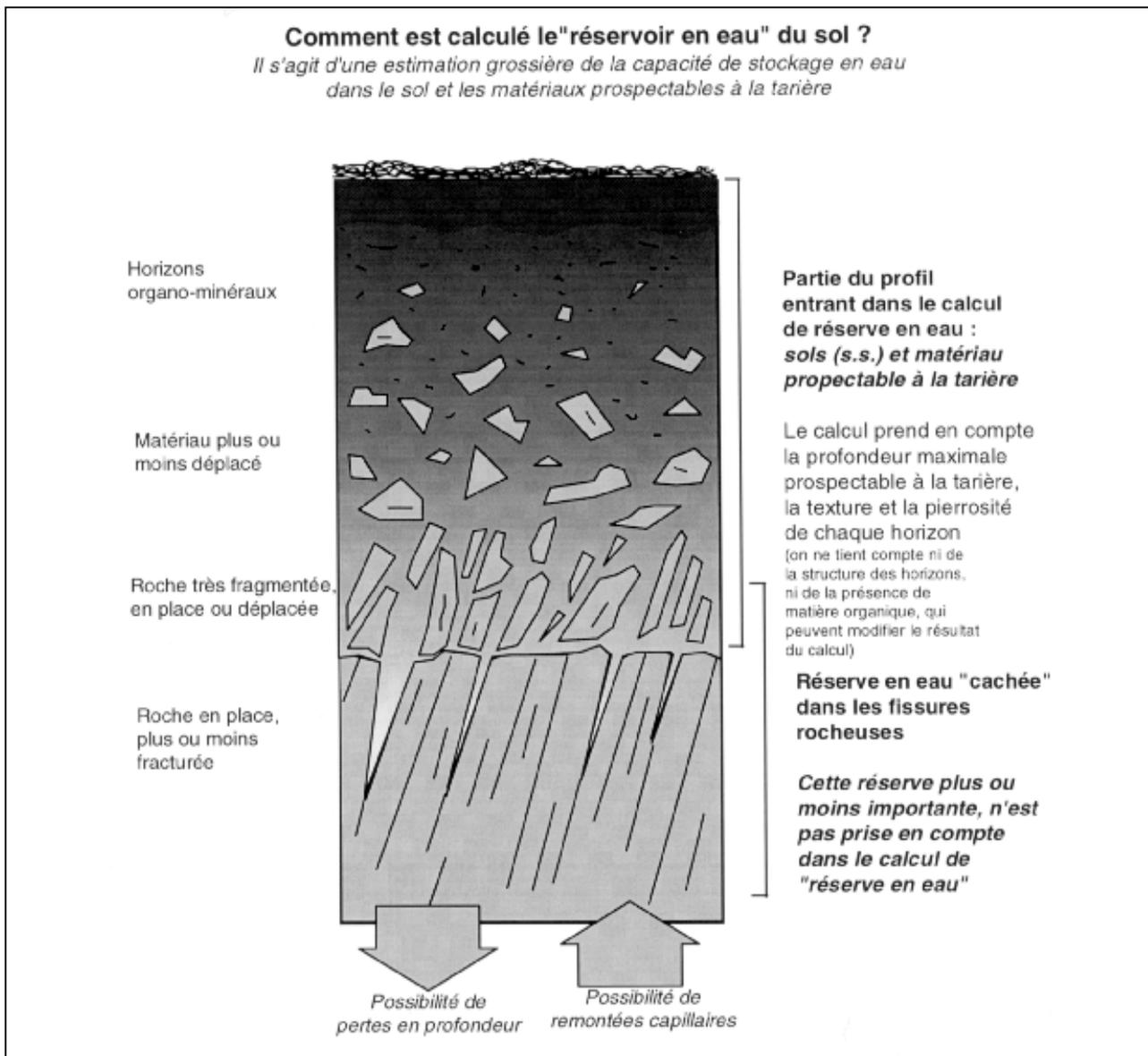


Tableau 1 - Calcul de l'indice de bilan entre apports et départs d'eau sur les versants.

Table 1 - Index of seepage on slopes.

Code	Bilan entre apports et départs	Situations
1	Départs nettement supérieurs aux apports (ruissellement ou circulation d'eau très rapide)	Sommet, crête, interfluve
2	Départs supérieurs aux apports	Haut de versant
3	Départs sensiblement égaux aux apports	Milieu de versant
4	Apports supérieurs aux départs	Bas de versant
5	Apports nettement supérieurs aux départs (accumulation d'eau, voire stagnation)	Fond de vallon, fond de vallée (avec ou sans hydromorphie)

Tableau 2 - Relation entre l'indice de fertilité et l'indice de réservoir en eau du sol.

Table 2 - Relationship between Site Index and Water Storage Capacity of Soil.

Essence/massif étudié	Substratum géologique	Pourcentage de variance de la fertilité expliquée	Coefficient de corrélation linéaire (r^2)
Epicéa commun (Lingas)	granite	51,2	46,3
Epicéa commun (Aigoual)	granite - micaschiste	93,3	84,2
Sapin pectiné (Aigoual)	granite - micaschiste	66,2	64,3

pentus, comme en moyenne et surtout en haute montagne, les circulations latérales d'eau sur les versants sont a priori importantes. Nous avons adapté l'indice de Le Goff et Lévy pour tenir compte des conditions géomorphologiques plus pentues et compartimentées rencontrées dans les hautes Cévennes et en Auvergne (tableau 1).

RÉSULTATS

Des analyses de variance et des corrélations ont été effectuées sur les relevés. On ne s'intéressera dans cet article qu'aux variables permettant de décrire l'alimentation en eau, mais on sait qu'il peut exister des inter-relations complexes entre les différents facteurs de production. Par exemple, alimentation en eau et niveau trophique du sol sont partiellement corrélés.

