

Modification au cours de la révolution forestière des caractères physiques de sols sous plantation de Douglas

(*Pseudotsuga menziesii* Franco)

J. Chrétien⁽¹⁾, J. Ranger⁽²⁾ et S. Villette⁽³⁾

Collaboration technique D. Meunier⁽¹⁾, O. Munier⁽¹⁾ et D. Gelhaye⁽²⁾

(1) INRA - Unité de Science du Sol - SESCOF - Antenne de Dijon, 17, rue Sully - 21034 Dijon cedex

(2) INRA - Centre de Nancy, Équipe «Cycles biogéochimiques» - 54280 Champenoux

(3) LEGTA - 58000 Challuy

RÉSUMÉ

Cette étude de trois sols forestiers sous plantation de Douglas de 20, 40 et 60 ans a pour but de mettre en évidence l'effet du vieillissement de l'écosystème sur les caractères morphologiques et physico-hydriques des solums de type ALOCRISOLS (RP 95). On observe ainsi une modification de nature et une diminution importante d'épaisseur des horizons organo-minéraux qui évoluent d'un mull acide épais à 20 ans vers un moder plus compact et réduit en épaisseur dès 40 ans sans changement notable des teneurs en matière organique. Corrélativement, on constate une diminution de la porosité totale in situ de ces horizons ainsi que de leurs composantes «pédologiques», porosités structurale et de retrait déduites de mesures effectuées sur mottes naturelles (ou peds) à l'humidité du prélèvement ou après séchage à l'air. Enfin, le comportement physico-hydrique des matériaux constitutifs des horizons analysé à partir des courbes d'humidité et de gonflement (entre pF 4,2 et pF 1) indique une perte d'aptitude au gonflement accompagnée d'une diminution progressive de la porosité ouverte à l'air pouvant conduire dans le peuplement de 60 ans à une phase d'anaérobiose en période humide.

L'ensemble de ces constatations conduit à admettre l'existence d'un tassement progressif et généralisé des horizons organo-minéraux. Celui-ci peut être attribué à des contraintes mécaniques de gestion forestière (poids du sol, poids du peuplement, passage d'engins d'exploitation...) mais également, sans doute, à une évolution des types d'humus. Si des réserves peuvent être formulées sur les conditions de représentativité d'une telle chronoséquence forestière, il n'en reste pas moins vrai que les résultats obtenus conduisent à proposer une tendance évolutive en relation avec l'âge des peuplements qui semble bien s'intégrer au contexte pédogénétique de l'écosystème étudié.

Mots clés

Peuplement forestier, Douglas, sols, pédogenèse, humus, porosité, gonflement, tassement.

SUMMARY

MODIFICATION OF PHYSICAL PROPERTIES OF FOREST SOIL IN A DOUGLAS-FIR PLANTATION
(*Pseudotsuga menziesii* Franco) DURING THE ROTATION

Three forest soils planted with 20-40 and 60-year-old Douglas-fir stands were studied to test the impact of forest stand ageing on the morphological and physico-hydric characteristics of these ALOCRISOLS (AFES, 1995 ; Dystric Cambisols-FAO-UNESCO, 1989) The results showed that organic layers evolved from a thick acid-mull in the 20-year-old stand to a compact moder in the 40-year-old stand. This change did not affect the organic matter content (figure 1). A decrease in the total porosity of these layers was observed.

The pedological components of the latter ie structural porosity and shrinkage porosity, were quantified on lumps (peds) with the humidity they have at sampling time or after air-drying (table 2, figure 3). The physico-hydric behaviour of the horizons described from water retention and swelling between pF 4.2 and pF 1, indicated a decrease in the swelling capacity accompanied by a progressive decrease in the porosity open to air (figure 4). The latter process could lead, to anaerobic conditions in the older stand during the wet period.

All these observations suggest a progressive and general packing occurring in the organo-mineral soil horizons during the forest rotation. This packing could be attributed to mechanical constraints resulting from forest management such as stand weight and forest machinery and probably also to an evolution of humus layers. Judgment should be reserved on the suitability of the stand chronosequence. Previous land occupation seems to be one of the most relevant discrepancies between the stands of the sequence. It was concluded that these discrepancies could not explain the evolution during the forest rotation and that the observed evolution was really representative of soil changes during forest ageing.

Key-words

Forest stand - Douglas-fir - forest soil - pedogenesis - humus form - porosity - swelling - packing

RESUMEN

MODIFICACIONES EN EL CURSO DEL CICLO FORESTAL DE LOS CARACTERES FÍSICOS DE LOS SUELOS BAJO PLANTACIÓN DE DOUGLAS

Este estudio de tres suelos forestales bajo plantación de Douglas de 20, 40 y 60 años tiene como finalidad de poner en evidencia el efecto del envejecimiento del ecosistema sobre los caracteres morfológicos y físico-hídricos de los perfiles de tipo ALOCRISOLS (R.P. 95). Se observa así una modificación de naturaleza y una disminución importante de espesor de los horizontes organo-minerales que evolucionan de un mull ácido espeso a los 20 años hacia un moder más compacto y reducido en espesor desde 40 años sin cambio notable de tasas en materia orgánica. Correlativamente, se comprueba una disminución de la porosidad total in situ de estos horizontes así que sus componentes pedológicos, porosidades estructural y de retractor deducidas de medidas efectuadas sobre terrones a humedad del muestreo o después del secamiento al aire. En fin, el comportamiento físico-hídrico de los materiales constitutivos de los horizontes, analizado a partir de las curvas de expansión (entre pF 4,2 y pF 1) indica una pérdida de aptitud a la expansión acompañada de una disminución progresiva de la porosidad abierta al aire que puede conducir en la población de 60 años a una fase de anaerobiosis en periodo húmedo.

El conjunto de estas observaciones conducen admitir la existencia de una compresión progresiva y generalizada de los horizontes organo-minerales. Esta puede ser atribuida a fuerzas mecánicas de gestión forestal (pesos del suelo, pesos de la población, uso de maquinas de explotación) pero igualmente, y sin duda, a una evolución de los tipos de humus. Si reservas pueden ser formuladas sobre las condiciones de representatividad de esta cronosecuencia forestal, queda verdadero que los resultados obtenidos conducen a proponer una tendencia evolutiva en relación con el edad de las poblaciones que parecen integrarse bien en el contexto pedogenético del ecosistema estudiado.

Palabras claves

Población forestal, Douglas, suelos, pedogénesis, humus, porosidad, expansión, compresión.

Les sols forestiers présentent en général une assez faible fertilité du fait qu'ils sont anciens, qu'ils n'ont été que très rarement améliorés et que l'agriculture a utilisé les sols les plus riches.

L'efficacité des cycles biogéochimiques conduit à une optimisation de l'utilisation du faible pool disponible se traduisant par des quantités de biomasse produite souvent non négligeable (Switzer et al., 1968 ; Duvigneaud, 1985 ; Ranger et al., 1995). Toutefois, les aménagements forestiers visant à produire du matériau bois, entraînent une diminution de la réserve d'éléments nutritifs, en particulier par les exportations d'éléments associés aux récoltes et aux pertes d'éléments en solution pendant la révolution forestière ou exceptionnellement au moment des coupes (Ranger et Bonneau, 1984, 1986).

Il est donc nécessaire d'établir des bilans de fertilité minérale en comparant les entrées (apports atmosphériques, flux d'éléments issu de l'altération des minéraux) et les sorties (pertes par les récoltes et par drainage) de l'écosystème, pour déterminer la pérennité du système et les contraintes écologiques de la gestion forestière (Dambrine et al., 1995).

