

La culture de la forêt

par Gérard TENDRON

*Ingénieur du Génie rural, des Eaux et des Forêts
Chef de Centre de l'Office national des Forêts
(Fontainebleau)*

Cet article est le deuxième volet d'un triptyque dont la première partie publiée dans la «Voix de la Forêt» 1983/2 portait le titre «Connaissance de l'Arbre».

2 - ÉCOLOGIE DE LA FORET

L'étude de l'anatomie et de la physiologie mais aussi des mécanismes de croissance et de régénération des arbres forestiers, abordée dans le précédent article ne suffit pas pour comprendre la complexité biologique de la forêt, qui tient aux multiples associations d'êtres vivants qu'on y rencontre, et aux interactions permanentes qui s'exercent entre elles et avec les autres facteurs du milieu. C'est cet aspect de la connaissance de la forêt que nous allons aborder dans le présent article sous le titre «Écologie de la forêt».

Le mot écologie créé par le biologiste allemand HAECKEL en 1866 peut se définir comme suit : « l'écologie est la science qui étudie les conditions d'existence des êtres vivants et les interactions de toutes natures qui existent entre ces êtres vivants d'une part, entre ces êtres vivants et leur milieu d'autre part » (DAJOZ).

Nous ne pouvons aborder en détail l'écologie forestière, mais nous nous limiterons à l'examen des principaux facteurs du milieu : climat, sol, êtres vivants qui ont une interaction avec la forêt, et que le forestier doit parfaitement connaître là où il intervient pour cultiver la forêt. Nous essaierons ensuite de dégager quelques notions plus générales sur les biocénoses, et les écosystèmes forestiers qui ont été particulièrement étudiés dans les réserves biologiques de la forêt domaniale de Fontainebleau.

I - LES INTERACTIONS ENTRE LA FORET ET SON MILIEU

1.1 - Le microclimat forestier

La forêt dont les phénomènes vitaux essentiels – floraison, fructification, germination et production – dépendent étroitement du climat local, agit à son tour sur le rayonnement solaire, les précipitations, l'humidité atmosphérique, la température, le vent et l'évaporation. Il existe ainsi en forêt un climat différent de celui rencontré en plein découvert. On l'appelle le microclimat forestier.

1.1.1 - La lumière. Le rayonnement solaire, défini par l'énergie reçue par unité de surface, est en partie réfléchi vers le ciel par le couvert forestier (pour 10 à 20%) et pénètre en partie dans le couvert forestier. Il peut arriver au sol directement à travers les interstices du feuillage ou après avoir traversé les limbes foliaires où intervient une forte absorption sélective, qui se traduit par une lumière en forêt riche en infrarouge et pauvre en ultra-violet, sous les peuplements feuillus (ROUSSEL 1963), alors que sous les peuplements résineux la lumière est fortement affaiblie, mais peu modifiée qualitativement.

La consistance des peuplements forestiers et notamment l'absence ou la présence de feuilles liée à la saison, mais

aussi l'intensité des éclaircies pratiquées modifie sensiblement le rayonnement relatif transmis au sol (cf. figure 1-1 bis).

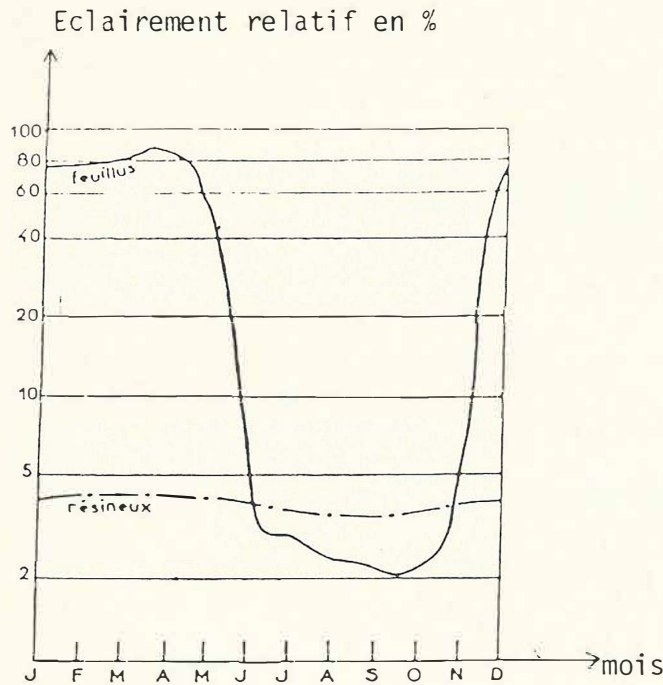


Fig.1 - Variation annuelle de l'éclairage relatif

Pourcentage de transmission de la lumière

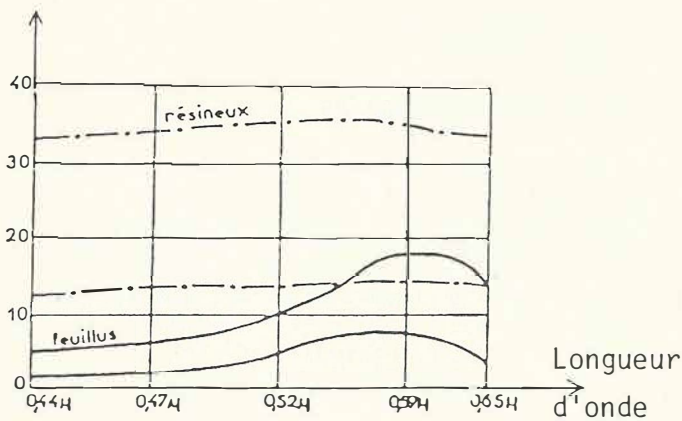


Fig.1bis - Transmission sélective de la lumière

Le rayonnement solaire joue un rôle essentiel notamment pour l'assimilation chlorophyllienne dont il constitue la source d'énergie (à partir des rayonnements de deux bandes du spectre : dans le bleu entre 4000 et 4800 Å et dans le rouge entre 6200 et 6800 Å, l'énergie est captée par les molécules de chlorophylle et utilisée pour les réac-

tions endothermiques de la synthèse des hydrates de carbone à la base de l'édification et de la croissance des végétaux ligneux).

Le forestier va donc s'efforcer par la sylviculture d'intervenir sur l'importance de l'ombre et de la lumière en forêt de façon différenciée selon les stations, les essences, les stades de vie d'un peuplement forestier.

Ainsi la croissance des jeunes plants ou semis naturels sera différente suivant la nature et l'importance du couvert forestier : les semis du chêne, essence dite de lumière ou héliophile, nécessitent un éclairage assez important pendant le jeune âge (10% d'éclairage supplémentaire chaque année pendant les 10 premières années) ce qui conduit le forestier à pratiquer des coupes progressives parmi les semenciers au-dessus d'une régénération naturelle (4 à 5 passages en coupe espacés de 2 à 3 ans). Au bout d'une dizaine d'années les semis doivent être en «plein découvert». A défaut ils s'étioilent et meurent. Par contre, le semis du hêtre «essence d'ombre» ou sciaphile supporte un couvert important pendant le jeune âge et se maintient sous les grands arbres, attendant pour accélérer sa croissance d'être mis en lumière (trouée liée à la mort d'un chêne).

Le phénomène est particulièrement bien illustré dans les réserves biologiques de Fontainebleau (Tillaie, Gros-Fouteau) où la quasi totalité des semis de chênes qui apparaissent régulièrement disparaissent et ne permettent donc pas le renouvellement de la futaie de chêne qui meurt, alors que les semis de hêtre envahissent progressivement le sous-bois, permettant à cette essence de se substituer au chêne. Si le forestier n'intervenait pas en coupe de régénération, on peut penser que les grandes chênaies des plateaux limoneux de Fontainebleau, cultivées autrefois en haute futaie, seraient supplantées par des futaies irrégulières de hêtre.

Les besoins des semis ou plantation en lumière requièrent non seulement la coupe progressive des arbres qui les dominent (et pour certaines essences comme le mélèze un éclairage total dès l'installation) mais aussi des «dégagements» travaux consistant à éliminer annuellement les rejets de taillis, les pousses de végétaux ligneux ou herbacés (bouleaux, fougères, callune, ronce, graminées), qui dominent les semis, diminuent considérablement leur éclairage et conduit à leur étiolement et à leur mort. Ces dégagements pratiqués manuellement (à la serpe ou au croissant) ou mécaniquement (au girobroyeur) doivent être réalisés pendant la saison de végétation (mai à septembre), très tôt si la concurrence est vive (pin contre les fougères), plus tard pour bénéficier de la protection d'une insolation trop forte si la concurrence est plus faible (septembre contre les ronces).

Les expériences de ROUSSEL ont également montré qu'un éclairage trop brutal de jeunes semis en détruisant les auxines de croissance pouvait avoir des effets néfastes sur l'élongation et l'orientation de croissance des jeunes arbres (c'est «l'effet manchon» qui se traduit par la stimulation sur les lisières de l'élongation du côté ombragé).

La lumière joue également un rôle essentiel au stade de la croissance des gaulis, perchis et jeunes futaies dans l'élagage naturel des arbres : lorsque les feuilles d'un rameau reçoivent une quantité d'énergie lumineuse trop faible pour que l'intensité de l'assimilation chlorophyllienne soit supérieure à l'intensité de la respiration, leurs tissus et ceux des rameaux qui les portent meurent (JACQUIOT) ; ainsi les rameaux bas des arbres, les moins éclairés dépérissent

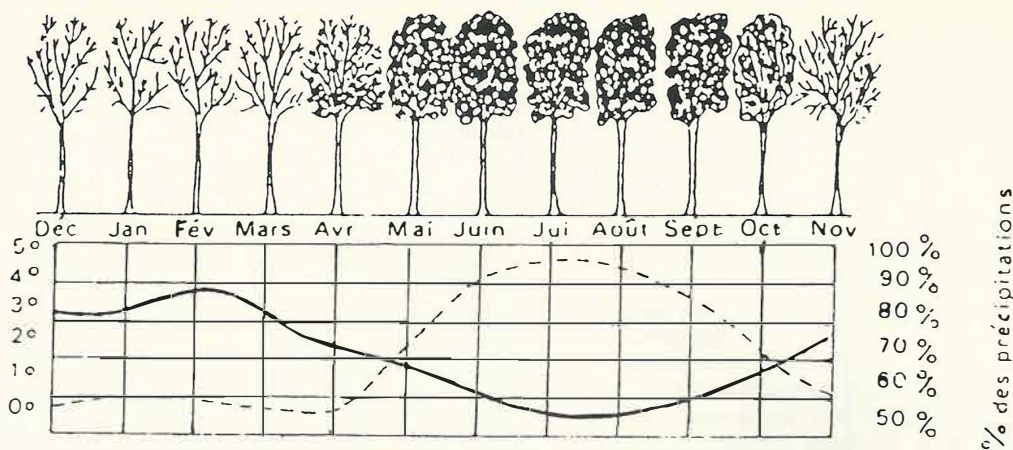


Fig. 2. — Réduction des écarts de température sous peuplement au cours des saisons.