Relation entre réservoir en eau du sol (RES) et indice de fertilité

Un outil efficace dans le contexte méditerranéo-montagnard cévenol

La valeur de RES discrimine une part importante de la variabilité de l'indice de fertilité du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans les hautes Cévennes, sur roches granitiques comme sur roches métamorphiques (tableau 2) : le pourcentage de variance expliquée est compris entre 51,2 % et 93,3 % suivant les massifs et l'essence. Ces résultats confirment que, dans ces régions à fort déficit hydrique climatique, le réservoir en eau du sol est un facteur essentiel de la production de l'épicéa commun et du sapin pectiné (Franc et Curt, 1990 ; Curt, 1991).

La figure 5 montre que l'indice de fertilité (hauteur dominante à 80 ans) augmente régulièrement avec l'augmentation de RES. La hauteur dominante du sapin ou celle de l'épicéa varient presque du simple au double quand on passe de réservoirs en eau inférieurs à 50 mm à des valeurs supérieures à 150 mm. On notera que le sapin pectiné et l'épicéa commun

ont des indices de fertilité comparables pour la même valeur de RES. Celui-ci a été codé en classes, ce qui permet de limiter les risques d'erreur liés à des imprécisions de mesure sur le terrain. Dans le cas de l'épicéa dans le massif du Lingas, on voit que sur les sols dont le RES est inférieur à 30 mm, la hauteur dominante à 80 ans est seulement de 20 mètres, alors qu'elle est de 25 mètres dans les sols à RES compris entre 30 et 50 mm. Ceci peut s'expliquer par l'existence de très fortes contraintes hydriques sur ces sols : profondeur généralement inférieure à 30 cm, souvent fortement pierreuse, avec une matrice à texture dominante sableuse. Les observations de terrain montrent que la valeur de RES est fortement liée à l'épaisseur des matériaux parentaux et des sols. Cette couverture meuble est surtout constituée par des matériaux d'origine périglaciaire, plus ou moins érodés au cours de l'Holocène (Valadas, 1983).

L'effet de RES sur la production forestière est d'autant plus sensible que la richesse en éléments nutritifs du sol joue un rôle secondaire pour la production de ces deux essences (Franc et Curt, 1990 ; Curt, 1991). Elles sont bien adaptées aux sols relativement acides et désaturés qui constituent l'essentiel des sols rencontrés : Brunisols oligo-saturés et Alocrisols (sols bruns acides et ocreux), ce qui confirme les résultats de Becker (1982) et de Bert (1992) sur les sapinières neutrophiles et acidiphiles des Vosges et du Jura. Seuls les sols eutrophes et mésotrophes, riches en bases et très peu désaturés, présentent une fertilité nettement meilleure, mais ils sont très rares et n'occupent qu'une faible surface dans la zone d'étude. Ils sont caractérisés à la fois par un niveau trophique élevé et par un réservoir en eau important (généralement > 150 mm), car ils sont généralement situés en position de bas de versants et bénéficient d'apports colluviaux.

Un rôle limité dans les zones volcaniques auvergnates

La part de la variance de l'indice de fertilité de l'épicéa commun expliquée par la valeur de RES est plus faible dans les massifs volcaniques auvergnats : 52,6 % dans les Monts Dore, 41 % dans la Chaîne des Puys (tableau 3 ; figure 6). La principale explication est la faiblesse du stress hydrique climatique : le défi-

Figure 5 - Relation entre le réservoir en eau du sol et l'indice de fertilité du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans l'Aigoual et le Lingas (Cévennes).

Figure 5 - Relationship between Water Storage Capacity of Soil and Site index for Silver fir and Norway spruce in the Aigoual and Lingas massives (Cevennes).