Ces bilans doivent être établis pour toute la durée de la révolution forestière, ce qui implique l'utilisation des chronoséquences de peuplements, compte-tenu de la longueur des révolutions forestières. Le choix de ces séquences est délicat car aucun paramètre autre que l'âge ne doit différer entre les peuplements choisis, puisqu'ils doivent représenter les stades de développement d'un même peuplement : en pratique aucune situation n'est totalement satisfaisante dans l'absolu.

Ces chronoséquences permettent d'étudier la dynamique du fonctionnement de l'écosystème et en particulier celle du sol que ce soit en terme de bilans quantitatifs ou plus simplement en terme d'évolution qualitative de paramètres au cours de la révolution forestière.

La mesure des flux d'éléments en solution permet de caractériser le fonctionnement du sol. Ils sont étudiés par des systèmes lysimétriques avec ou sans tension qui ne donnent toutefois pas accès au volume drainé. Celui-ci est quantifié par un modèle hydrique qui permet d'estimer les pertes d'eau (et d'éléments) par drainage à la base de chaque horizon en fonction de la dimension du réservoir que constitue l'horizon, des apports pluviométriques nets et des pertes liées à la consommation des peuplements (Breda, 1995). Le remplissage du réservoir dépend de la structure de l'espace poral, avec un drainage initial rapide dans la macroporosité (Villette, 1994). L'établissement de ce modèle hydrique a nécessité entre autres le dimensionnement du réservoir à partir de l'établissement des courbes humidités-pF et la caractérisation statique et dynamique de l'espace poral des sols dont l'importance vient à nouveau d'être soulignée (Bruand et al., 1996 ; Dupouey et al., 1997).

L'objet de cet article est de présenter indépendamment de leur implication dans le modèle étudié, l'évolution des caracté-

ristiques morphologiques, physiques et hydriques de sols forestiers sur lesquels ont été plantés des peuplements de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco). Ces plantations fortement productives et traitées semi-intensivement représentent un bon modèle pour étudier l'évolution de la fertilité du sol dans ses composantes physique et minérale, au cours du développement du peuplement.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le site expérimental

L'étude d'une chronoséquence nécessite donc le choix de parcelles qui ne diffèrent que par l'âge des peuplements qui y sont implantés. Bien que cette condition ne soit jamais parfaitement réalisée compte-tenu de la variabilité spatiale des caractéristiques climatiques et édaphiques, elle peut être approchée. Ce sont ces considérations qui ont conduit à sélectionner dans le Haut Beaujolais sur les communes d'Avenas et de Vauxrenard (69) trois parcelles de Douglas de 20, 40 et 60 ans proches du Mont des Aiguillettes et distantes seulement de quelques centaines de mètres. Le choix de ces 3 peuplements s'est fait après une enquête sur le terrain. Ce site a été choisi parce que, parmi toutes les plantations de Douglas cataloguées en France, il réunissait des peuplements d'âges différents dans des conditions satisfaisantes de similarité de sol et de climat. Seule la provenance des plants utilisés dans les trois peuplements est un facteur de variabilité non maîtrisable.

Les parcelles se situent entre 740 et 770 m d'altitude. La température moyenne y est de 7° C et la moyenne des précipitations annuelles de 990 mm. Le contexte géologique est constitué de roches volcaniques anciennes d'âge viséen. Il s'agit essentiellement de tufs consolidés à cristaux qui forment un vaste ensemble d'apparence assez monotone malgré la diversité locale des faciès. Macroscopiquement, ce sont des roches dures, compactes, de couleur gris pâle à gris noir ou bleutée, à cassure esquilleuse, présentant des phénocristaux millimétriques de feldspath, de biotite avec ou sans quartz dans un fond à aspect pâteux.

Les sols des 3 parcelles se sont développés sur ce même type de roche mère (tuf volcanique) mais des colluvionnements différentiels, soit de grès sur les parcelles de 40 et 60 ans, soit de métatuf sur la parcelle de 20 ans, ont pu avoir lieu.

Les sols

Données générales

Trois profils caractérisant chacune des 3 parcelles expérimentales de Douglas d'âge respectif 20, 40 et 60 ans, ont été étudiés. Leurs caractéristiques physico-chimiques sont présentées au tableau 1. Ce sont des sols à horizon hologanique

de surface, gravelo-caillouteux, de texture équilibrée, limono-argilo-sableuse, de faible densité apparente et bonne capacité de stockage en eau⁽¹⁾ (CSE comprise entre 220 et 240 mm) (GEPPA, 1982). On observe peu ou pas d'accroissement du taux d'argile en profondeur. Sur le plan chimique, ils sont très acides (pH compris entre 4,1 et 4,5 pour les différents horizons) et très désaturés (S/T compris entre 2,1 et 4,5 %, mesuré à pH 7). Des investigations effectuées sur 7 profils analysés indépendamment dans chaque peuplement par la méthode à KCl N donnent, conformément aux prévisions, des taux de saturation moins bas (5 à 25 %) avec les valeurs les plus élevées soit en surface (effet du recyclage biologique) soit dans le jeune peuplement (effets combinés du colluvionnement de métatuf et de restitutions plus riches sous le peuplement jeune) (Marques, 1996). Le taux de Fer total croît légèrement vers la profondeur à l'inverse de celui du Fe libre qui augmente vers la surface. On peut en déduire une altération croissante des matériaux de bas en haut des profils mais un lessivage très limité de l'argile et du fer.

Ces différentes données chimiques et en particulier celles des horizons d'altération : pH très acide (4,3 et 4,4), taux d'Al⁺⁺⁺ échangeable élevé (3,9 à 4,9 me/100 g) représentant 50 à 65 % de la capacité d'échange cationique avec un rapport Al⁺⁺⁺/S de 16 à 18 caractérisent sans conteste des horizons Sal et conduisent à rattacher ces sols bruns acides (CPCS, 1967) à la Référence des ALOCRISOLS (Référentiel Pédologique 95). Cependant des différences existent dans leur morphologie qui seront précisées plus loin (§ «Typologie des solums»).

Particularités granulométriques et minéralogiques

Situés globalement dans la même classe texturale limono-argilo-sableuse, les horizons de ces 3 solums présentent cependant quelques différences significatives sur le plan de la granulométrie que l'on peut imputer vraisemblablement à des phénomènes de colluvionnements différentiels. Elles concernent surtout le squelette (sables et limons) car les taux d'argile sont assez proches pour l'ensemble des horizons A et Sal. Ainsi, le profil 20 ans est plus riche en limons fins et plus pauvre en sables grossiers que les profils 40 et 60 ans. Par ailleurs, si les squelettes granulométriques évoluent assez peu à l'intérieur des solums, les horizons C des profils 40 et 60 ans ont une granulométrie nettement plus grossière que celle des horizons A et Sal avec en particulier de faibles teneurs en argile et une forte proportion de sables grossiers.

Les minéraux argileux des sols du site de Vauxrenard sont essentiellement la kaolinite, la vermiculite, l'illite et des interstratifiés illite-vermiculite. La vermiculite est toujours hydroxy-alumineuse. Les minéraux hérités de la roche mère sont le quartz, le feldspath potassique et le plagioclase, plus abondants dans les fractions granulométriques grossières (Ezzaim et al., 1997). Les spectres de minéraux sont très voisins dans les sols des peuplements de 40 et 60 ans. Le sol du peuplement de 20 ans est cependant moins riche en kaolinite et présente quelques traces d'amphibole héritée du colluvionnement issu du métatuf voisin (Boisset, 1996).