Trait plein : Pourcentage des précipitations passant à travers les couronnes (100 % = terrain nu).

Trait interrompu : écart entre température maxima et température minima.

et meurent et finissent par tomber, la plaie naturelle se cicatrisant naturellement. L'élagage sera d'autant plus précoce et intense que les peuplements forestiers seront plus « fermés » donc ne permettront pas l'éclairage des parties basses des fûts. Ceci explique, en partie, la densité élevée des plantations forestières (actuellement les chênes sont plantés à 1,60 m les uns des autres à Fontainebleau alors qu'à 200 ans au moment de leur récolte, leur développement optimal ne sera obtenu que si leur espacement est de 12 mètres environ). Ceci explique aussi que les coupes d'éclaircie pratiquées par les forestiers dans les perchis et futaies, doivent être assez rapprochées dans le temps (8 à 10 ans entre deux coupes) pour ne pas « ouvrir » trop le peuplement et éviter le développement de gourmands sur des troncs, brutalement éclairés.

Il convient de souligner que le rôle de la lumière sur les phénomènes décrits ci-dessus peut varier selon l'âge de l'arbre et son espèce, mais que tous les arbres adultes ont besoin de lumière pour atteindre leur plein développement.

Enfin le forestier a observé de longue date que les arbres fructifiaient d'autant mieux que leur houppier était mieux éclairé. Ceci justifie les coupes préparatoires à l'ensemencement qui dégagent les cimes des futurs semenciers et permettent d'augmenter leurs fructifications.

1.1.2 - La température. La température de l'air varie sous le couvert forestier dans le même sens que le rayonnement solaire. Dans la journée les sommets des couronnes absorbent une partie du rayonnement et chauffent l'air ambiant. C'est à leur niveau que se situent les températures maximales en fin d'après-midi et le matin, alors que ce maximum descend au milieu des houppiers au cours de la journée. Un refroidissement important se manifeste au niveau des cimes après le coucher du soleil. Sous l'abri des couronnes et jusqu'à une hauteur de 2 mètres il fait plus chaud en forêt qu'un terrain découvert la nuit, l'inverse le jour.

D'une manière générale le couvert forestier abaisse les températures moyennes ($-1,5^{\circ}$ en forêt de Fontainebleau) et les minima nocturnes (jusqu'à 6°C l'hiver et 2 à 3°C l'été), et réduit les écarts entre maxima et minima au cours de la journée (cf. figure 2).

Ceci est particulièrement important pour la protection des jeunes semis, qui peut-être assurée par un couvert forestier, spécialement contre les gelées tardives de printemps : en plein découvert les températures minimales se situent la nuit au niveau du sol et sur une tranche de 1 à 2 mètres de hauteur, alors que le couvert forestier maintient des températures plus élevées à ce niveau. De même, une totale herbacée protège les semis des gelées trop fortes (cf. figure 3-3 bis).

Aussi la technique de la régénération naturelle par coupes progressives, ne fait qu'entrouvrir le couvert au moment de l'installation du semis pour le protéger des gelées, tout en lui assurant un éclairage suffisant. Pour la protection des jeunes plantations le maintien d'un abri, même latéral joue également un rôle de protection très utile.

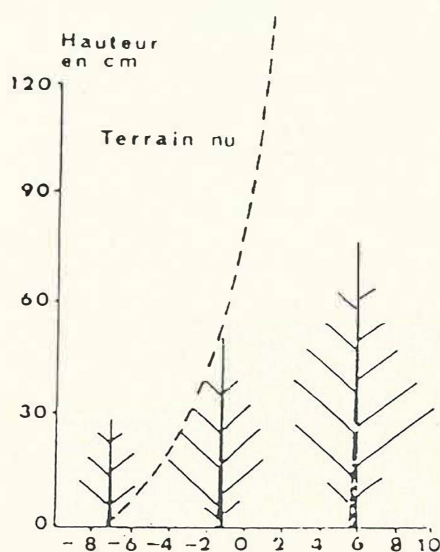


Fig.3 - Situation thermique des jeunes plants, la nuit, en terrain nu
En tireté : profil de température

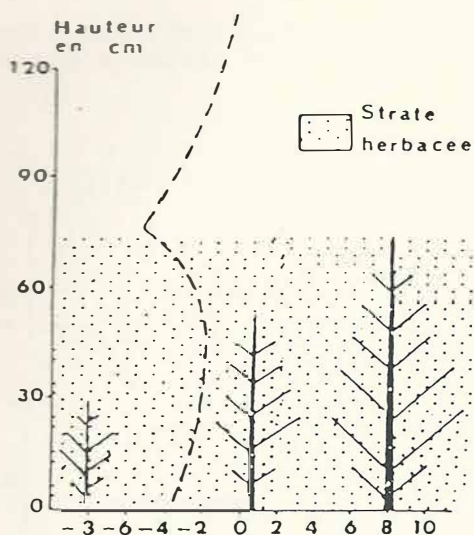


Fig.3bis - Situation thermique des jeunes plants, la nuit, en strate herbacée
tireté : profil de température

Par ailleurs, la température constitue un facteur limitant de l'installation et du développement des espèces et détermine des zones de végétation selon la latitude et des étages de végétation selon l'altitude (pour ce dernier aspect l'exposition joue également un rôle important par les différences de température et d'éclairement dans la répartition différenciée des espèces : cf. figure 4).

A l'échelle d'une forêt l'exposition à des effets comparables. Ainsi à Fontainebleau, les rebords de plateaux calcaires exposés au sud peuvent porter la végétation caractéristique du prébois de chêne pubescent normalement absent à ces latitudes, alors que les versants frais exposés au nord portent généralement une hêtraie pure.

Les températures moyennes ont moins d'importance que les extrêmes de température qui occasionnent souvent des dégâts considérables : les fortes chaleurs entraînent des déséquilibres hydriques pouvant aller jusqu'au point de flétrissement permanent (la grande sécheresse de l'été 1976 a affaibli quantité d'arbres en forêt de Fontainebleau) ; elles peuvent occasionner des brûlures de l'écorce spécialement chez le hêtre. Les gelées fortes, brutales ou prolongées occasionnent l'éclatement du bois (gélivures) ou des fentes entre deux couches ligneuses adjacentes (roulures) et peuvent entraîner la mort : à Fontainebleau le verglas de janvier 1879 et les grands froids de décembre 1879 puis de décembre 1880 (- 30°) ont décimé une part importante des pins maritimes introduits sous François 1er, écimé et brisé un grand nombre de pins sylvestres et accentué le dépérissement des plus vieux peuplements feuillus, obligeant à des coupes extraordinaires de châblis sur toute la forêt représentant 500 000 stères soit environ 10 récoltes annuelles.

De même, le verglas et le givre occasionnent des ruptures mécaniques de branches et de houppiers.

Les gelées tardives de printemps ont un rôle particulièrement néfaste sur la floraison donc sur les fructifications des arbres, mais aussi sur le débourrement des bourgeons : ceux brûlés par le gel sont généralement remplacés par des bourgeons proventifs qui en se développant donnent un port buissonnant à l'arbre.

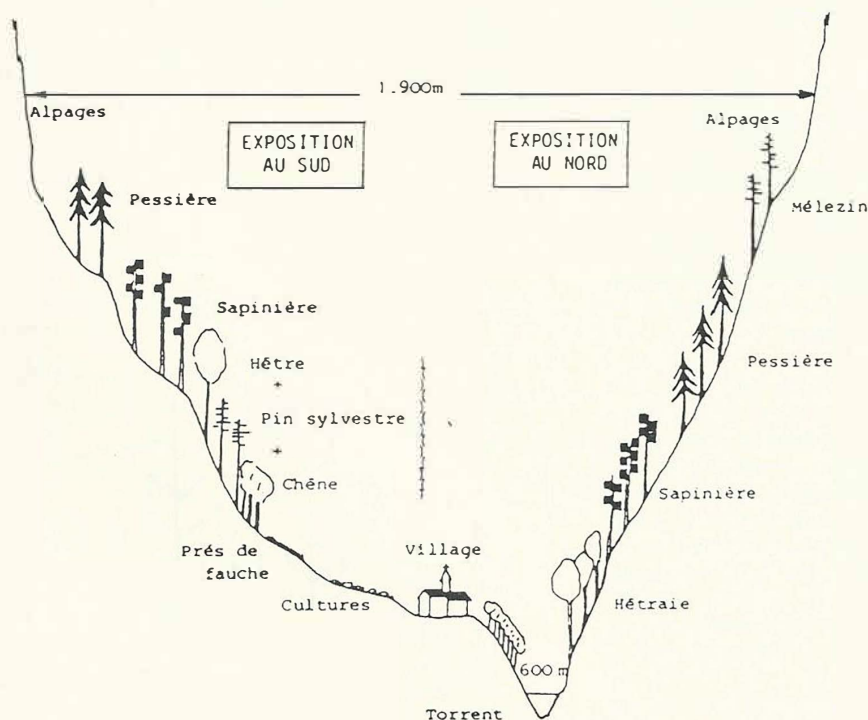


Fig.4 - Influence de l'exposition et de l'altitude ex.: Les étages de végétation d'une vallée savoyarde

Enfin, convient-il de souligner les écarts de température considérable qu'un peuplement forestier supporte non seulement au cours d'une année mais tout au long de sa vie : à Fontainebleau les extrêmes absolus constatés sur un siècle s'établissent à : $- 30^{\circ}9$ et $+ 40^{\circ}2$.