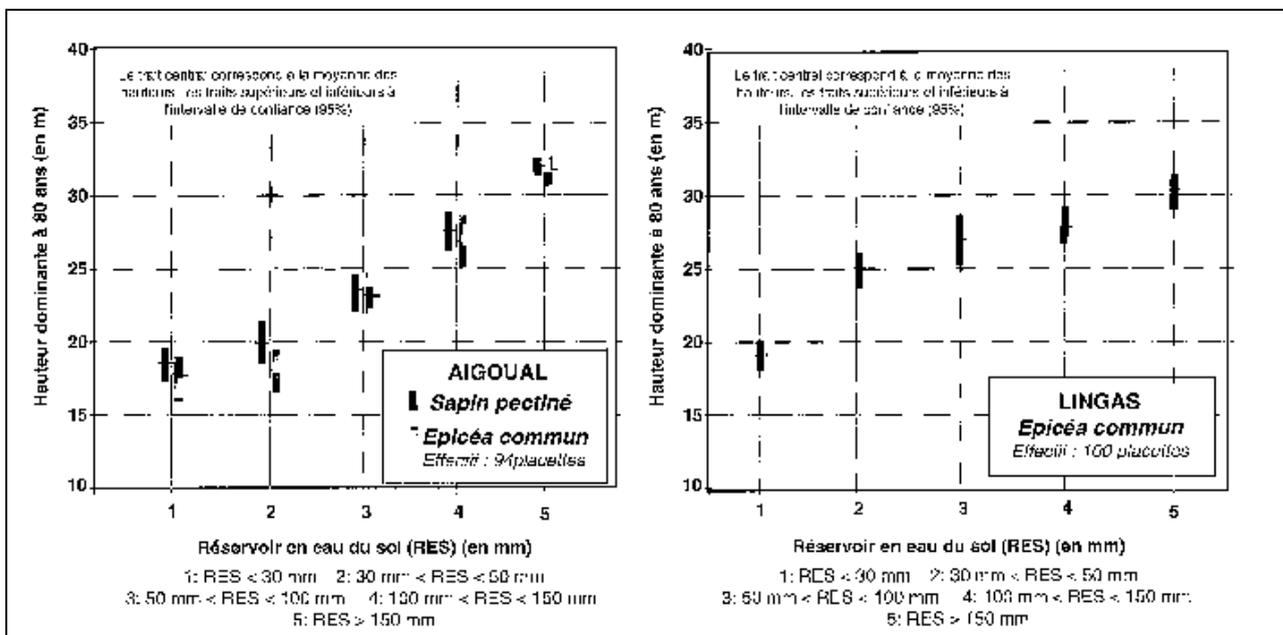


Tableau 3 - Relation entre caractéristiques hydriques du sol et de la station et indice de fertilité du sapin pectiné et de l'épicéa commun (% de variance expliquée).

Table 3 - Relationship between hydric characteristics of stands and forest sites and Site Index for Silver fir and Norway spruce (% of variance explained).

	Indice de bilan d'eau	Profondeur du sol	Pierrosité (horizon C)	Texture (horizon C)	Réservoir en eau du sol
Mt. Lozère - sapin pectiné	63 *	56 *	ns	ns	71,1 *
Aigoual - sapin pectiné	16,1	24,6	28,3	ns	66,2 *
Aigoual - épicéa c.	83,7 *	54,3 *	52,2 *	ns	93,3 *
Lingas - épicéa c.	30	29,9	10,1	27,7	51,2 *
Chaîne Puys - épicéa c.	28	42	10	ns	41
Monts Dore - épicéa c.	29	15,1	ns	ns	52,6 *

ns : valeur non significative

* valeur fortement significative (test d'analyse de variance)

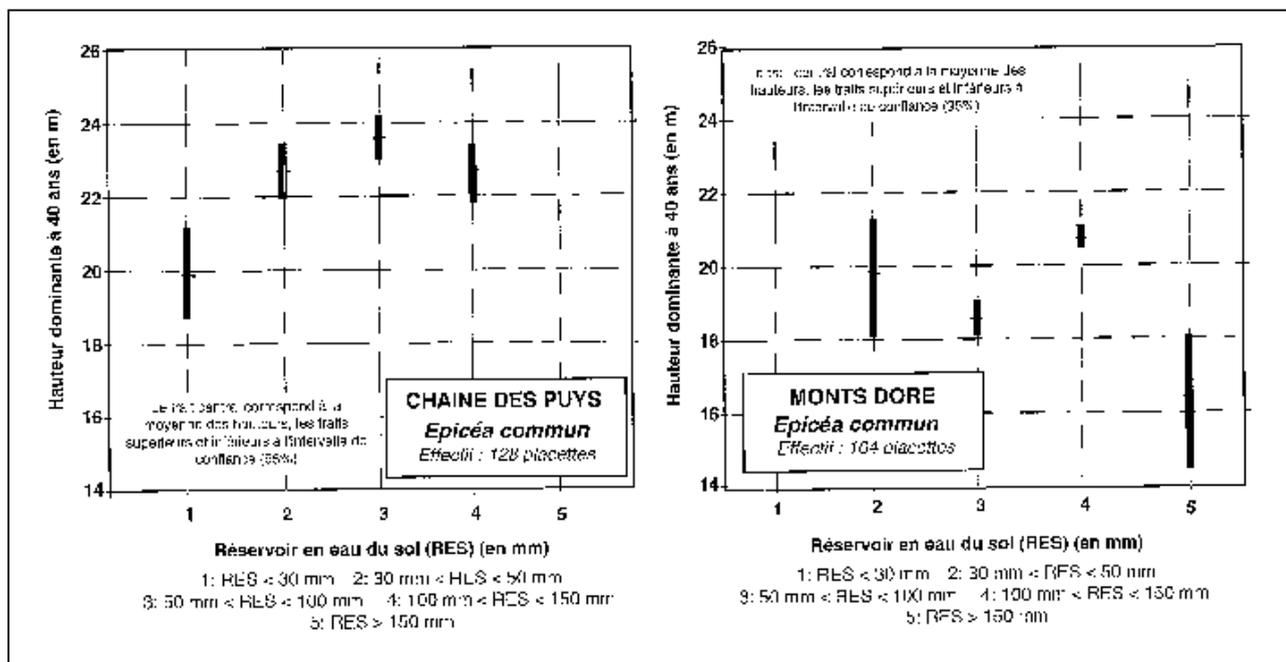
cit hydrique estival est compris entre 0 et 60 mm pour les placettes étudiées. Les conditions sont donc peu favorables à la mise en évidence du rôle de réservoir en eau du sol dans la production forestière. Si l'estimation de la capacité de stockage en eau du sol est donc essentielle dans les régions souffrant d'un déficit climatique marqué, elle l'est moins dans les régions plus humides. Par contre, sur substratum volcanique en Auvergne,

deux types de variables expliquent une part prépondérante de l'indice de fertilité de l'épicéa : le topoclimat, et le niveau trophique des sols (taux d'aluminium libre, taux de saturation, pH, rapport C/N).

Relation entre indice de fertilité et variables physiques du sol

Figure 6 - Relation entre l'indice de fertilité de l'épicéa commun et le réservoir en eau du sol dans les Monts Dore et la Chaîne des Puys.

Figure 6 - Relationship between Site Index and Soil Water Reservoir for Norway spruce in the Monts Dore and the Chaîne des Puys.



Pour mieux comprendre l'influence de la variable synthétique "réservoir en eau du sol", il est intéressant d'étudier l'effet des trois variables permettant son calcul : profondeur du sol, pourcentage d'éléments grossiers et texture de la matrice (tableau 3).