Histoire des parcelles

Sur l'aspect historique, les placettes ont connu une occupation un peu différente dans le passé. Une recherche dans les archives de la Commune de Vauxrenard (Koerner, 1994) a permis de connaître l'histoire de ces placettes depuis 1824. A cette époque, les placettes D20 (peuplement de Douglas de 20 ans) et D60 (peuplement de Douglas de 60 ans) étaient des terres agricoles et la placette D40 (peuplement de Douglas de 40 ans) était une friche ; cependant il a été impossible de savoir plus précisément quel type de culture était réalisé sur les deux premières placettes. La placette D20 est restée en terre agricole jusqu'aux environs de 1930 quand elle a été plantée en épicéa commun. Il y aurait eu deux récoltes entre 1930 et 1970, date de l'introduction du Douglas. La placette D40 a été successivement boisée en résineux (plus largement en épicéa) vers 1870 et vers 1910, c'est-à-dire qu'elle a également supporté deux générations de résineux avant l'actuelle plantation de Douglas. La placette D60 est restée en terre de culture jusque vers 1930 lorsqu'elle a été boisée pour la première fois en Douglas. En résumé, les placettes D20 et D60 sont des terrains boisés depuis une soixantaine d'années, tandis que la placette D40 est un terrain forestier depuis plus d'un siècle.

Méthodes d'étude

La porosité du sol

Dans les études de porosité du sol en agronomie, les auteurs distinguent classiquement une porosité texturale et une porosité structurale (Monnier et al., 1973 ; Stengel, 1979 ; Fiès et Stengel, 1981). Avec une optique plus pédologique, l'un de nous (Chrétien, 1982, 1986) a proposé la détermination des composantes de la porosité pour chacun des horizons d'un sol et l'établissement de son profil porosimétrique. Ce sont ces notions qui seront employées pour l'étude de l'espace poral des sols du site expérimental de Vauxrenard.

Trois types de porosité ont été déterminés pour chacun des horizons :

- la porosité totale calculée à partir de la densité apparente mesurée in situ au densitomètre à membrane sur des volumes de

1 - correspondance avec les notions courantes de Réserve Utile (RU : approximativement 2/3 de CSE) et de Réserve Facilement Utilisable (RFU : approximativement 1/3 de CSE)

l'ordre de 600 cm³ incluant petits cailloux, graviers et terre fine ;

- les porosités de motte obtenues à partir de la densité apparente déterminée sur des mottes naturelles ou peds de volume proche de 15 cm³ incluant graviers et terre fine selon une technique mise au point par Maertens (1965). Elles ont été mesurées sur mottes humides dans les conditions d'humidité de terrain au jour du prélèvement (comprises entre 15 et 25 % pour l'ensemble des horizons) et sur mottes sèches après séchage à l'air (pF 5,8).

Les densités réelles ou densités de solide ont été obtenues par la méthode du pycnomètre à eau de Regnault.

Précision des mesures : les mesures de densité apparente in situ ont fait l'objet de 3 répétitions par horizon. Les écarts extrêmes entre répétitions sont compris entre 0,020 et 0,230 soit en moyenne 0,120 (erreur de l'ordre de 10 %). Les densités apparentes sur mottes ont été également mesurées sur 3 échantillons par horizon. Les écarts extrêmes entre échantillons sont compris entre 0,015 et 0,156 soit en moyenne 0,058 (erreur de l'ordre de 5 %).

Les erreurs de mesure sur la densité de solide sont très faibles.

Les différentes porosités ont été exprimées en indice des vides selon la formule :

$$\begin{aligned} \text{Indice des vides} &= 100 \times \text{volume des vides} / \text{volume de solide} \\ &= 100 \times (D_s - D_a) / D_a \end{aligned}$$

où D_s : densité de solide ; D_a : densité apparente

Le choix de ce système de référence offre l'avantage de rapporter à une constante (volume de solide) les mesures de porosité d'un même horizon. Les données qui en résultent sont additives et l'interprétation des résultats est facilitée.

Le comportement physico-hydrique

L'étude du comportement physico-hydrique des sols comporte trois aspects qui seront abordés successivement par l'analyse des courbes d'indice d'eau et d'indice des vides établies pour les matériaux constitutifs des différents horizons : le comportement hydrique, le retrait-gonflement et les relations porosité-aération

La méthode d'étude repose sur l'utilisation d'un dispositif qui permet de fixer le potentiel hydrique d'une petite motte (volume de l'ordre de 5 cm³) en dessiccation ou réhumectation sur une gamme de pF allant de 1 à 4,2. Les mesures ont été effectuées sur des mottes prélevées comme précédemment dans les conditions d'humidité de terrain. Pour chaque contrainte hydrique, le volume apparent et l'humidité relative pondérale sont déterminés. Les courbes d'indices d'eau et des vides permettent de décrire au niveau du ped l'évolution de la porosité occupée par l'eau et par l'air en fonction du pF. L'indice d'eau est défini de façon analogue à l'indice des vides par la formule :

$$\begin{aligned} \text{Indice d'eau} &= 100 \times \text{volume d'eau} / \text{volume de solide} \\ &= H \% \times D_s \end{aligned}$$

où H % : humidité relative pondérale exprimée en pour cent

D_s : densité de solide

Ce type d'analyse a été largement pratiqué sur des matériaux expérimentaux et naturels (Tessier, 1984 ; Chrétien, 1986).

RÉSULTATS

Typologie des solums

Elle est schématisée sur la figure 1 où sont mentionnées également les teneurs en matière organique des horizons :

- les 3 profils possèdent un horizon organique de surface O mais à 20 ans il se réduit à un OL peu épais (2 cm) ; à 40 ans, c'est un horizon complet avec couches OL, OF et OH mais assez peu épais (5 cm) et à 60 ans il présente un OL et un OF (5 cm) mais pas d'OH distinct ;

- les horizons A organo-minéraux sont toujours bien développés et de 2 types. Les A_1 ont des teneurs élevées et comparables en matière organique (6,3 à 7,2 %) mais diffèrent nettement par leur épaisseur : à 20 ans l' A_1 est très épais (27 cm) et correspond à la définition d'un Ah selon la nomenclature du R.P. 95 tandis qu'à 40 et 60 ans, il est plus réduit, respectivement 12 et 17 cm. Les horizons A_2 ont également des teneurs assez élevées en matière organique (3,4 à 3,7 %) mais des épaisseurs comparables ;

- l'horizon Sal, pauvre en matière organique (0,8 à 1 %) apparaît à 50 cm de profondeur pour le peuplement de 20 ans mais seulement à 35 et 37 cm dans ceux de 40 et 60 ans ;

- enfin, les 3 profils possèdent un horizon C à forte charge en éléments grossiers (cailloux, pierres et blocs).

Ainsi, en résumé, les teneurs en matière organique des horizons Ah- A_1 et des horizons A_2 , voire même des horizons Sal sont du même ordre de grandeur dans les trois peuplements mais ce qui différencie ces sols, c'est essentiellement l'épaisseur des horizons Ah- A_1 laquelle se répercute également sur l'épaisseur totale des horizons organo-minéraux : 57 cm à 20 ans, 35 cm à 40 ans et 37 cm à 60 ans. Sur le plan de la systématique des humus et des sols, le profil 20 ans avec un OL (aiguilles et brindilles peu transformées) peu épais et des horizons Ah et A_2 très épais et biomacrostructurés ne présente en aucun cas un humus de type dysmull, nous le qualifierons d'«eumull désaturé acide» (R.P. 95 - Typologie des formes d'humus). En revanche, les profils 40 et 60 ans se caractérisent par des humus à fonctionnement biologique ralenti plutôt du type eumoder (OL, OF, OH, A) dans le 1er cas et hémimoder (OL, OF, A) dans le second. Ainsi, selon le R.P. 95 le solum du peuplement de 20 ans est un ALOCRISOL TYPIQUE humifère et ceux de 40 et 60 ans des ALOCRISOLS TYPIQUES.