1.1.3 - Les précipitations. Les précipitations qui permettent l'alimentation en eau jouent un rôle capital et multiple dans la vie d'un arbre.

L'eau nécessaire aux synthèses organiques (celluloses et lignines notamment) initiées au niveau des feuilles permet aussi à partir des poils absorbants des radicelles de véhiculer dans la sève brute les sels minéraux du sol. Les transports de matière entre racines et feuilles et cellules actives (sève brute et sève élaborée) sont assurés par des courants d'eau, dont le moteur principal serait la transpiration.

L'eau consommée par le végétal et en grande partie évaporée doit à tout moment être compensée par une absorption racinaire égale (un arbre peut prélever dans le sol en période de végétation plusieurs centaines de litres d'eau par jour).

Les pluies constituent dans nos régions la source principale d'alimentation en eau des arbres. La partie la plus importante arrive directement au sol en cas de précipitations abondantes, une autre partie est interceptée par les couronnes (cette interception peut atteindre 40% pour un peuplement fermé de sapin, 20% pour un peuplement de hêtre), une troisième partie ruisselle le long des troncs avant d'atteindre le sol. Ces deux dernières fractions qui limitent le ruissellement direct au niveau du sol permettent à la forêt de jouer un rôle protecteur du sol en favorisant l'infiltration progressive de l'eau de pluie, permettant ainsi l'alimentation des nappes phréatiques et des sources.

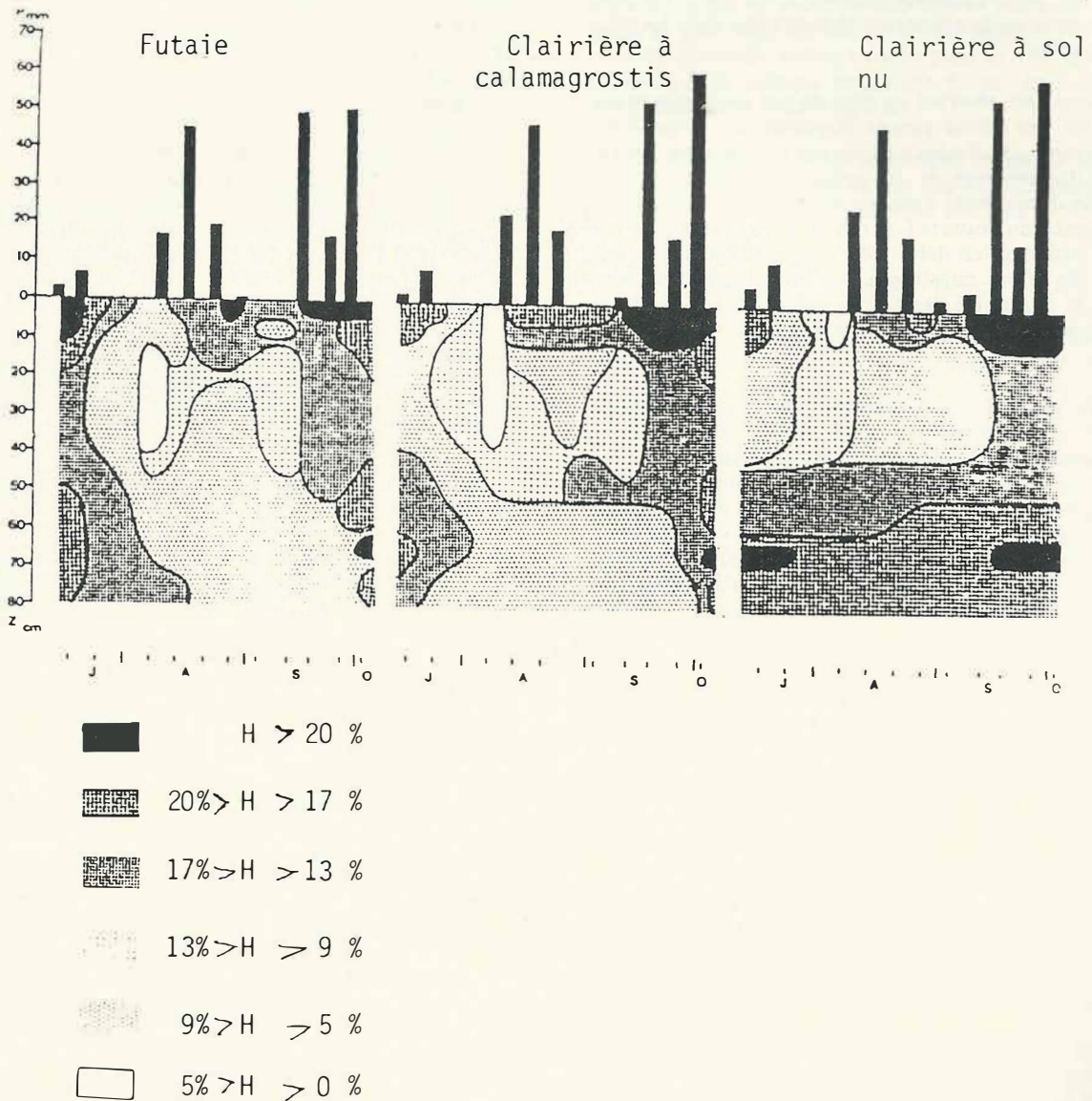


Fig.5 - Evolution de la teneur en eau du sol pendant l'été 1975

L'eau interceptée par les cimes pourrait être en partie absorbée par les feuilles, une autre partie évaporée compensant partiellement la transpiration et améliorent ainsi le bilan hydrique du végétal.

Le brouillard condensé en forêt beaucoup plus qu'en terrain découvert, sert également à l'alimentation en eau des arbres. De même, la neige en région montagneuse. Dans ce dernier cas, la fonte de la neige est ralentie par le couvert forestier, ce qui contribue à la régularisation du débit des torrents, et protège contre les avalanches.

La température et l'humidité interfèrent souvent dans leurs actions sur la vie des arbres, notamment dans le phénomène d'évapotranspiration (évaporation des surfaces inertes + transpiration des surfaces végétales).

Inversement le couvert forestier modifie l'évapotranspiration : celle-ci diminue quand on réduit la densité des arbres (éclaircies fortes), augmente lorsque le peuplement avance en âge pour diminuer vers 40 à 60 ans ; est plus importante dans les peuplements résineux que dans les peuplements feuillus.

Par ailleurs, les réserves en eau du sol qui permettent l'alimentation des arbres varient largement en cours d'année et au cours des années successives en fonction des variations de température et de précipitation (qui peuvent être considérables), mais aussi en fonction de la nature et de l'importance du couvert (cf. figure 5). Des déficits d'alimentation prolongés en début de saison de végétation peuvent avoir des effets catastrophiques sur la reprise des jeunes plants, la croissance des arbres, voire leur survie (après la grande sécheresse de 1976 par exemple).

1.1.4 - Le vent. Il joue le plus souvent un rôle néfaste sur la forêt. Il augmente la transpiration et diminue fortement les possibilités d'assimilation des végétaux, donc leur croissance ; il est responsable de déformations sur les lisières exposées aux vents dominants (arbres en drapeau) ; il est responsable de châblis (chute d'arbre) ou de volis (chute du houppier et d'une partie du tronc) au cours de tempêtes ou d'ouragans, pouvant aller jusqu'au déchi-

quage des arbres sur pied au cours de tornades (en 1967 la futaie de hêtre du Puits au Géant a été entièrement renversée, alors que sur l'ensemble de la forêt de Fontainebleau les châblis inventoriés ont porté sur 35 000 arbres de toutes espèces représentant 36 000 m³ de bois d'œuvre et d'industrie et 18 000 stères de bois de chauffage, l'équivalent d'une récolte annuelle).

Le vent joue par contre un rôle favorable dans la pollinisation des arbres et de transport des graines légères : c'est ainsi que les graines de pin sylvestre disséminées par le vent ont colonisé de nombreux peuplements clairs de chêne dans le sud de la forêt de Fontainebleau. Ceci conduit le forestier à éliminer lors des coupes d'ensemencement les arbres à graine légère, dont il ne souhaite pas l'extension (exemple : érables, pins, charmes qui ont une propension spectaculaire à se régénérer à distance par l'action du vent).

En forêt cependant les vents de vitesse moyenne sont considérablement ralentis par la friction des masses d'air sur les peuplements forestiers : c'est au niveau des couronnes que la réduction est la plus forte. La vitesse du vent en forêt est atténuée de 80% au sommet des arbres, à 60% à la base par rapport à la vitesse en plein découvert.

Pour lutter contre les effets néfastes du vent sur les peuplements forestiers, le sylviculteur essaie d'augmenter la résistance des arbres en pratiquant des éclaircies régulières et précoces qui permettent d'assurer aux arbres un enracinement plus solide et un tronc plus robuste. De même, le mélange d'essences forestières et le maintien d'un sous-étage augmentent la rugosité et freinent la vitesse du vent. Enfin, la protection des lisières qui doivent être maintenues complètes est indispensable. Inversement les coupes trop brutales qui «isolent» les sujets restants, (surtout s'ils ont été maintenus serrés longtemps) peuvent être à l'origine de châblis importants.