Relation entre profondeur du sol et production

On admet généralement que la profondeur (ou le volume de sol) prospectable par les racines est un bon indicateur de la fertilité forestière (Pritchett, 1979). Elle conditionne en effet l'alimentation en eau et en éléments nutritifs de l'arbre, et influe sur la structure de l'enracinement et la capacité d'adaptation de l'arbre à la station. Dans les études présentées ici, l'efficacité de cette variable dépend du contexte bioclimatique et géopédologique. Dans certains cas, la profondeur explique plus de 50 % de la variance de l'indice de fertilité (tableau 3). Plus souvent, les valeurs sont faibles, voire très faibles comme dans le cas de l'épicéa commun dans les Monts Dore (15,1 %) : ce critère est alors inopérant pour prévoir la production de l'épicéa. Cela semble dû en premier lieu à l'utilisation du test-tarière pour l'évaluation de la profondeur du sol, qui conduit généralement à une sous-estimation du volume de sol réellement prospecté par les racines. On observe aussi que la liaison entre profondeur du sol et indice de fertilité est moins forte qu'entre RES et indice de fertilité (tableau 3). Ceci indique

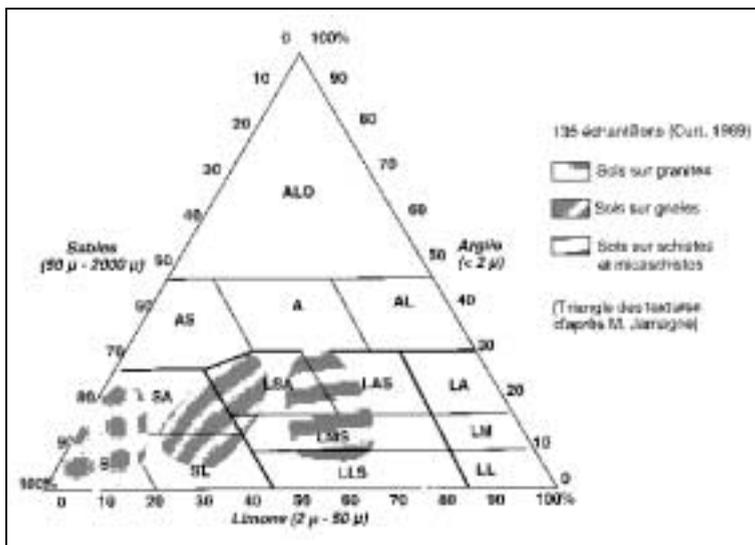
que l'épaisseur du substrat meuble, considérée isolément, ne suffit pas à prévoir la production de ces essences. C'est bien la capacité du réservoir-sol à stocker de l'eau qui doit être évaluée. Par ailleurs, pour une même essence et une même gamme de profondeur de sol, l'utilisation des ressources en eau varie suivant d'autres contraintes physiques ou chimiques. Dans le cas de l'épicéa commun dans la Chaîne des Puys, la profondeur du sol explique 42 % de la variance de l'indice de fertilité, c'est-à-dire autant que RES. Cela peut s'expliquer par l'homogénéité des textures et des pierrosités des matériaux parentaux et des sols volcaniques de cette région. Il s'agit essentiellement de projections scoriacées emballées dans une matrice à dominante limoneuse. Dans ce cas, la prise en compte de la profondeur apporte autant d'information que le calcul de réserve en eau, tout en étant plus rapide à mettre en œuvre.

Relation entre pierrosité et production

La relation entre charge en éléments grossiers du sol et production végétale est complexe. Les forestiers admettent empiriquement qu'une pierrosité faible, surtout dans le cas de cailloux de petite dimension, peut avoir un effet stimulant sur la colonisation racinaire et dans une certaine mesure, sur la production de biomasse aérienne (Gras, 1994 ; Lucot non publié). Par contre, la forte pierrosité des sols calcaires constitue la

Figure 7 - Relation entre la texture du sol et le substratum géologique dans les hautes Cévennes.

Figure 7 - Relationship between soil texture and type of rocks in the high Cevennes.



contrainte majeure pour l'enracinement des sapinières et des chênaies franco-comtoises (Lucot, 1995). Cette contrainte dépend de la forme et de l'orientation des éléments grossiers. Dans les hautes Cévennes granitiques et métamorphiques comme sur substratum volcanique en Auvergne, la pierrosité seule ne discrimine qu'une faible part de l'indice de fertilité du sapin et de l'épicéa (tableau 3). Nous n'avons pas pu mettre en évidence de relation nette entre pierrosité et production, même s'il existe une relation statistique correcte dans le cas de l'épicéa dans le massif de l'Aigoual. Aucun seuil de pierrosité n'a pu être établi. Ceci peut s'expliquer par la nature et la disposition des éléments grossiers ; ils sont constitués par des blocs arrondis sur granites et basaltes, ou des "plaquettes" sur micaschistes. Ils sont généralement disposés en "vrac" du fait de leur mise en place par gélifluxion. Il n'est donc pas possible de mettre en évidence un effet d'obstacle pour l'enracinement, même sur roche feuilletée comme sur schiste et micaschiste. Par ailleurs, ces éléments grossiers d'origine essentiellement périglaciaire (Curt, 1991) sont peu altérés, donc et peu aptes à une rétention d'eau. Dans ces conditions, on a éliminé la pierrosité du calcul du réservoir en eau du sol : en défalquant le pourcentage d'éléments grossiers du calcul du réservoir en eau du sol, on améliore la relation avec l'indice de fertilité (tableau 3). Une meilleure connaissance des contraintes édaphiques liées à la pierrosité impliquerait une analyse détaillée des éléments grossiers (densité, forme, disposition, etc.), comme pour l'établissement de l'indice de pierrosité sur sols calcaires (Lucot et Gaiffe, 1995).