Figure 1 - Représentation schématique des trois sols forestiers étudiés (les taux de matière organique exprimés en % sont mentionnés pour chacun des horizons).

Figure 1 - Diagram representing the three soils (the organic matter content expressed as % of DM is indicated for each horizon).

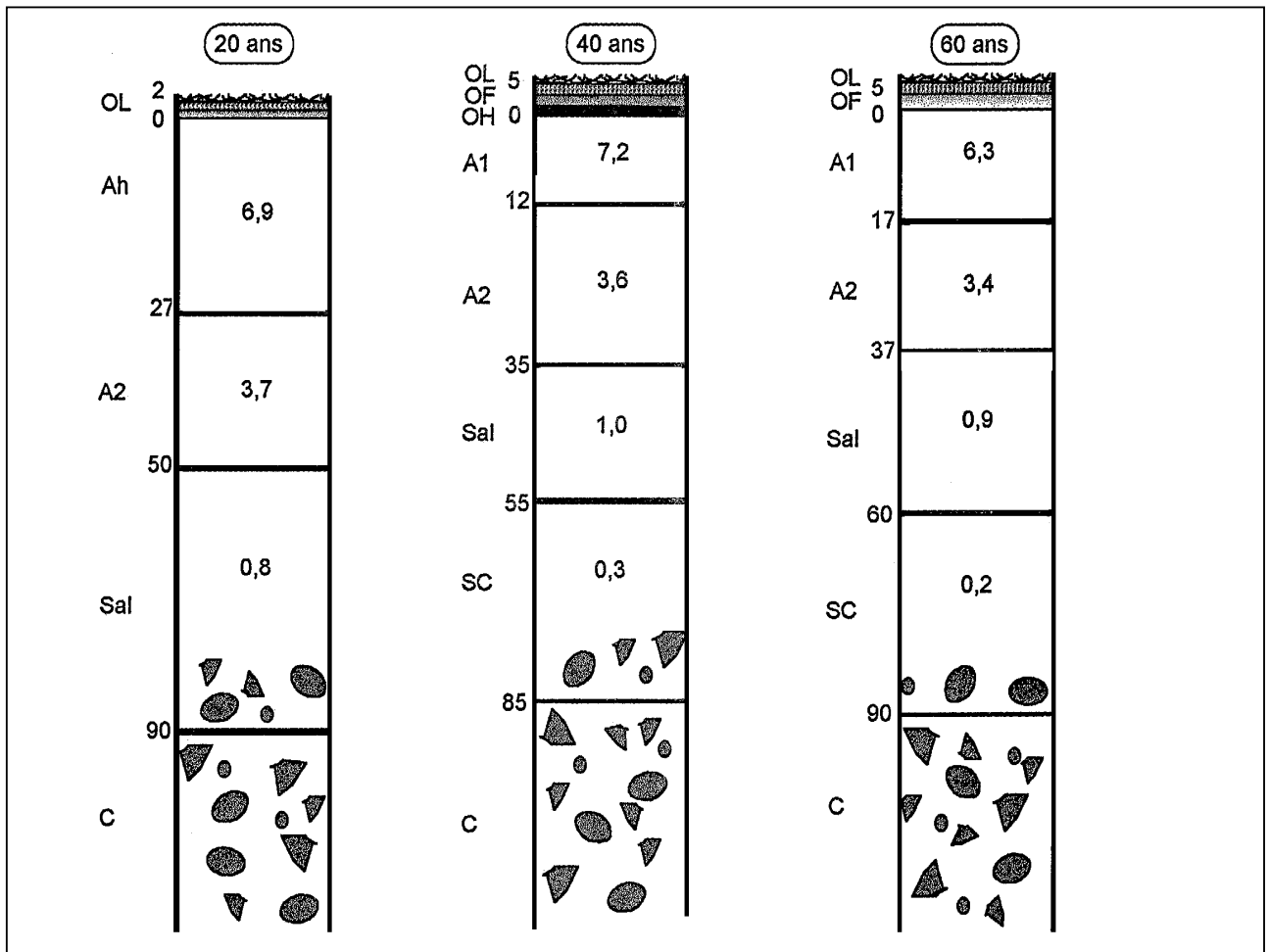


Figure 2 - Représentation graphique des différentes composantes de la porosité du sol.

Figure 2 - Diagram representing the different components of soil porosity.

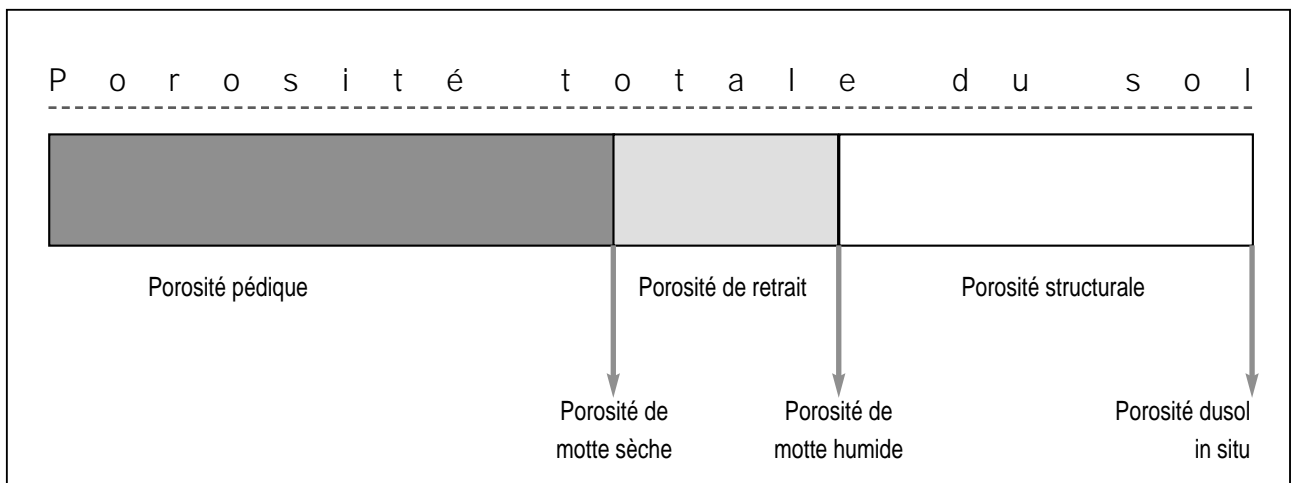
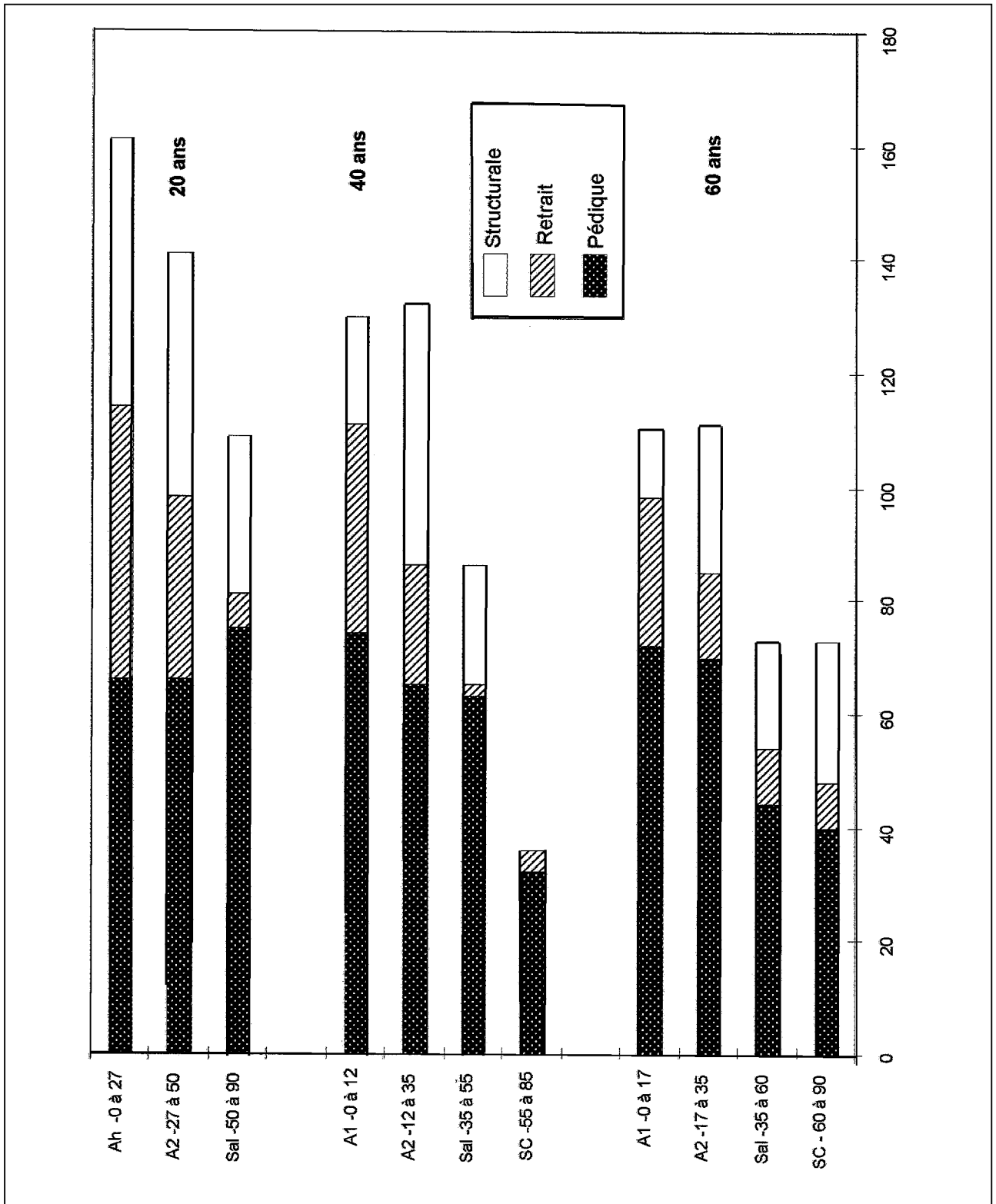