En conclusion, on a vu que le microclimat forestier est sensiblement différent du climat en plein découvert : température moyenne plus basse, humidité moyenne plus élevée, mouvements d'air atténués, éclaircissement réduit. Les interactions entre les facteurs climatiques et la forêt sont

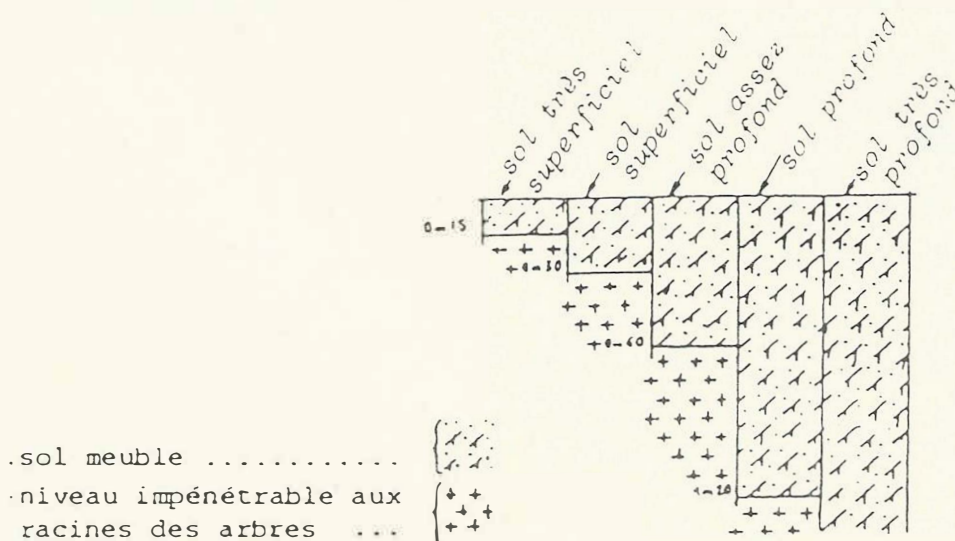


Fig.6 - La profondeur des sols

multiples et variés. Il appartient au sylviculteur par un choix judicieux des essences à cultiver qui ont toutes des exigences particulières vis-à-vis du climat, et par des interventions sylvicoles appropriées d'en tirer partie pour obtenir la meilleure adaptation des essences au climat local et une croissance convenable.

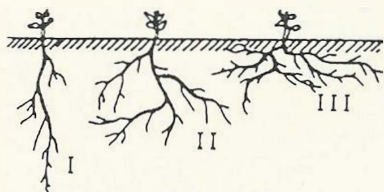
1.2 - Le sol forestier

A la fois support de l'arbre par le système racinaire, réserve d'eau et de sels minéraux indispensables à la nutrition des arbres, le sol conditionne dans une large part, la nature, la production et la pérennité de la forêt. Mais modifié lui-même par le peuplement forestier qu'il porte, la connaissance de ses potentialités et de son évolution est essentielle pour la culture de la forêt.

Il convient de souligner que la forêt, culture peu exigeante, car exportant très peu des matières nutritives du sol, est cantonnée en France généralement sur les terres les moins riches, jugées inaptées à l'agriculture.

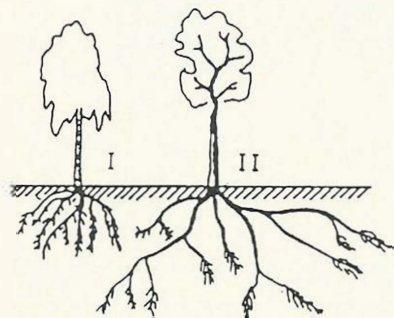
1.2.1 - Propriétés physiques

● La profondeur : elle conditionne la pénétration des racines donc la stabilité de l'arbre et la capacité nutritive du milieu (cf. figure 6) selon que l'arbre a un enracinement pivotant (chêne) ou traçant (hêtre) (cf. figure 7-7 bis).



- I - Type pivotant : pin maritime, chêne
- II - Type intermédiaire : frêne, sapin
- III - Type superficiel : épicéa, hêtre

Fig.7 - Mode d'enracinement des jeunes arbres



- I - Intensif : essence frugale (bouleau)
- II - Extensif : essence exigeante (frêne)

Fig.7bis - Types d'enracinement des arbres adultes

● La texture : définie par la composition granulométrique de ses éléments (argile 0 à 2 μ , limon 2 à 50 μ , sable 50 à 2000 μ) et leur proportion, conditionne la rétention de l'eau et des éléments nutritifs (les terres franches à texture équilibrée en sables, limons et argiles sont les plus favorables) ; la circulation de l'air et la pénétration des racines (cf. figure 8). Les feuillus préfèrent les terres fortes, les résineux les terres légères.

● La structure : elle est déterminée par la cimentation en agrégats des matériaux du sol réalisée par les colloïdes. Les agrégats ménagent des alvéoles permettant la circulation de l'air et de l'eau, (cf. figure 9).

Si la texture est fine (argile) et la structure peu aérée : le sol est asphyxiant. Inversement si la structure est particulière avec entraînement des éléments colloïdaux, le sol se comporte comme une passoire.

Une texture équilibrée, associée à une structure en grumeaux (agrégats) assurant une bonne porosité (de l'ordre de 60% dont 30% de macroporosité pour la circulation de l'eau et autant de microporosité pour la rétention), permet de retenir un volume important d'eau capillaire, tout en permettant les circulations d'air.

Les aunes et les saules admettent les sols à texture fine et marécageux, les peupliers et les chênes pédonculés, les sols humides, les pins préfèrent les sols secs.

1.2.2 - Propriétés chimiques. Les propriétés chimiques d'un sol dépendent étroitement des éléments libérés par la décomposition de la roche-mère, et de ceux libérés par la décomposition de la matière organique. C'est sur celle-ci, qui résulte de la nature et de la culture du peuplement en place, que le forestier peut intervenir.

La matière organique qui provient des organes caducs des peuplements comprend essentiellement : des holosides (celluloses, hémicelluloses, composés carbonés en chaînes) ; des substances carbonées à noyaux aromatiques (tannin, lignine) ; des protides (acides aminés, peptides, protéides) ; des lipides.

Elle subit des transformations successives : un fractionnement par la macrofaune ; l'humification qui aboutit à la synthèse de substances organiques nouvelles, différentes des substances végétales (c'est l'humus au sens strict, qui peut subir ensuite une minéralisation) ; la minéralisation qui conduit à des composés organiques plus simples, puis des composés minéraux sous l'influence des microorganismes.

Au cours de ces transformations de la litière on assiste à une perte de poids : perte de CO_2 , lessivage des matières hydrosolubles ; une augmentation progressive de la teneur en matières humiques (avec augmentation de la capacité totale d'échange) ; une augmentation de la teneur relative en azote ; une augmentation de la teneur relative en bases.

Les composés minéraux dissous dans l'eau du sol, immédiatement absorbables par les racines permettent une nutrition directe des plantes, mais ils sont très sensibles au lessivage dans les horizons profonds. Par contre, l'alimentation minérale de l'arbre peut être assurée de manière régulière par la dissociation en ions des molécules solubles et de la fixation de ces ions à la surface des particules colloïdales du sol.

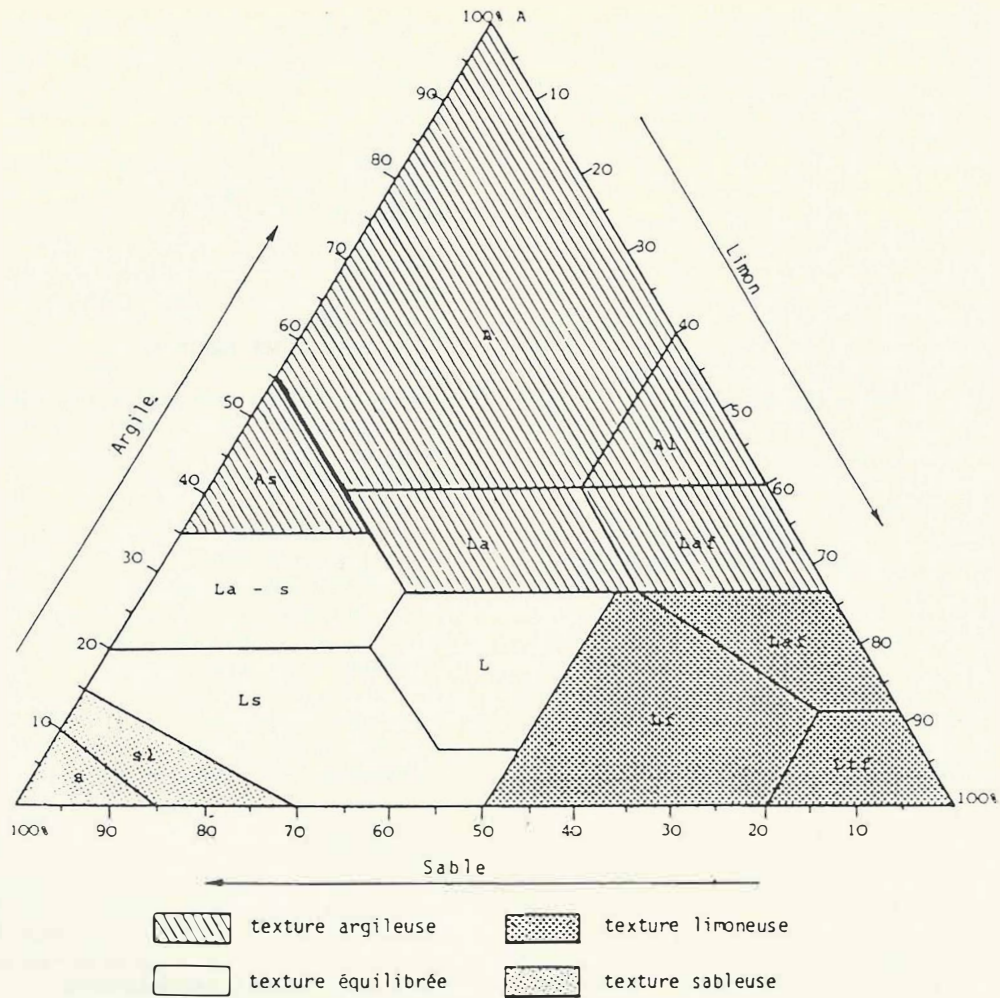
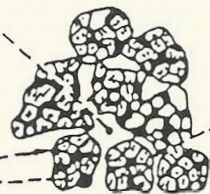


Fig.8 - Diagramme des textures

vide non
capillaire
(eau libre)

Ⓘ

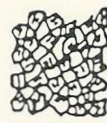


Vide
capillaire
(eau de rétention)

Elément grossier
Ciment colloïdal } Agrégat



Ⓙ



Ⓚ

- I - Structure en agrégats.
- II - Structure détruite (*particulaire*) avant entraînement des éléments colloïdaux.
- III - Structure détruite (*particulaire*), les éléments grossiers sont empilés sans lien.

Fig.9 - Différents types de structure de sol

Les colloïdes les plus représentés dans le sol sont des colloïdes électronégatifs : argiles, colloïdes humiques et silice colloïdale, susceptibles de fixer des cations. Ils sont dispersés en milieu alcalin et floculés en milieu acide ou par fixation de cations métalliques. Les colloïdes humiques et les argiles sont susceptibles de former ensemble un «complexe» dit «complexe absorbant» beaucoup plus résistant à la défloculation que chacun des deux colloïdes seul (cf. figure 10).