Relation entre texture du sol et production

On sait que la texture du sol joue un rôle essentiel dans la production forestière dans des cas extrêmes et/ou contrastés : matériaux argileux présentant des contraintes physiques (compacité, aération, variations saisonnières de comportement hydrique...), présence de ruptures texturales dans les matériaux

parentaux et les sols. Dans les études présentées ici, la variable "texture" du sol n'influe pas, considérée isolément, sur l'indice de fertilité (tableau 3). La principale explication tient à la relative homogénéité texturale des sols rencontrés, avec une dominante de textures équilibrées (limono-sablo-argileuses) ou sableuses. Les seules variations texturales observées sont liées à la nature du substratum géologique. L'analyse granulométrique de 135 échantillons a mis en évidence une forte relation entre la nature et la structure pétrographique de la roche (schistes, mica-schistes, gneiss), et la texture des sols (figure 7). Ceci peut s'expliquer par la prédominance de matériaux d'origine périglaciaire, formés par la gélifraction et la gélifluxion d'altérites. Ces formations de versants jeunes, relativement peu transformées chimiquement, sont caractérisées par des textures peu variables spatialement et fortement lithodépendantes.

Relation entre bilan d'eau sur les versants et production

Le bilan entre apports et départs d'eau sur le versant explique une part importante des variations de l'indice de fertilité pour le sapin pectiné au mont Lozère (63 % de la variance expliquée) et pour l'épicéa commun dans le massif de l'Aigoual (83,7 %) (tableau 3). Dans ces régions fortement compartimentées, à pentes fortes, les transferts d'eau par ruissellement sur les versants sont très importants. La figure 8 montre qu'il existe un fort gradient d'indice de fertilité de l'épicéa commun en fonction du bilan entre apports et départs d'eau sur le versant dans le massif du Lingas.

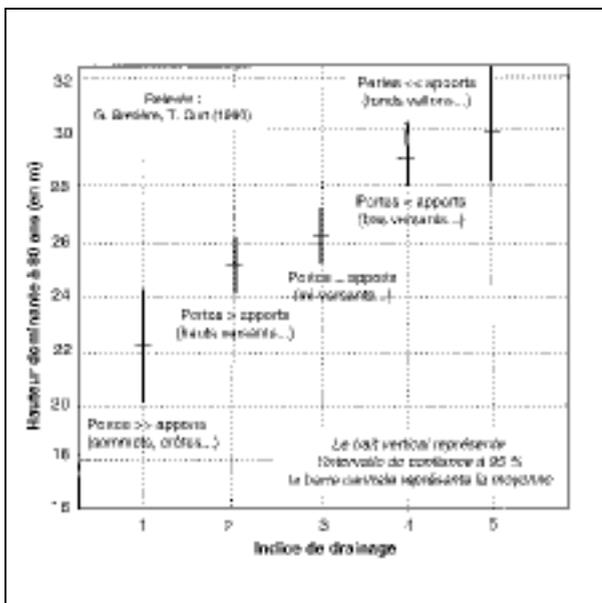
Dans le massif volcanique de la Chaîne des Puys, l'indice de drainage (bilan entre apports et départs d'eau) explique 28 % de la variance de l'indice de fertilité. On observe que seuls trois cas très contrastés sont bien discriminés : bilan déficitaire sur les hauts de versants et les sommets de cônes de scories, bilan équilibré en milieu de versant et sur plateaux, accumulation relative en bas de versants et dans les fonds de vallons. Cette situation est souvent observée, comme dans le cas du sapin pectiné en moyenne montagne jurassienne (Bert, 1992) : les hauts de versants ont une production forestière réduite, les bas de versants une forte production, et les placettes situées à mi-

Tableau 4 - Relation entre le bilan d'eau sur le versant et l'indice de fertilité de l'épicéa commun dans la Chaîne des Puys (Dole, 1994).

Situation	Alimentation en eau	Indice de drainage	Effectif	Hauteur dominante à 40 ans (en m)	Intervalle de confiance (en m)
Sommets et hauts de versants	Départs > apports	2	7	18,3	17 à 19,5
Versants, plateaux	Départs = apports	3	90	21,7	20 à 24,6
Vallons et bas de versants	Départs < apports	4	31	25,0	24,4 à 25,6
Total / Moyenne			124	23,5	17 à 25,6

Figure 8 - Relations entre l'indice de fertilité et le bilan d'eau sur le versant pour l'épicéa commun dans le massif du Lingas (forêt domaniale du Lingas).

Figure 8 - Relationships between Site Index and Seepage Index for Norway spruce in the Lingas massive (State Forest of Lingas).



versant ont une production moyenne (tableau 4). Cela semble dû à la convergence de plusieurs facteurs de production, dépendant de la position topographique de la placette : niveau trophique de la station (circulation des solutions et des bases échangeables), bilan thermique (bilan radiatif, topoclimat), alimentation en eau. En moyenne montagne, les hauts de versants ont généralement des sols superficiels, pierreux et acides (sols peu évolués, très humifères) et/ou lessivés, un

microclimat défavorable (vent, neige, gel...). Les bas de versants bénéficient de plusieurs influences favorables : microclimat abrité (sauf gelées nocturnes), sols épais et enrichis par colluvionnement, frais, etc. Les milieux de versants présentent souvent des caractéristiques intermédiaires avec des compensations de facteurs.