Figure 3 - Profils porosimétriques des sols des trois peuplements (porosité exprimée en indice des vides).
 Figure 3 - Porosity profiles of the three soils (porosity expressed as void index).



	Horizon	Profondeur en cm	Porosité exprimée en indice des vides				
			Totale	Humide	Pédique	Retrait	Structurale
Peuplement 20 ans	Ah	0 à 27	161	114	66	48	47
	A2	27 à 50	142	99	66	32	43
	Sal	50 à 90	109	81	75	6	28
Peuplement 40 ans	A1	0 à 12	130	111	74	37	19
	A2	12 à 35	132	86	65	21	46
	Sal	35 à 55	86	65	63	2	21
	SC	55 à 85		36	32	4	
Peuplement 60 ans	A1	5 à 17	110	98	72	26	12
	A2	17 à 35	111	85	70	15	26
	Sal	35 à 60	73	54	44	10	19
	SC	60 à 90	73	48	40	8	25

Tableau 2 - Résultats des calculs des différentes composantes de la porosité pour les sols des trois peuplements.

Table 2 - Quantification of the different components of porosity for the soils of the three stands.

Porosité des sols et ses composantes

Les mesures de densité apparente et de densité de solide effectuées à différentes échelles in situ et sur mottes ont permis de quantifier la porosité totale de chacun des horizons et ses 3 composantes représentées schématiquement sur la figure 2 :

- la porosité structurale (porosité in situ - porosité de motte humide) grossière, fissurale, macrostructurale et macrofaunique,
- la porosité de retrait (porosité de motte humide - porosité de motte sèche) qui représente la valeur du retrait à l'échelle du ped,
- la porosité pédique (porosité de motte sèche) fine, texturale, microstructurale et microfaunique.

La détermination de la porosité et de ses composantes pour chacun des horizons des sols étudiés offre un intérêt certain non seulement sur le plan du fonctionnement hydrique global du réservoir-sol mais également au niveau du développement et du comportement des systèmes racinaires des arbres.

Les résultats des mesures de densités sont présentés au tableau 1, les calculs des différentes porosités au tableau 2 et les profils porosimétriques à la figure 3. Ils seront commentés en comparant les trois peuplements d'âge différent :

- quel que soit le type d'horizon considéré du haut en bas des solums, la porosité totale de cet horizon décroît avec l'âge du peuplement. Cette diminution entre les peuplements 20, 40 et 60 ans est globalement plus importante dans les horizons organo-minéraux Ah-A₁ (51 points) que A₂ (31 points), de même que dans l'horizon Sal (36 points). On peut souligner que, dans les horizons Ah-A₁, la diminution est plus importante entre les peuplements 20 et 40 ans (31 points) que 40 et 60 ans (20 points) alors que dans les horizons A₂, elle est plus faible entre les peuplements 20 et 40 ans (10 points) que 40 et 60 ans (21 points). A noter également que la porosité de l'horizon Ah du peuplement

de 20 ans est nettement supérieure à celle des autres horizons ;

- pour ce qui concerne les composantes (ou compartiments) de la porosité totale des horizons (figure 3), il apparaît que la porosité pédique présente assez peu de variations puisque sa composante principale, la porosité texturale, est en rapport avec la granulométrie des matériaux (Fiès, 1978 ; Chrétien et Pédro, 1987) assez constante dans les trois solums étudiés. De fait, les écarts les plus nets paraissent liés aux particularités granulométriques, en particulier dans les horizons Sal et C : porosité un peu plus élevée dans le Sal de 20 ans (taux d'argile légèrement supérieur) et surtout porosité nettement plus faible dans le C de 40 ans (pauvre en argile et riche en sables grossiers) et dans les Sal (riche en graviers) et C de 60 ans (pauvre en argile et riche en sables grossiers).