Les colloïdes électronégatifs ont leurs charges généralement occupées par des cations dont les plus fréquents sont H^+ , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ . Ces cations sont «échangeables», c'est-à-dire qu'ils peuvent passer facilement du colloïde au milieu liquide environnant (= solution du sol). Ce phénomène est essentiel, il conditionne la vie des plantes. Il est mesuré par la capacité totale d'échange exprimée en milli-équivalent pour 100 g de sol (1 milli-

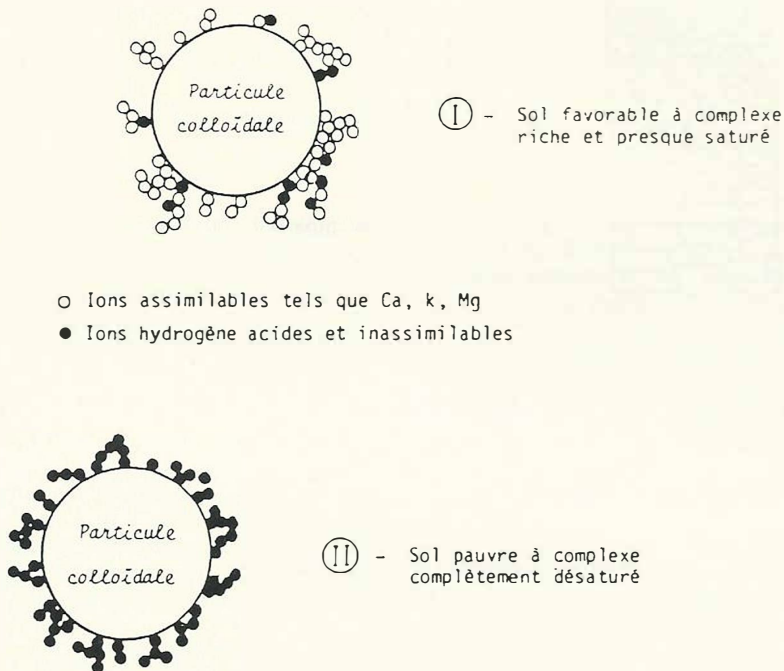


Fig.10 - Différents types de complexes absorbants

Type	Horizons A ₀ et A ₁	Structure de A ₁	Acidité pH	C/N	Conditions de formation	Faune	Microflore	Minéralisation de l'azote
Mull calcique	A ₀ mince A ₁ épais noir ou brun	Très gros agrégats	+ de 7	10	Présence de calcaire actif	Variée, nombreux vers de terre	Bactéries et champignons	Nitrification rapide
Mull forestier (humus doux)	A ₀ mince A ₁ peu épais gris brun	Agrégats	5,5	15	Forêt feuillue sur sol non calcaire. Complexe absorbant presque saturé	nombreux vers de terre. Insectes	Quelques bactéries. Champignons	Nitrification faible. Ammonisation bonne
Moder	A ₀ de 2 cm A ₁ épais noir	Structure instable	4,5	20	Forêt résineuse sur sol assez riche. Forêt feuillue claire sur roche siliceuse	Insectes	Champignons	Ammonisation moyenne
Mor (humus brut)	A ₀ très épais et gras A ₁ 2 à 5 cm	Structure particulaire	4	+ de 25	Forêt résineuse trop dense ou sur sol pauvre	Rare	Champignons spécialisés	Ammonisation lente

(1) D'après DUCHAUFOR "Précis de Pédologie" Masson édit.

1.2.4 - CARACTERISTIQUES DES DIVERS TYPES D'HUMUS

Fig. 10 bis

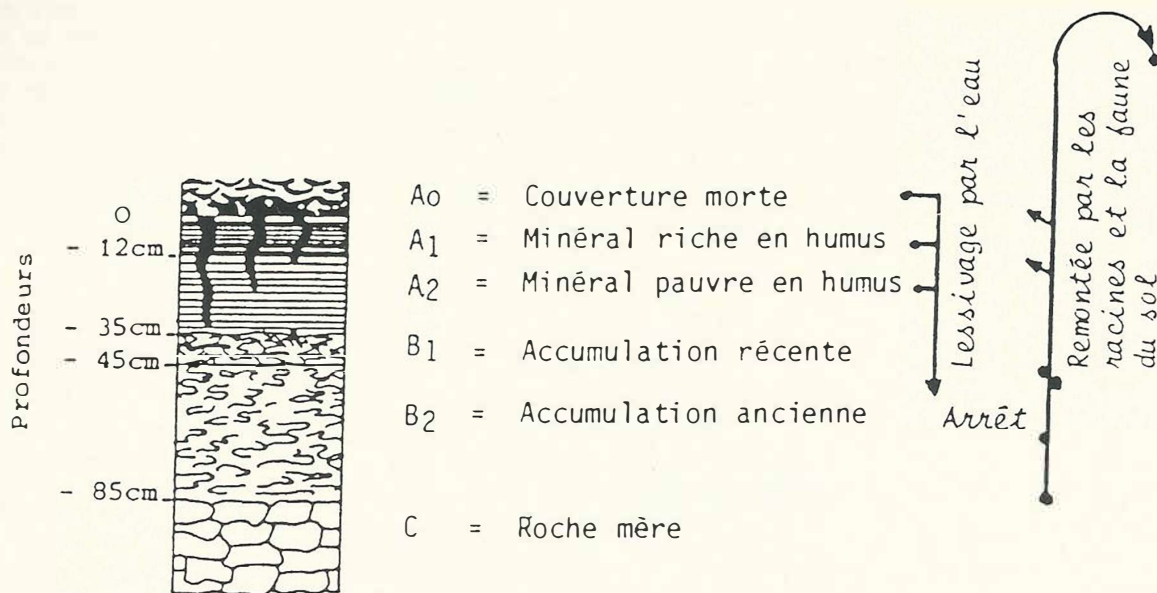


Fig.11 - Profil pédologique

équivalent = poids atomique de l'élément en mg divisé par sa valence).

Parmi les cations susceptibles de se fixer sur le complexe absorbant, quelques-uns, dont le rôle est essentiel dans la vie des plantes, ont reçu le nom de bases échangeables : ce sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ .

On appelle taux de saturation, le rapport :

$$\frac{S}{T} = \frac{\text{Somme des bases échangeables}}{\text{Capacité totale d'échange}}$$

Un taux de saturation de 10% est suffisant pour les résineux, 20% pour les feuillus peu exigeants (chêne), 50% pour les autres feuillus. La différence $T - S$ correspond essentiellement à des ions H^+ et à des ions Al^{3+} .

Les colloïdes électropositifs sont principalement les hydrates de fer et d'alumine. Ils sont susceptibles de contracter des liaisons étroites et de flocculer réciproquement avec les colloïdes électronégatifs. C'est le cas des hydrates de fer et de l'argile dont la liaison conditionne en grande partie la structure des sols.

● Influence de l'acidité du sol : plus le sol est acide, plus le complexe absorbant est désaturé en bases, et le sol moins fertile. Le pH des sols forestiers varie pratiquement de 3,5 à 8 avec un optimum pour la culture forestière entre 5,5 et 6 qui convient aussi bien aux feuillus qu'aux résineux.

● Influence de la roche-mère : en se décomposant elle libère les ions qui alimentent le complexe absorbant. La nature de roche-mère influe donc directement sur la nature des éléments minéraux absorbables. Sa profondeur conditionne souvent la hauteur de prospection des racines.

● Influence du calcium : le calcaire actif permet aux colloïdes de former le ciment nécessaire à une bonne structure. Il intervient pour saturer le complexe absorbant et

permet une transformation convenable de la matière organique (couverture morte). Cependant les espèces calcifuges (châtaignier, pin maritime...) redoutent le calcaire actif, et beaucoup d'autres espèces (résineuses notamment) supportent mal le pH élevé qu'il produit.

1.2.3 - Propriétés biologiques. Les bactéries, les champignons, les protozoaires, les vers et les insectes jouent un rôle essentiel dans la décomposition des matières organiques du sol (couverture morte ou horizon A_0) et leur transformation plus ou moins rapide par minéralisation et humification.

L'activité des microorganismes est accélérée par une faible acidité du sol, une humidité suffisante et un rapport C/N (teneur en carbone/teneur en azote) assez faible (inférieur à 12 il garantit une transformation complète et rapide, supérieur à 20 la couverture morte s'accumule et s'acidifie).

Le rôle des insectes, vers de terre et petits mammifères est important pour l'aération en profondeur permettant de maintenir une activité biologique suffisante. Les plantes supérieures ne peuvent se nourrir en azote que sous forme soluble. Or les composés azotés organiques sont presque toujours insolubles. Les racines se nourrissent donc en azote sous forme de nitrates, de nitrites ou de sels ammoniacaux issus de la minéralisation de l'humus.

En fait les composés azotés subissent une ammonisation qui libère l'ammoniaque, suivie de la nitrification qui donne par oxydation les nitrates. Seules les bactéries peuvent effectuer la nitrification. Les bactéries jouent donc un rôle essentiel dans la nutrition azotée des arbres. La nitrification ne peut se faire dans des sols forestiers acides. Dans ce cas les champignons n'assureront guère que l'ammonisation : les sels ammoniacaux, élimineront de ces forêts les essences fragiles (ormes, frênes).

En sol trop acide pour permettre une ammonisation suffisante, certaines bactéries présentes dans des nodosités de

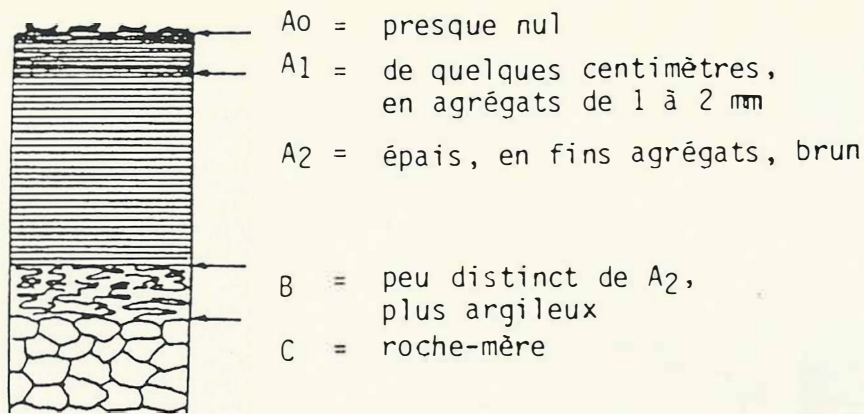


Fig.12 - Sol brun lessivé

racines (robiniers, aunes) peuvent aussi fixer directement l'azote de l'air (les essences correspondantes sont dites «améliorantes» pour le sol). De même les mycorhizes assimilent l'azote en combinaison organique de la couverture morte et en cédant une part sous forme soluble aux racines.