DISCUSSION

L'intérêt d'une estimation simplifiée du réservoir en eau du sol

Les résultats présentés ici montrent qu'une estimation simplifiée du réservoir en eau du sol peut être effectuée sur certains substrats, en prenant en compte l'épaisseur, la texture et la charge en éléments grossiers du sol et des matériaux parentaux. Les capacités de stockage en eau des sols calculées sont cohérentes avec celles de la base de données géographique des sols de France (Jamagne et al., 1995). Cet indice constitue un bon indicateur de la hauteur dominante du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans les hautes Cévennes. Ceci peut s'expliquer par plusieurs raisons :

- l'épicéa commun et surtout le sapin pectiné sont relativement peu sensibles aux variations de niveau trophique du sol, mais plus exigeantes en terme d'alimentation en eau ; elles se prêtent donc bien à la mise en évidence des facteurs hydriques sur la production. Par ailleurs, dans ces régions qui connaissent un déficit hydrique climatique estival important, il existe des phénomènes de compensation hydrique par le sol. Ceci est confirmé par le fait que les types d'écosystèmes forestiers sont fortement liés aux variations d'alimentation en eau (Franc et Curt, 1990) ;

- sur granite comme sur roches métamorphiques (schistes, micaschistes, gneiss), les matériaux parentaux et les sols rencontrés présentent des profils assez homogènes : les variations texturales et structurales sont peu importantes, et il est possible de calculer une valeur approximative de réservoir en eau. De même, les variations spatiales dans les matériaux

parentaux sont limitées : il est ainsi relativement facile de vérifier l'homogénéité de la placette et d'affecter à chaque placette une valeur moyenne de réservoir en eau. Il est possible d'effectuer des tests-tarière sans trop de difficulté dans ces matériaux relativement meubles ;

- l'étude a porté sur des peuplements âgés (âge de référence : 80 ans) : on intègre ainsi les variations saisonnières de bilan hydrique du sol et on peut admettre que l'ensemble du profil est prospecté et mis à contribution pour alimenter les arbres, notamment les horizons profonds du sol qui participent d'autant plus à l'alimentation en eau des arbres que le déficit climatique est marqué (Badot et al., 1994).

Ces conditions favorables s'observent souvent sur substratum granitique, métamorphique et volcanique, dans le Massif Central. Les versants sont largement recouverts de matériaux parentaux d'origine périglaciaire (Valadas, 1983), relativement meubles et prospectables. Dans ce cas, la cartographie des matériaux parentaux favorise l'étude de la production forestière en permettant une estimation grossière du réservoir en eau. L'approche morphopédologique, qui permet de mieux comprendre la répartition spatiale de ces matériaux sur les versants, constitue une méthode efficace pour prévoir les variations de la production forestière à l'échelle du massif forestier ou du versant (Curt, 1991). Par exemple, en forêt domaniale de la Loubière (Mont Lozère), sur matériaux limoneux, la carte de l'indice de fertilité du sapin pectiné se superpose assez fidèlement à celle de l'épaisseur des matériaux parentaux (Franc et Curt, 1990).

Les limites de l'utilisation de RES pour prévoir la production forestière

Il existe un certain nombre de limites d'utilisation de RES pour la prévision de la production forestière. Cette méthode ne semble pas applicable dans les cas suivants :

- quand le déficit hydrique climatique est faible, comme en moyenne montagne auvergnate, les conditions ne sont pas favorables à la mise en évidence du rôle de RES dans la production forestière. Le déficit hydrique climatique étant de l'ordre de 0 à 60 mm entre 900 et 1400 mètres d'altitude, deux sols dont le RES est estimé à 50 et 100 mm ne peuvent pas discriminer la production forestière, toutes choses égales par ailleurs. Par ailleurs, les matériaux parentaux sont généralement épais et assez continus : en moyenne, RES compense le faible déficit climatique ;

- inversement, quand le déficit hydrique climatique est très important (souvent > 150 mm) comme dans les zones méditerranéennes, ce sont les variables bioclimatiques (pluviométrie, déficit hydrique...) qui expliquent les principales différences de production forestière (Nouals et Boisseau, 1991). Dans ces régions, la discontinuité des couvertures pédologiques et l'intensité des précipitations entraînent de

forts taux de ruissellement, réduisant d'autant le rôle du stockage de l'eau dans le sol. En période de sécheresse, le RES ne parvient pas à compenser le déficit climatique, même pour des essences réputées frugales au plan hydrique. Dans ce cas, il semble particulièrement important de tenir compte des contraintes géopédologiques : fracturation de la roche-mère, disposition des éléments grossiers, pendage des roches, etc. (Bonfils, 1978 ; Barthès et Bornand, 1986 ; Bruckert et Gaiffe, 1991) ;

- dans le cas de sols présentant de fortes variations verticales de texture, de structure (sols polygéniques), ou des contraintes physiques secondaires (compacité, aération, niveaux indurés...), l'évaluation de RES est rendue difficile par l'hétérogénéité de comportement hydrique du profil pédologique. Certaines caractéristiques édaphiques propres aux sols forestiers peuvent modifier leur capacité de rétention en eau : densité apparente, présence de matière organique des horizons de surface, compacité du sol, structure des horizons organo-minéraux, présence de calcaire actif, fortes ruptures texturales, nature des argiles, etc. ;