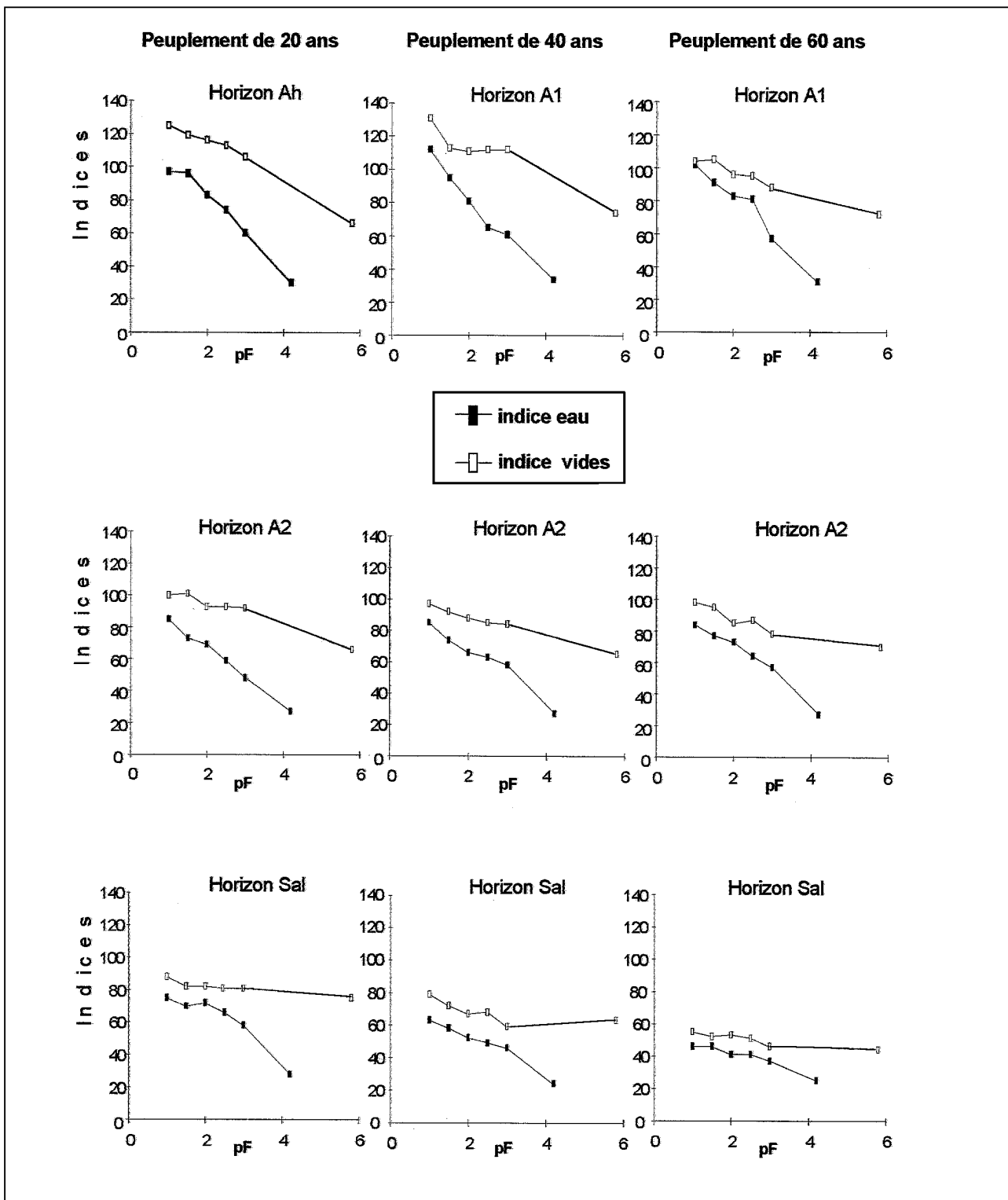
La porosité de retrait est très liée à la teneur en matière organique des horizons. Elle est élevée dans les horizons organo-minéraux mais diminue régulièrement du Ah au A₁ ainsi que dans les A₂ en fonction de l'âge du peuplement. Elle est très faible dans les horizons minéraux Sal et C.

Enfin, la porosité structurale des horizons Ah-A₁ diminue également de façon marquée avec l'âge du peuplement (tableau 2) : élevée dans le Ah de 20 ans (47 points), elle devient faible dans les A₁ de 40 ans (19 points) et de 60 ans (12 points). Pour les horizons A₂, cette diminution concerne uniquement le peuplement de 60 ans. A noter que la porosité structurale est nettement plus faible dans les horizons A₁ que dans les A₂ des peuplements de 40 et 60 ans, ce qui n'est généralement pas le cas (Chrétien, 1987). Elle est à peu près stable dans les horizons minéraux Sal et C.

Ainsi, en résumé, on constate globalement une diminution très nette de la porosité totale des horizons organo-minéraux Ah-A₁ et dans une moindre mesure A₂ ainsi que de leurs composantes «pédologiques» (porosité structurale et de retrait) avec l'âge des peuplements. Elle est peu marquée dans les horizons Sal.

Figure 4 - Courbes d'indice d'eau et d'indice des vides des trois peuplements. (La surface comprise entre ces deux courbes représente la porosité ouverte à l'air)

Figure 4 - Variation of the void and water indexes with soil depth in the three soils. (Area between the two curves represent porosity open to air)



Comportement physico-hydrigue

Les résultats des mesures expérimentales (valeurs moyennes obtenues à partir de 5 échantillons par horizon) ainsi que ceux des calculs d'indices conduisent à l'établissement des courbes d'indice d'eau et d'indice des vides relatives aux sols des trois peuplements présentées sur la figure 4. Leur interprétation de gauche à droite par type d'horizons permet de bien faire ressortir l'évolution des caractéristiques c'est-à-dire des conditions physico-hydrigues qui sont offertes aux racines des arbres en fonction de l'âge des peuplements.

Courbes d'humidité

Les courbes traçant l'évolution de l'humidité (exprimée en indice d'eau) en fonction du pF indiquent que, d'une façon générale, à pF fixé, l'humidité d'un horizon donné est supérieure à celle de l'horizon situé au-dessous. Pour ce qui concerne la variation d'humidité en fonction de la diminution du potentiel hydrique, on constate, d'après les données ci-dessous exprimant les écarts d'indice d'eau entre pF 4,2 et pF 2 (références de la capacité au champ pour ce type de textures) que :

	20 ans	40 ans	60 ans
horizons Ah-A ₁	53	47	52
horizons A ₂	42	39	46
horizons Sal	44	28	16

- pour un même âge de peuplement, plus l'horizon est profond, plus la rétention d'eau est faible (à l'exception de l'horizon Sal de 20 ans plus argileux que le A₂) ;

- pour chacun des types d'horizons, en fonction de l'âge des peuplements, le comportement est singulier. Dans les horizons Ah-A₁, l'absorption d'eau augmente avec l'âge, mais c'est à 40 ans dans l'horizon le plus organique qu'elle est la plus élevée. Dans les horizons A₂, à taux de matière organique à peu près équivalents, le comportement est identique quel que soit l'âge du peuplement. Enfin dans les horizons Sal, l'absorption d'eau décroît nettement avec l'âge bien que le taux d'argile soit le plus élevé à 60 ans.

Ainsi la diminution de la variation d'humidité peut dans de nombreux cas être mise en relation avec une diminution du taux d'argile et surtout de matière organique ainsi qu'une augmentation de la fraction de sables grossiers, voire de graviers. Mais dans le détail cette interprétation n'est pas toujours possible et d'autres facteurs d'ordre morphologique notamment (forme, connexion des pores...) entrent certainement en jeu.

Courbes de retrait-gonflement

On constate dans tous les cas que pour un même peuplement, plus l'horizon est profond, plus la courbe d'indice des vides se rapproche de l'horizontale et plus les valeurs sont faibles. Cette observation traduit le fait que la capacité de gon-

fler du matériau diminue avec la profondeur. Là encore il existe un lien réel avec la teneur en argile et en matière organique des horizons mais on peut y voir également un effet de la pédogenèse entre les horizons minéraux issus de l'altération des roches-mères et les horizons humifères de surface.

Par ailleurs et d'une façon générale, la variation de l'indice des vides en fonction du pF diminue lorsque l'âge du peuplement augmente ainsi qu'en témoignent les écarts d'indice entre pF 5,8 et pF 1 dans les différents horizons :

	20 ans	40 ans	60 ans
horizons Ah-A ₁	59	57	32
horizons A ₂	34	32	28
horizons Sal	13	16	11

Cette variation est particulièrement faible dans l'horizon A₁ du peuplement de 60 ans, indiquant un potentiel de gonflement limité. Elle peut comporter aussi plusieurs phases, comme par exemple dans l'horizon A₁ du peuplement de 40 ans avec gonflement de pF 5,8 à pF 3, stabilité de pF 3 à pF 1,5 et à nouveau gonflement de pF 1,5 à pF 1.