Il convient de souligner qu'une bonne teneur en azote et en bases est indispensable à la minéralisation et l'humification des litières.

Ainsi le sol forestier apparaît comme un milieu vivant très actif. Il assure l'essentiel du recyclage des éléments minéraux contenus dans les déchets organiques se déposant à sa surface. Le recyclage est complété en ce qui concerne les arbres morts par l'activité des champignons lignivores et des insectes xylophages (JACQUIOT).

1.2.5 - Principaux types de sols forestiers. Le sol, né de la transformation de la roche-mère, de la décomposition de l'humus et des interactions des éléments libérés tant par la roche-mère que par l'humus se présente généralement sous l'aspect d'une succession de tranches, appelées horizons et qui constituent le profil pédologique.

Les différences d'aspect, de structure et de composition chimique des différents horizons d'un sol résultent principalement du lessivage exercé par l'eau libre dans le profil

qui l'appauvrit progressivement de haut en bas successivement en éléments solubles, en éléments fixés sur le complexe absorbant, en éléments colloïdaux. Ces horizons lessivés (ou éluviaux) comprennent (cf. figure 11) : l'horizon A₀, couverture morte, exclusivement organique ; l'horizon A₁, minéral et organique ; l'horizon A₂, surtout minéral. Les horizons suivants correspondent aux horizons d'accumulation (ou illuviaux) désignés sous la lettre B. La roche-mère est désignée sous la lettre C.

● Les sols bruns forestiers

Ces sols, très favorables à la forêt feuillue (chêne et hêtre), sont caractérisés par une minéralisation rapide de la couverture morte et un équilibre entre les migrations par lessivage et les remontées de matières minérales et colloïdales par l'activité biologique intense qui y règne.

Les horizons A et B ne sont pas distincts.

Ces sols se forment en conditions de milieu très favorables : essences feuillues mélangées en peuplements complets, pluviosité moyenne, teneur en argile suffisante permettant d'obtenir un humus doux (mull) un lessivage modéré, une perméabilité du sol limitée, une libération d'ions utiles (Ca, K, Mg) à partir de minéraux variés.

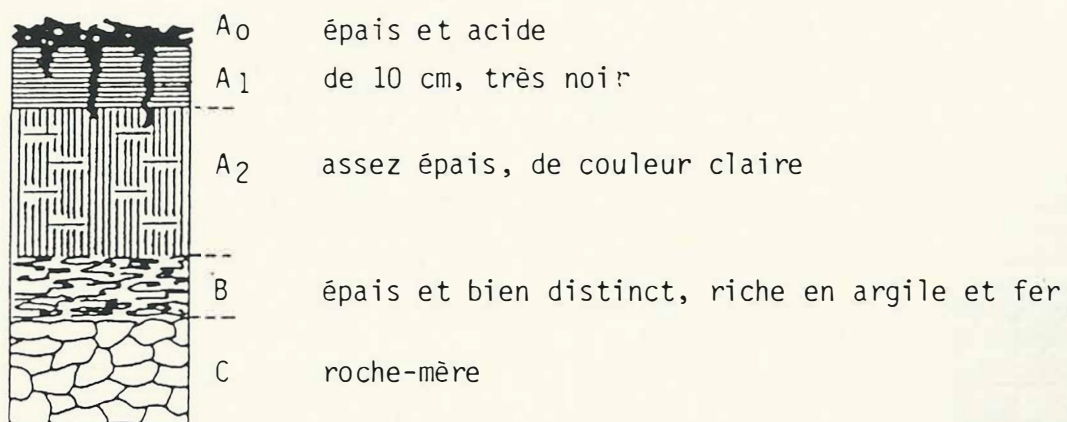


Fig.13 - Sol podzolique

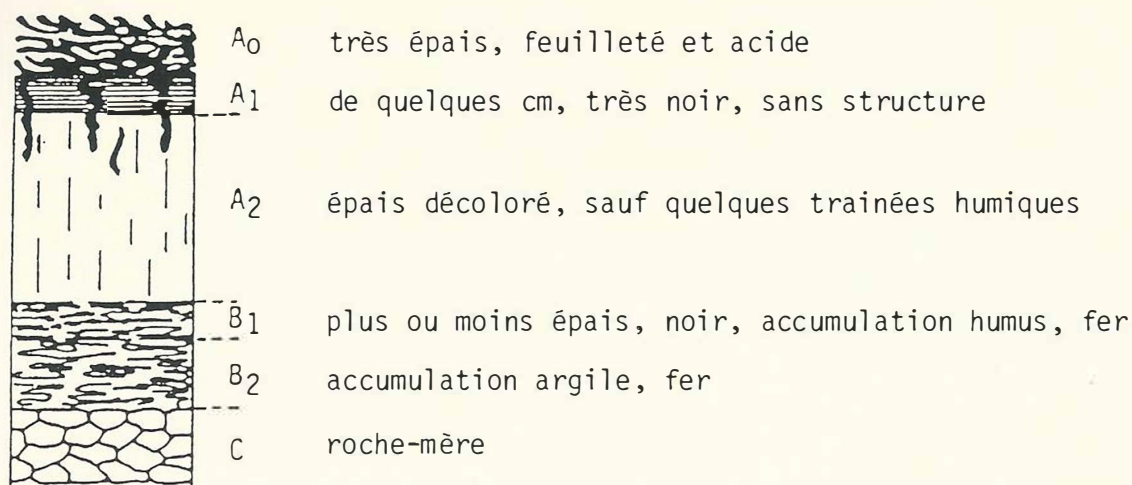


Fig.14 - Podzol

Ces sols peuvent se lessiver sous l'effet des modifications de milieu et notamment une ouverture brutale des peuplements (lessivage), ou l'introduction d'essences donnant un humus acide (résineux à couvert léger et mauvaise décomposition des organes caducs).

● Les sols lessivés (cf. figure 12)

La minéralisation est rapide et les microorganismes nombreux dans l'horizon A. La couverture morte A₀ passe souvent au type moder. Les migrations d'argile et de fer vers les horizons B sont visibles et permettent de distinguer nettement les horizons A et B. Ce sont encore de bons sols forestiers, mais qui doivent être maintenus couverts.

● Les sols podzoliques (cf. figure 13)

Les conditions climatiques (pluviométrie élevée) ou géologiques (substrat sableux filtrant par exemple) accentuent le lessivage en même temps qu'une végétation défavorable (peuplements clairs à humus acide) conduit à un horizon A₀ dont le C/N dépasse 20 et donne naissance à un humus (mor) se minéralisant mal.

L'horizon A₁ noir comprend les composés humiques non minéralisés ; l'horizon A₂ est très décoloré est appauvri par un lessivage poussé ; l'horizon B ocre ou rouille est très enrichi en fer.

On ne peut espérer cultiver sur ces sols des essences très exigeantes. Par contre les résineux, relativement frugaux, y

donnent de bons résultats : pin maritime, pin sylvestre, pin laricio, épicéa. L'introduction de feuillus en sous-étage (châtaignier, chêne rouge) ou l'apport d'engrais, favoriseront la reconstitution d'un humus plus doux (moder) limitant l'acidification du sol.

● Les podzols (cf. figure 14)

En conditions plus défavorables, le lessivage s'accroît avec une migration des colloïdes humiques de A₁, accompagnés par le reste du fer. L'horizon A₀, fibreux, épais et très acide (mor) ; l'horizon A₁ très noir a une structure particulière ; l'horizon A₂ particulière est complètement décoloré (aspect cendré) ; l'horizon B₁ brun noir est riche en fer et en matière organique ; l'horizon B₂ est brun, riche en argile et en fer. Cet état très défavorable à la forêt (lande à bouleaux et à callune) peut être irréversible.

● Les sols sur roche-mère calcaire (cf. figure 15)

Les sols bruns calcaires, issus de la dissolution du calcaire de la roche-mère, par l'eau ayant transité dans l'humus forestier acide, s'apparentent aux sols bruns, avec des cailloux calcaires dans le profil. En découvert, sous pelouse de graminées, l'humus est immobilisé en un horizon A₁ organo-minéral, au-dessus de la roche-mère calcaire fissurée, généralement colonisée par les racines : il s'agit de rendzines. Ces sols neutres, contiennent une proportion considérable de calcaire mobilisable. S'ils sont superficiels, seules des essences très frugales (Pin noir d'Autriche) peuvent les coloniser. Profonds ils portent de beaux peuplements de hêtre, sapin épicéa.