- dans le cas de couvertures pédologiques très hétérogènes spatialement, l'estimation d'une valeur moyenne de réservoir en eau du sol sur la placette d'étude n'est pas possible. Sur des substrats métamorphiques fortement érodés, ou sur certains substrats calcaires (plateaux caussenards karstifiés), les caractéristiques physiques des matériaux parentaux varient très rapidement à l'échelle de la placette ou du versant. L'estimation de la profondeur prospectable par les racines est malaisée du fait de la présence de matériaux en "poches" impossibles à sonder à la tarière, voire de pertes d'eau par infiltration. L'utilisation réelle par les arbres du réservoir en eau du sol, notamment en période de stress hydrique, fait souvent appel à un enracinement profond situé dans ces fissures rocheuses qui ne peut pas être pris en compte. Dans ce cas, il apparaît peu utile de chercher à calculer une valeur de RES très imprécise. On cherchera plutôt à caractériser les contraintes édaphiques par rapport à l'enracinement

- enfin, on sait que des erreurs d'estimation de l'ordre de grandeur du réservoir en eau peuvent être commises sur le terrain (Baize et Jabiol, 1995) : l'appréciation tactile de la texture est parfois difficile, surtout dans le cas de sols polycycliques et de matériaux remaniés. Il en est de même pour l'évaluation de la pierrosité d'un sol. Mais le principal risque d'erreur réside dans une mauvaise appréciation de la profondeur du sol par le test-tarière dans les conditions citées plus haut.

CONCLUSIONS

Une estimation simplifiée du réservoir en eau du sol (Jamagne et al., 1977 ; Hallaire, 1963) permet de décrire une part importante des variations de l'indice de fertilité du sapin

pectiné et de l'épicéa commun dans les hautes Cévennes granitiques et métamorphiques. Dans ces régions, il existe un important déficit hydrique climatique et la capacité de stockage en eau du sol joue un rôle primordial dans la production forestière. La méthode utilisée ne nécessite que quelques éléments de diagnostic facilement accessibles sur le terrain (profondeur, texture et pierrosité du sol), et reproductibles par tout utilisateur avec un peu d'expérience pratique. Cela permet d'éviter des mesures longues destinées à décrire l'enracinement, qui varie suivant les essences et le contexte géopédologique. Mais cela nécessite notamment une bonne estimation de la profondeur de sol réellement exploitée par les racines, souvent difficile par test-tarière. Cette démarche peut cependant s'appliquer à une large part du Massif Central, notamment sur socle granitique et métamorphique, ou sur substrat volcanique, quand il existe des matériaux parentaux facilement prospectables par un test-tarière. Dans ces conditions, la cartographie morphopédologique et la prise en compte des caractéristiques physiques et de la logique de répartition spatiale des matériaux parentaux peuvent apporter des éléments utiles pour le diagnostic des potentialités forestières.

Cette méthode d'estimation du réservoir en eau du sol ne peut pas être utilisée partout. Elle ne permet de discriminer qu'une faible part de l'indice de fertilité de ces essences dans les régions à faible déficit hydrique climatique, comme en moyenne montagne volcanique. Elle est inutilisable quand l'estimation de la profondeur est difficile, ou quand il existe une très forte variabilité spatiale des profondeurs et des caractéristiques physiques des matériaux parentaux. Dans le cas du Massif Central, cette démarche est a priori mal adaptée aux régions qui ont été fortement érodées (bordure vivaro-cévenole, hautes terres volcaniques, plateaux caussenards...), ou dans les régions caractérisées par la fréquence des matériaux présentant des contraintes physiques et hydriques particulières (argiles compactes, ruptures texturales...). De même, elle ne permet pas de prendre en compte certaines conditions d'alimentation en eau particulières (pertes par soutirage, remontées capillaires...), et évidemment le cas des sols mal drainés.

Des travaux récents (Barry et al., 1988 ; Badot et al., 1994 ; Lucot, 1994) montrent l'intérêt d'une description géopédologique détaillée pour mieux comprendre le comportement hydrique du sol. Il apparaît ainsi nécessaire de décrire sur chaque profil les différents "compartiments" géopédologiques : compartiment de surface (sol s.s.), moyen (essentiellement matériau parental) et profond (matériaux et roches). Chacun de ces compartiments présente un comportement hydrique spécifique et participe à l'alimentation en eau de la végétation. Des recherches complémentaires sont menées actuellement sur les contraintes d'enracinement qui peuvent limiter l'alimentation en eau : pierrosité, disposition des éléments grossiers (Lucot, 1994), fracturation et disposition des roches (Bruckert et Gaiffe,

1991), etc. Enfin, une meilleure estimation de la production

forestière nécessite d'effectuer pour chaque placette d'étude

un bilan entre apports et départs d'eau sur le versant.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. Gilles Agrech (Cemagref) pour ses illustrations et l'Office National des Forêts (Gard, Lozère, Puy-de-Dôme) qui nous a permis de travailler en forêt domaniale.