On peut déduire de tous ces résultats que l'intensité de gonflement des matériaux n'est pas directement corrélée avec leur capacité de rétention d'eau.

Porosité à l'air

Globalement, pour chacun des peuplements, plus l'horizon considéré est profond plus les courbes d'indice des vides et d'indice d'eau sont proches, c'est-à-dire plus la fraction de la porosité ouverte à l'air est faible. Mais cette fraction diminue de façon variable dans chacun des horizons au cours de l'humectation et du gonflement des peds traduisant ainsi l'accès successif et irrégulier à des familles de pores de plus en plus fins (Chrétien et Pédro, 1988 ; Chrétien et Tessier, 1988).

L'évolution de la porosité ouverte à l'air par type d'horizons est particulièrement intéressante à considérer car elle présente une diminution systématique en fonction de l'âge des peuplements. C'est dans les horizons Ah-A₁ que ce phénomène est le mieux marqué : à 20 ans, dans le Ah la porosité à l'air décroît faiblement vers les bas pF mais reste encore importante à pF 1 (28 points) ; à 40 ans, encore largement ouverte à pF 2,5 (47 points), elle se ferme dès pF 1,5 (18 points) ; enfin à 60 ans, elle se ferme dès pF 2,5 (14 points) pour pratiquement disparaître à pF 1 (2 points). Mais il persiste, bien que moins accusé, dans les horizons A₂ et même Sal.

Synthèse et discussion

La caractérisation morphologique de ces sols forestiers sous plantation de Douglas ainsi que les résultats obtenus sur les propriétés de leur espace poral à l'aide de différentes méthodes permettent de proposer une synthèse globale des

modifications observées au cours de l'évolution de l'écosystème, celle-ci étant jalonnée par trois stades importants de son développement représentés par les peuplements de 20, 40 et 60 ans. Il en ressort quatre points principaux :

- une évolution des horizons hologaniques de surface qui s'épaississent et se différencient en couches OL, OF et OH avec passage d'un mull acide à 20 ans vers un moder à 40 ans et plus ;

- une réduction de l'épaisseur des horizons A organo-minéraux surtout entre 20 ans (50 cm) et 40 ans (35 cm) avec en particulier transformation de l'horizon Ah de 27 cm en un horizon A₁ de 12 cm. A noter que tous ces horizons conservent des taux de matière organique à peu près constants ;

- une diminution de la porosité totale in situ des horizons A, surtout entre le Ah à 20 ans et le A₁ à 40 ans, s'accompagnant d'une diminution concomitante de ses deux composantes pédologiques, la porosité structurale et la porosité de retrait. En outre à 40 et 60 ans, les horizons A₁ et A₂ ont la même porosité ;

- si la quantité d'eau absorbée par unité de volume en fonction de la diminution du potentiel hydrique varie assez peu avec l'âge du peuplement, en revanche, le gonflement des horizons A à l'échelle du ped diminue systématiquement. Il en résulte que la porosité ouverte à l'air, importante à 20 ans est plus réduite à 40 ans et presque nulle à 60 ans avec pour conséquence la présence d'une phase d'anaérobiose en période humide.

Ainsi, globalement, toutes les caractéristiques étudiées concourent à affirmer que l'on constate un tassement progressif et généralisé des horizons A organo-minéraux. Ce tassement est le plus accentué lors du passage du Ah au A₁ entre 20 et 40 ans. Il existe aussi faiblement dans les horizons minéraux de profondeur Sal. La transformation essentielle dans la morphologie des solums s'opère donc entre 20 et 40 ans ; par la suite il s'agit plutôt d'une lente évolution du tassement accompagnée de l'apparition de traces d'engorgement.

Une question se pose alors : quelle est l'origine de ce tassement ?

Il résulte vraisemblablement de plusieurs types de contraintes, les unes exercées au fil des années par le poids du sol lui-même, par le poids du peuplement (estimé à 1000 t de matière humide par ha pour le peuplement de 60 ans), par la puissance du bras de levier que constituent des arbres de 35 m de haut lors des épisodes venteux et enfin par le passage des engins d'exploitation forestière. Notons que deux de ces composantes sont d'autant plus fortes que le peuplement est plus âgé. En effet, la biomasse des peuplements augmente avec l'âge de ceux-ci tout comme le nombre de passages pour les travaux de débardage (Villette, 1994) :

Peuplement	Biomasse (matière sèche)	Nbre interven tions
20 ans	93,4 t/ha	0
40 ans	261,2 t/ha	4
60 ans	415,1 t/ha	8

De même la répartition des racines dans le sol en fonction de la profondeur est nettement plus élevée dans les horizons A₁ des peuplements de 40 et 60 ans, corroborant les difficultés de colonisation des horizons profonds des peuplements les plus âgés (tableau 3) :

Il est à noter également que ce tassement s'accompagne d'une modification de la nature et de l'organisation de la matière organique du sol en liaison avec l'évolution des humus (transformation d'un Ah en A₁) en fonction de l'âge des peuplements.

A ce sujet, une réserve importante doit être formulée concernant l'histoire de ces parcelles (Marques, 1996). Les placettes des trois peuplements actuels de Douglas ont connu une occupation un peu différente dans le passé qui pourrait en partie expliquer les écarts de teneur en matière organique et les différences d'épaisseur des horizons organo-minéraux des sols. Il s'y ajoute, comme souligné dans la première partie une certaine hétérogénéité du milieu : disparités pétrologiques des roches mères, phénomènes de colluvionnement et différences granulométriques des horizons pédologiques.

La difficulté de cette approche de terrain et ses limites apparaissent clairement ici. Il semble, selon Marques (1996) que la comparaison entre les peuplements de 40 et 60 ans n'est pas ou peu biaisée par des effets parasites d'occupation des sols. Le jeune peuplement serait installé dans un site où les conditions sont sensiblement différentes des deux autres.

Cependant, a contrario, il nous paraît vraisemblable que l'é-

Tableau 3 - Distribution des racines dans les différents horizons des sols des trois peuplements (valeurs relatives) (Marques, 1996).

Table 3 - Roots distribution in the different horizons of the soils in the three stands (relative values) (Marques, 1996).

	20 ans	40 ans	60 ans
0-15 cm	25	39	34
15-30 cm	23	24	29
30-60 cm	33	23	30
60-80 cm*	19	14	7

* 60 à 100 dans le peuplement de 20 ans.

volution des solums de cette chronoséquence de peuplements de Douglas puisse en grande partie s'expliquer par l'action couplée de la gestion forestière et des facteurs pédogénétiques caractérisant un milieu acide et aluminique. Ainsi, partant à la plantation d'un sol labouré ou travaillé à horizon LA (comme on peut le constater dans les plantations actuelles du Morvan, par exemple), il évoluerait avec le temps vers un solum à mull acide épais puis à moder plus réduit en épaisseur, plus tassé et moins poreux. De même, bien que la différence maximum d'âge entre les peuplements étudiés ne soit que de 40 ans, on peut se demander si la différenciation de plus en plus marquée entre les horizons organo-minéraux et l'horizon sous-jacent n'est pas le signe d'une différenciation pédogénétique liée au développement du peuplement.