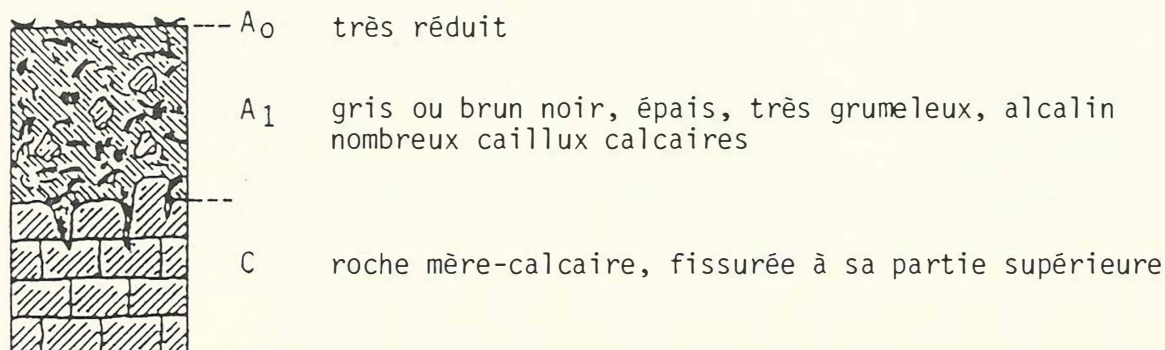
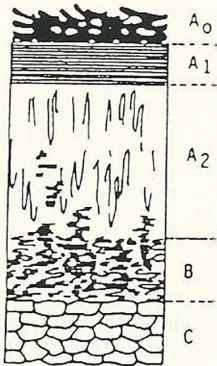


fig. 15 - Rendzine

● Les sols à pseudogley (cf. figure 16)

Lorsqu'un sol comporte un horizon très argileux (roche-mère argileuse ou horizon B des sols podzoliques) l'infiltration de l'eau est très lente et le profil s'engorge d'eau, et est asphyxiant pour les racines. Les oxydes ferriques (bruns ou rouille) sont réduits et font place aux oxydes ferreux (gris verdâtres), traduisant l'asphyxie par absence d'air et excès d'eau. Le mécanisme réducteur remonte plus ou moins dans l'horizon A₂ qui prend un aspect marbré. Ce phénomène est désigné sous le nom de marmorisation.

Le remède à une telle situation réside généralement dans l'assainissement des parcelles, par la constitution d'un réseau de drainage à ciel ouvert, évacuant l'excès d'eau vers des exutoires naturels.



L'horizon B, trop compact, retient l'eau et devient asphyxiant. Le fer ferrique, brun, est réduit par endroits et donne des tâches marbrées gris vert. Ce mécanisme réducteur remonte plus ou moins dans l'horizon A₂.

fig. 16 - Pseudogley dans un sol podzolique

1.2.6 - Améliorations physiques des sols. Les améliorations physiques des sols qui s'adressent surtout aux jeunes plantations ou aux semis visent à assurer une meilleure alimentation en eau et en éléments nutritifs, donc augmenter la profondeur d'enracinement, limiter les pertes d'eau, favoriser le stockage d'eau utile.

Un meilleur enracinement peut être obtenu par sous-solage et rootage : en brisant en profondeur les couches dures (alios, calcaire...) ; par labour : en fractionnant le sol on améliore la structure, et en enfouissant l'humus on favorise sa décomposition ; par drainage : permettant de maintenir la structure en évitant les réactions réductrices drainage par fossés à ciel ouvert, labour en ados) ; par amélioration biologique de structure par plantations d'essences à enracinement améliorant : bouleau sur podzol, aune sur pseudogley.

Une meilleure alimentation en eau peut être obtenue en luttant contre la végétation concurrente, en pratiquant des façons culturales qui permettent une meilleure infiltration de l'eau atmosphérique, en pratiquant des labours profonds en sols lourds pour accroître la capacité de rétention en eau utile, en enfouissant des matières organiques on obtient des résultats semblables, en arrêtant les eaux de ruissellement par la constitution de gradins et banquettes, plantations sur courbes de niveau ou en irriguant (pépinières).

1.2.7 - Améliorations chimiques des sols : fertilisation. Elle vise à porter la teneur du sol en éléments nutritifs à un niveau optimum pour le développement des essences forestières, essentiellement dans le jeune âge. Elle concerne surtout des éléments facilement fixables par le complexe

absorbant P, K, Ca, Mg, ainsi que l'azote. Ultérieurement la fertilité optimale d'un sol peut être entretenue par la compensation des pertes d'éléments dues aux exportations de bois et au lessivage.

Les apports d'éléments déficients se font sous formes d'engrais du commerce dont les principaux sont : les amendements calcaïques (calcaire broyé, chaux vive, chaux éteinte) ; les engrais phosphatés : phosphates naturels, scories de déphosphoration, superphosphates ; les engrais potassiques : chlorure de potassium, sulfate de potassium ; les engrais azotés : nitriques ou ammoniacaux ; les engrais organiques ; les engrais composés. Les dosages, les dates et les modes d'emploi sont évidemment essentiels pour atteindre les buts escomptés.

1.3 - Facteurs biotiques

● Les autres végétaux : ils concurrencent les essences forestières au stade du semis ou de la plantation (ronce, fougère, bruyère...) et doivent être combattus par des interventions mécaniques ou chimiques. D'autres vivent directement aux dépens de l'arbre : le gui et les champignons parasites (rond, rouge cryptogamique, en sont des exemples connus). Les mycorhizes vivent par contre en association de symbiose avec les racines, et permettent d'améliorer les teneurs en azote, phosphore et potassium des jeunes plants.

● Les animaux : les mammifères et les petits rongeurs sont des consommateurs de graines. Les grands gibiers et les lapins abrutissent les jeunes sujets et les écorcent. Les sangliers enfouissent les graines, les oiseaux en consomment (pigeons) mais en disséminent également. Les insectes sont les vecteurs de nombreuses maladies des arbres. Ils pondent souvent leurs larves au niveau des blessures des arbres : les larves se nourrissent ensuite aux dépens du bois.

● Les hommes : les usagers de la forêt occasionnent fréquemment des dégradations au milieu : piétinement du sol et asphyxie des racines, cueillette excessive, arrachage de plants, apport de feu en forêt. L'homme est évidemment à l'origine de la disparition de la forêt par défrichement, d'abord pour la culture, puis l'industrie et l'urbanisation. Le sylviculteur, quant à lui, transforme la forêt dans sa composition, sa structure.

2 - LES ÉCOSYSTEMES FORESTIERS

2.1 - Notions de biocénoses et d'écosystèmes

Une «biocénose» est un groupement d'êtres vivants ras-

semblés par l'attraction non réciproque qu'exercent sur eux les divers facteurs du milieu ; ce groupement est caractérisé par une composition spécifique déterminée, par l'existence de phénomènes d'interdépendance, et il occupe un espace que l'on appelle le biotope (DAJOZ).

L'«écosystème» est l'unité fonctionnelle de base en écologie puisqu'elle inclut à la fois les êtres vivants et le milieu dans lequel ils vivent, avec toutes les interactions entre le milieu et les organismes.

La forêt est généralement considérée comme un écosystème.

Par ailleurs on appelle «station écologique» un ensemble de surface assez importante sur lequel les conditions de milieu ont une homogénéité suffisante pour y justifier un même traitement.

Une station écologique comporte normalement des plantes à exigences écologiques strictes qui ont une valeur indicatrice précieuse sur les potentialités du milieu.

A propos de ces plantes indicatrices, il convient de souligner que toutes les espèces n'ont pas une écologie stricte (ex. : le lotier corniculé peut se rencontrer dans des stations très différentes) ; la valeur d'une indicatrice n'est souvent réelle que dans le périmètre d'une région restreinte (ex. : l'hépatique se rencontre en France et en Norvège dans des conditions différentes) ; la valeur indicatrice se rapporte soit à un facteur précis (le genêt traduit un sol sec, siliceux ou calcaire) soit à un état de milieu (ex. : engorgement en eau pour la bourdaine).

Il s'avère que les espèces végétales apparaissent réunies par groupes à affinités écologiques analogues : chaque groupe est appelé association végétale.

La composition floristique d'une association comprend : des espèces caractéristiques qui ne se rencontrent normalement que dans l'association ; des espèces compagnes qui existent toujours dans l'association mais se rencontrent aussi en dehors d'elle.

De plus en plus, on considère qu'une association comporte des groupes d'espèces ayant une certaine autonomie les uns par rapport aux autres et qui constituent les groupes écologiques, qui peuvent se rencontrer dans diverses associations ayant une parenté écologique.

2.2 - Particularités des associations forestières

L'originalité des associations végétales forestières tient à plusieurs aspects :

- La stratification de la végétation qui comprend les strates arborescentes, arbustives, herbacées et muscinales (cf. figure 17).

- La phénologie : les variations de phases feuillées et défeuillées dans la forêt caducifoliée au niveau de la strate arborescente peuvent entraîner des aspects saisonniers très différents des associations végétales. Ainsi dans la chênaie-charmaie, en phase défeuillée au début du printemps, fleurissent abondamment l'anémone sylvie, la ficairie, la jacinthe, l'arum blanc. Puis après cette floraison se développent les graminées et fougères plus discrètes tout au long de l'été, alors qu'ont disparu les espèces vernalles.

- La dominance : la strate arborescente, par l'écran qu'elle constitue, conditionne les strates inférieures et peut les influencer largement : ainsi sous une hêtraie dense les strates arbustives et herbacées peuvent être inexistantes.

Néanmoins, il ne faut pas perdre de vue que la strate arborescente dominante est très souvent dans nos forêts cultivées le résultat de l'action humaine. Si l'aspect et la vigueur des arbres indiquent bien la fertilité du milieu (la hauteur dominante est à cet égard un bon critère), ce sont surtout les plantes des strates arbustives et herbacées moins influencées par l'humus qui permettent d'identifier les associations végétales traduisant les potentialités du milieu.

- La dynamique : si on peut parler d'équilibre entre les écosystèmes forestiers actuels et les conditions écologiques locales, il ne saurait être considéré comme statique. Les écosystèmes forestiers sont des entités vivantes qui se modifient comme en témoignent les observations suivantes faites en forêt de Fontainebleau :

- le chêne se raréfie considérablement dans les réserves de la Tillaie et du Gros-Fouteau, et en l'absence de régénération, sa disparition est prévisible à terme, entraînant avec elle des modifications de son cortège faunistique et floristique, au profit de celui du hêtre qui tend à remplacer le chêne ;

- la flore des mares de platières, non curées et qui se comblent progressivement, a considérablement diminué. La végétation hygrophile des bordures (association à *Heleocharis palustris* et *Carex rostrata*) disparaît au profit des saules et des bouleaux, voir des pins sylvestres. Le centre des mares se comble petit à petit faisant disparaître l'association à *Myriophyllum alterniflorum* et *Helosciadium inundatum* ;

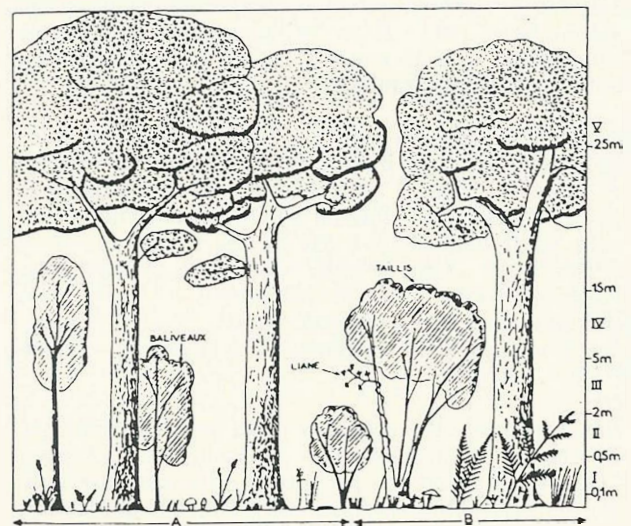


Fig. 17 - La stratification verticale dans une forêt tempérée. A : futaie ; B : taillis sous futaie ; I : strate herbacée basse et cryptogamique ; II : strate herbacée haute ; III : strate arbustive ; IV : strate arborescente inférieure ; V : strate arborescente supérieure.