BIBLIOGRAPHIE

- Badot P.M., Lucot E., Bruckert S., 1994 - L'humidité du sol en profondeur constitue, en milieu de journée, la principale source de variation du potentiel hydrique foliaire de peuplements de Chêne (*Quercus* sp.). C.R. Acad. Sci. Paris, Sci. De la Vie, 1994, 317 : 341-345.
- Baize D., Jabiol B., 1995 - Guide pour la description des sols. INRA éd., 375 p.
- Barry R., Plamondon A.P., Stein J., 1988 - Hydrologic soil properties and application of a soil moisture model in a balsam fir forest. Canadian J. Forest Res., 1988 vol. 18, 427-433
- Barthes 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, 95-106.
- Becker M., 1982 - Influence relative du climat et du sol sur les potentialités forestières en moyenne montagne. Exemple des sapinières à Fétuque (*Festuca silvatica* Vill.) dans les Vosges alsaciennes. Ann. Sci. forest. 1982, 39 (1), 1-32.
- Becker M., Le Goff N., 1988 - Diagnostic stationnel et potentiel de production. Rev. Forest. Fr. 1988 (XL), 29-43.
- Bert G.D., (1992) - Production du sapin pectiné et qualité de son bois selon les types de stations dans le Jura français et suisse. Rev. Forest. Fr. XLIV - 5 (1992), 415-429.
- Bonfils P., 1978 - Le classement des sols en vue de la reforestation en zone méditerranéenne. Rev. Forest. Fr., vol. 30, n° 4, 271-282.
- Bonneau M., 1963 - L'importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière. Rev. Forest. Fr., 1963 (1), 19-31.
- 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.
- Buffet M., Girault D., (coord.) 1989 - Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques. Cemagref, 150 p.
- Curt T., 1991 - Dynamique des versants dans les hautes Cévennes méridionales (Massif Central, France). Relations avec les sols et la mise en valeur forestière. Thèse Univ. Paris I, 435 p.
- Curt T., 1994 (a) - Typologie des stations forestières des zones volcaniques d'Auvergne (Chaîne des Puys, Monts Dore, Cézallier, monts du Cantal). Cemagref, 250 p.
- Curt T., 1994 (b) - Typologie des stations forestières : apports d'une approche morphopédologique. Application en moyenne montagne volcanique (Massif Central français). In : Colloque "Méthodes et réalisations de l'écologie du paysage pour l'aménagement du territoire", Québec, juin 1994, Polyscience Publ., Québec, 1994, 75-84.
- Dole S., 1994 - Etude des relations station-production pour l'épicéa commun dans la Chaîne des Puys. Cemagref, 50 p.
- Duchaufour P. 1989 - Pédologie et groupes écologiques. I : Rôle des facteurs physiques : aération et nutrition en eau. Bull. Ecologie, 1989, 20 (2), 99-107.
- Duhamel D., 1984 - Statut écologique du chêne pédonculé et du chêne sessile dans le quart nord-ouest de la France. Enitef/INRA Nancy, 150 p.
- Dunne T., 1978 - Field studies of hillslope processes. In : Hillslope hydrology,

- Kirkby M.J. (ed.), J. Wiley and Sons, Chichester.
- D'Epenoux F., 1992 - Relations milieu-production. Application au Pin noir d'Autriche dans les Alpes externes méridionales. Th. Univ. Grenoble 1, 226 p.
- Franc A., Curt T., 1990 - Etude des relations station-production pour le sapin pectiné en forêt domaniale de la Loubière (Lozère). Cemagref, 30p.
- Gras R., 1994 - Sols caillouteux et production végétale. INRA éd., 175 p.
- Guicherd P., 1994 - Water relations of European silver fir (*Abies alba* Mill.) in 2 natural stand in the French Alps subject to contrasting climatic conditions. *Ann. Sci. For.* (1994) 51, 599-612.
- Hallaire M., 1963 - L'eau et la production végétale. INRA, Paris.
- Hetier J.M., 1975 - Formation et évolution des Andosols en pays tempéré. Th. Univ. Nancy, 1975, 195 p.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Begon J.C., Mori A., 1977 - Relations entre texture et réserve en eau du sol. *Bull. Techn. Inf. Min. Agr.*, 1977 : 324-325.
- Jamagne M., Hardy R., King D., Bornand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 3, 1995, 153-172.
- Le Goff et Levy, 1984 - Productivité du Frêne (*Fraxinus exelsior* L.) en région Nord-Picardie. *Ann. Sci. forest.* 1984, 41 (2), 135-170.
- Le Goff N., Colin-Belgrand M., Muller G., 1994 - Croissance et productivité du chêne rouge dans le Nord-Est de la France. In : J. Timbal et al. (coord.) *Le chêne rouge d'Amérique*. INRA, pp. 158-178.
- Lévy G., 1968 - Importance des propriétés du sol pour l'enracinement de *Picea exelsa* et de *Pinus silvestris*. *Ann. Sci. Forest.*, 1968, 25 (3), 157-188.
- Long G., Daget P., Poissonet J., Romane F., Guillermin J.L., Wacquant J.P. 1972 - Contribution de la phytocécologie au diagnostic des conditions hydriques des sols. *Bull. Techn. Inf. Min. Agr.*, 1972, n° 271-272, 750-758.
- Lu P., Biron P., Bréda N., Granier A., 1995 - Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) under soil drought in the Vosges mountains : water potential, stomatal conductance and transpiration. *Ann. Sci. For.* (1995) 52, 117-129.
- Lucot E., 1994 - Rôle de la fissuration des roches et de la pierrosité des sols sur la prospection racinaire et l'alimentation hydrique : application au fonctionnement des écosystèmes forestiers. Thèse Pédologie, Univ. Besançon, 170 p.
- 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.
- Marmeys G., 1993 - Etude des relations station-production pour l'épicéa commun dans le nord-est des Monts Dore. Cemagref, 50 p.
- Nouals D., Boisseau B., 1991 - Le Pin brutia en France continentale. Cemagref, 86 p.
- Oswald H., 1969 - Conditions forestières et potentialités de l'épicéa en Haute-Ardèche. *Ann. Sci. forest.* 1969, 26 (2), 183-224.
- Pritchett W. L., 1979 - Properties and Management of Forest Soils. J. Wiley and Sons, New-York, 500 p.
- Rameau J.C., Mansion D., Dumé G., 1993 - Flore forestière française. Tome 2 : Montagnes. *Idf/Derf/Engref*, 2 421 p.
- Sebillotte M., 1988 - Les transferts d'eau sol-système racinaire. In : R. Calvet (ed.), *Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère*. INRA, 171-179.
- Valadas B., 1983 - Les hautes terres du Massif Central français. Contribution à l'étude des morphodynamiques récentes sur versants cristallins et volcaniques. Thèse Univ. Paris I, 2 tomes, 950 p.