CONCLUSION

Des recherches entreprises sur des plantations de Douglas d'âge respectif 20, 40 et 60 ans dans les monts du Beaujolais ont permis de préciser l'impact de cette essence sur le fonctionnement biogéochimique du sol et la qualité des eaux superficielles. Dans ce cadre, nous avons conduit une étude de l'évolution des caractères morphologiques et physico-hydrauliques de ces sols forestiers à l'aide de plusieurs méthodes complémentaires d'analyse de la porosité. Celle-ci a mis en évidence que les solums évoluaient avec le temps depuis un Alocriisol humifère à horizon Ah épais (à 20 ans) vers des Alocriisols à horizons organo-minéraux A₁ et A₂ de même teneur en matière organique mais fortement réduits en épaisseur. Cette transformation s'accompagne d'un tassement progressif et généralisé qui se traduit par une diminution de la porosité totale in situ, en particulier dans les horizons organo-minéraux, ainsi que de ses composantes pédologiques, la porosité structurale et la porosité de retrait. De 40 à 60 ans, on observe de surcroît une perte d'aptitude au gonflement des matériaux ainsi qu'une fermeture progressive de la porosité à l'air générant des conditions anaérobiques.

Ce tassement est, sans conteste, la conséquence d'un certain nombre de contraintes exercées au fil des années par le poids du sol, le poids du peuplement, l'effet levier des arbres, le passage des engins d'exploitation forestière mais il peut être lié également pour partie à l'évolution des humus en fonction de l'âge des peuplements.

Certes, les conclusions de cette étude imposent un certain nombre de réserves. Le choix des chronoséquences engendre des contraintes à la fois sur le milieu et les peuplements et se heurte à la variabilité des systèmes naturels. Les variations locales de roche-mère et l'histoire de l'occupation des placettes sont les deux paramètres qui posent le plus de difficultés à ce sujet. De même, en raison de l'absence de répétition (une seule fosse a été étudiée dans chacun des peuplements) et de l'hété-

rogénéité probable du sol au sein de chaque peuplement, les conclusions de notre analyse doivent être relativisées et méritent des vérifications. Toutefois, la convergence des résultats obtenus permet de proposer une tendance évolutive des types d'humus, des caractères morphologiques et des propriétés physico-hydrauliques de ces sols forestiers sous plantation de Douglas en relation avec l'âge des peuplements, qui semble bien s'intégrer au contexte pédogénétique de l'écosystème étudié.

La diminution de la porosité du sol observée dans cet exemple traduit incontestablement une régression de la composante physique de la fertilité du sol. Il s'agit là d'une contrainte supplémentaire pour l'alimentation des peuplements vieillissants dont le système racinaire rencontrerait des contraintes plus fortes limitant son développement et par là même le volume de sol prospecté, avec les conséquences à prévoir sur le potentiel nutritif disponible. Il est possible que le douglas sensible à l'anoxie soit un bon révélateur de cette évolution de structure du sol comme le montre l'évolution de la distribution des racines au cours de la vie du peuplement. Cette évolution de structure n'est probablement pas spécifiquement liée au douglas, mais il faudrait développer cette approche dans d'autres situations pour le montrer. Il est difficile de prévoir les effets sur le long terme car la technique de reboisement, en particulier si elle comprend un travail du sol, peut se traduire par un nouveau foisonnement du sol.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Messieurs M. Bonneau et J.C. Fies pour leur lecture critique très constructive du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Boisset N., 1996 - Mise en évidence d'un colluvionnement par l'étude minéralogique et chimique des métatufs et d'une toposéquence constituée de trois profils d'altération développés sur tuf et métatufs (Beaujolais). Diplôme de Recherche Doctorale : Univ. Henri Poincaré Nancy, 156 p. + annexes.
- Breda N., 1994 - Analyses des fonctionnements hydriques des chênes sessile (*Quercus patraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles ; effet des facteurs du milieu de l'éclaircie. Thèse de Doctorat en Biologie Forestière, Université de Nancy I, 59 p.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jarnage M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. EGS, vol. 3, n° 1, 27-40.
- Chrétien J., 1982 - L'espace poral du sol : ses composantes, exemple d'une méthode d'étude. In « Comportement physique et mécanique des sols ». Séminaire du Département de Science du Sol INRA, 9-24.
- Chrétien J., 1986 - Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et sur terrasses fluviales. Thèse Univ. de Dijon, Pub. INRA,

- 412 p.
- Chrétien J., Pédro G., 1987 - Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques. Cas des terrasses alluviales de la Saône. Cah. ORSTOM, ser. Pédologie, vol. XXIII, n° 1, 43-54.
- Chrétien J., Pédro G., 1988 - Importance du mode de mise en place des matériaux pédologiques dans l'organisation des sols : origine et caractéristiques de l'espace poral. Pédologie, XXXVIII-2, 123-136.
- Chrétien J., Tessier D., 1988 - Influence du squelette sur les propriétés physiques des sols : hydratation, gonflement et aération. Sc. du Sol, vol. 26-4, 255-268.
- CPCS (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols), 1967 - Classification française des sols, 87 p.
- Dambrine E., Bonneau M., Ranger J., Mohammed A.D., Nys C., Gras F., 1995 - Cycling and budgets of acidity and nutrients in Norway spruce stands in northeastern France and the Erzgebirge (Czech Republic). Ch 3.3, 233-258. In Landmann and Bonneau Eds, Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains. Elsevier Pub., 461 p.
- Dupouey J.L., Thimonier A., Behr P., 1997 - Variation de la densité des sols des hêtraies du nord-est de la France en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. EGS, vol. 4, n° 1, 43-52.
- Duvigneaud P., 1985 - Le cycle biologique dans l'écosystème forêt. Ed. ENGREF Nancy 1 vol 150 p.
- Ezzaim A., Turpault M.P., Ranger J., 1997 - Weathering processes in an acid brown forest soil (Beaujolais-France). II. Quantitative mineralogy, mineral evolution, and localization of base cations in particle size fractions of the fine earth (< 2 mm). Soumis à Géoderma.
- Fiès J.C., 1978 - Porosité du sol : étude de son origine texturale. Thèse Univ. Louis Pasteur. Strasbourg, 139 p.
- Fiès J.C., Stengel P., 1981 - Densité texturale des sols naturels. I Méthode de mesure. II Eléments d'interprétation. Agronomie, 1 (8), 651-666.
- GEPPA (Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée), 1982 - Synthèse des travaux de la commission cartographie (1970-1981). INRA-SESCPF multicopie, 20 p.
- Koerner W., 1994 - Histoire des parcelles forestières : d'un passé agricole à une fertilité actuelle du milieu. DEA Géographie. Paris I, 65 p.
- Maertens C., 1965 - Deux méthodes de détermination de la densité du sol en place. Leur possibilité d'utilisation. Bull. AFES, 8, 283-293.
- Marques R., 1996 - Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) dans les Monts du Beaujolais (France). Thèse ENGREF Nancy, 240 p.
- Monnier G., Stengel P., Fiès J.C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron., 24 (5), 533-545.
- Ranger J., Bonneau M., 1984 - Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Le cycle biologique en forêt. RFF XXX VI 2., 93-112.
- Ranger J., Bonneau M., 1986 - Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Les effets de la sylviculture. RFF, XXXVIII, 2, 105-123.
- Ranger J., Colin-Belgrand M., Nys C., 1995 - Le cycle biogéochimique des éléments majeurs dans les écosystèmes forestiers. Importance dans le fonctionnement des sols. EGS, vol. 2, n° 2, 119-134.
- Référentiel Pédologique, 1995 - Coordinateurs Baize D. et Girard M.C. INRA Editions, 332 p.
- Stengel P., 1979 - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. Ann. Agron., 30 (1), 27-51.
- Switzer G.L., Nelson L.E., Smith W.H., 1968 - The mineral cycling in forest stands, p. 1-9. In Tennessee Valley Authority. Forest fertilisation, 306 p.
- Tessier D., 1984 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Univ. Paris VII, Pub. INRA, 360 p.
- Villette S., 1994 - Etablissement du bilan hydrique sur une chronoséquence de peuplements de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) du Beaujolais. Essais de modélisation ENITA/INRA - CRF Nancy, Mémoire de fin d'études, 50 p.