— l'association du pré-bois de chêne pubescent s'appauvrit progressivement au fur et à mesure de l'envahissement des clairières par le pin sylvestre et le hêtre.

Aussi convient-il plutôt de conclure à des successions d'état des écosystèmes forestiers dont certains paraissent avoir atteint une stabilité, de durée indéterminée (ce serait le cas de la hêtraie de la Tillaie qui paraît se régénérer sans modifications essentielles) mais pouvant être remise en question brutalement par un accident parasitaire ou météorologique, alors que d'autres évoluent sous nos yeux vers un état différent (LEMEE).

2.3 - Utilisation pratique des associations dans la définition des potentialités des stations

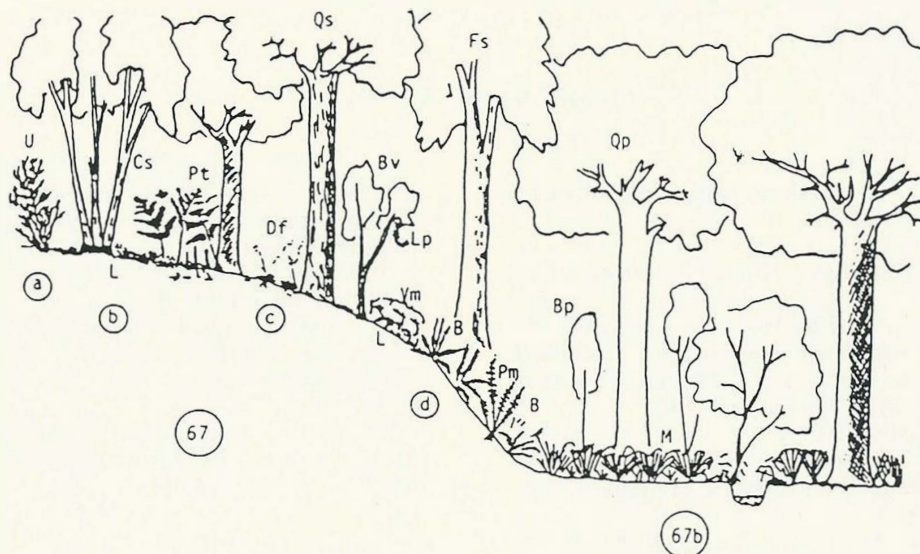
La recherche des associations végétales et des groupes écologiques (qui constituent la phytosociologie) à partir de relevés floristiques, permet donc de définir de manière synthétique les conditions du milieu et les potentialités des stations en matière forestière. Une représentation cartographique des associations végétales sert généralement de base, avec la cartographie pédologique, au zonage de la forêt en

stations écologiques aux potentialités forestières définies, justiciables chacune d'un traitement homogène.

Des relevés floristiques périodiques peuvent faire apparaître des transformations progressives des conditions de milieu, se traduisant par des successions de groupements végétaux.

La définition des associations végétales caractérisant les différentes stations d'une forêt peut être réduite à la recherche d'indicateurs particuliers, traduisant par exemple la nature de l'humus, ou au contraire elle peut être étendue à l'ensemble des conditions écologiques permettant d'aboutir à partir des critères physiologiques et écologiques à la définition de groupements complexes.

La première méthode est illustrée par Philippe DUCHAUFOR (Pédologie - ENEF Nancy 1957). Il considère que le type d'humus, qui dépend étroitement de la teneur en bases et en éléments nutritifs, de l'économie de l'eau, et de l'aération, et exerce une influence décisive sur la répartition des plantes, constitue le meilleur test biologique permettant de caractériser une station. Il définit ainsi 11 groupes écologiques fondamentaux caractéristiques du type de sol et surtout de l'humus.



Chênaies oligotrophes. (67) chênaie sessiliflore et ses variantes :

- (a) - lisière à *Ulex europaeus* (U)
- (b) - châtaigneraie (Cs : *Castanea sativa*, Pt, *Pteridium*, L, *Leucobryum glaucum*)
- (c) - chênaie typique (Qs : *Quercus sessiliflora*, Df, *Deschampsia flexuosa*, Bv, *Betula verrucosa*, Lp, *Lonicera periclymenum*)
- (d) - variante submontagnarde (Fs, *Fagus sylvatica*, Vm, *Vaccinium myrtillus*, toujours avec *Leucobryum* L ; B, *Blechnum spicant* ; Pm, *Polystichum montanum*.
- (67b) : Chênaie humide à Molinie. Qp, *Quercus pedunculata*, Bp, *Betula pubescens*, M, *Molinia coerulea*.

Fig. n° 18 - Le groupement de la chênaie-sessiliflore

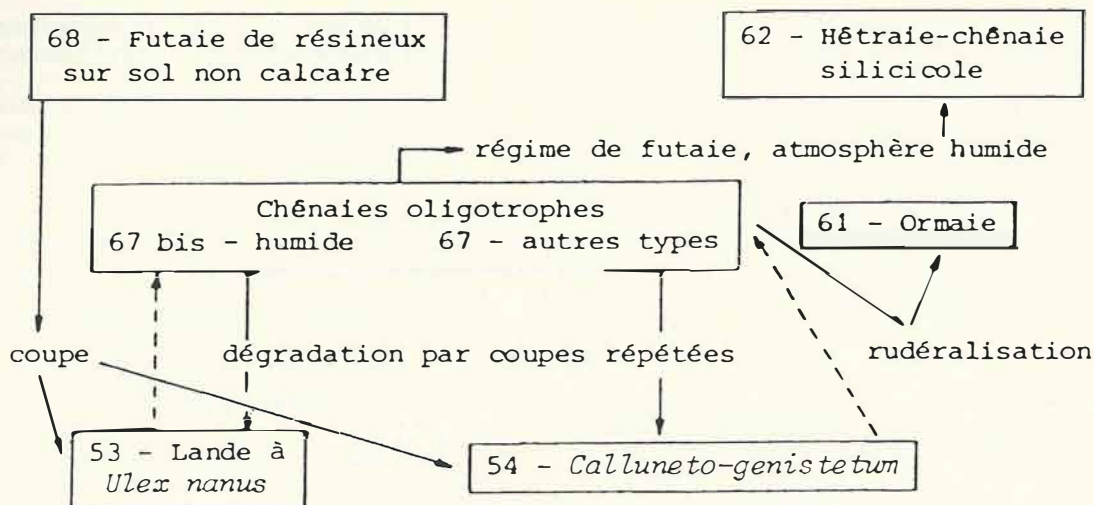


Fig.19 - Rapports évolutifs de la chênaie acidophile

La deuxième méthode est illustrée par Marcel BOURNERIAS (guide des Groupements végétaux de la Région Parisienne - SEDES 1979) qui définit 68 groupements végétaux différents, pour la seule région parisienne,

en les situant dans leur biogéographie et leur évolution. Une illustration en est donnée ci-après (cf. figure 18) pour le groupement de la chênaie sessiliflore et ses évolutions possibles (cf. figure 19).

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

M. BOURNERIAS : Guide des Groupements végétaux de la Région Parisienne ; SEDES-CDU 1979.
 P. COCHET : La forêt ; Hachette 1963.
 R. DAJOZ : Précis d'écologie ; Dunod Gauthiers-Villars 1975.
 Ph. DUCHAUFOR : Précis de Pédologie ; Masson 1970.
 M. FARDJAH : Dynamique comparée de l'eau du sol sous futaie de hêtre et de clairières à Calamagrostis ; Thèse de Docteur-Ingénieur ; Paris-Sud Orsay 1978.
 Ch. GARDOU, J. LACOURT et div. : La forêt, l'arbre, le bois ; Cahiers de l'Université de Paris-Sud n°2 1980.
 C. JACQUIOT : Écologie appliquée à la Sylviculture ; Gauthiers-Villars 1984.
 G. LEMEE : La hêtraie naturelle de Fontainebleau ; Extrait de «Structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres» Masson 1978.

J. PARDE : Le microclimat en forêt ; Extrait de «Écologie forestière», collectif présenté par P. PESSON Gauthiers-Villars 1974.
 L. ROUSSEL : Recherches théoriques et pratiques sur la répartition en quantité et en qualité de la lumière dans le milieu forestier. Annales de l'École Nationale des Eaux et Forêts, tome XIII, fasc. 2 1952.
 G. TENDRON : «Sylviculture» ; École Supérieure du Bois 1982.
 G. TENDRON : La forêt de Fontainebleau «de l'écologie à la sylviculture» ; OFFICE NATIONAL DES FORETS 1983.

ILLUSTRATIONS DE Jean-Claude CHALONS

FIGURE 1 : d'après ROUSSEL «Recherches sur la répartition de la lumière» 1953.
 FIGURE 2 : d'après RUBNER «Die pflanzengeographischen Grundlagen des Waldbaues» 1960.
 FIGURE 3 : d'après AUSSENAC «Gelées tardives et jeunes peuplements forestiers» - RFF 1970.
 FIGURE 5 : d'après FARDJAH «Dynamique comparée de l'eau du sol» 1978.

FIGURES 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 : d'après COCHET «La forêt» 1963.
 FIGURE 17 : d'après DAJOZ «Précis d'écologie» 1975.
 FIGURES 18, 19 : d'après BOURNERIAS «Guide des Groupements végétaux de la Région Parisienne» 1979.