

Effet des substitutions d'essences forestières et des amendements sur les propriétés physiques d'un Alocrisol

Site expérimental de la forêt de Breuil-Chenue, Morvan, France

G. Levrel et J. Ranger

INRA, Centre de Nancy, Biogéochimie des écosystèmes forestiers 54280 Champenoux

RÉSUMÉ

Nous avons étudié l'effet de différents peuplements forestiers sur les caractères physiques et hydriques d'un Alocrisol de la forêt de Breuil (Morvan). Des plantations de hêtre, de Douglas, d'épicéa, et de chêne, ont été substituées à un taillis sous futaie de hêtre et chêne qui constitue la référence "forêt native". Les plantations sont âgées de 30 ans et seul le facteur espèce varie. De plus, le Douglas et l'épicéa ont reçu ou non une fertilisation/amendement en N, P, K et Ca.

Les sols sous chaque parcelle sont analysés par niveaux de profondeur, tous les 5 cm jusqu'à 15 cm puis tous les 10 cm (jusqu'à 25 cm) et tous les 15 cm (jusqu'à 70 cm).

Deux indicateurs physiques ont été observés en fonction des essences et des traitements :

- la stabilité structurale des sols : les tests ont porté sur leur capacité à résister à l'éclatement par immersion rapide à l'eau, leur résistance à la réhumectation lente, et leur résistance à la déstructuration mécanique.

- la réserve utile (RU) et sa répartition porale. Des échantillons des différents horizons de sol de chaque essence ont été placés dans des extracteurs à plaques, et ont été soumis à des pressions croissantes [pF 2,5 (0,33 bar), pF 3 (1 bar), pF 3,5 (3,3 bars), pF 4,0 (10 bars), et pF 4,2 (15 bars)], ce qui permet d'estimer une répartition de la réserve utile dans des porosités équivalentes.

Les résultats montrent qu'il existe des changements significatifs à la fois sur la stabilité structurale et sur la réserve en eau et sa répartition dans les classes porales. L'effet des couverts forestiers se fait ressentir en surface pour ces deux critères. Le classement des couverts est différent pour les deux propriétés, la stabilité structurale croît du chêne au Douglas en passant par le hêtre, le taillis sous futaie, et l'épicéa. En revanche, les sols sous chêne présentent la RU la plus forte, ceux sous Douglas la plus faible avec une conservation de l'ordonnement pour les espèces intermédiaires. L'amendement a un effet positif significatif sur les propriétés physiques du sol.

Ces changements occasionnés par les essences et l'amendement du sol, sont liés à des modifications de la qualité des matières organiques des sols et probablement à un changement de nature et d'activité du cortège de micro-organismes. Ceci pourrait expliquer la relation inverse observée entre réserve utile et stabilité structurale pour l'horizon de surface.

Mots clés

Substitution d'essences, stabilité structurale, Réserve Utile, sols forestiers, porosité

SUMMARY**MODIFICATION OF PHYSICAL PROPERTIES OF FOREST SOIL WITH PLANTATION SUBSTITUTION AND FERTILIZATION TREATMENT (Experimental Breuil-Chenue forest plots, Morvan, France)**

The impact of forest tree substitutions, on the morphological and physico-hydric characteristics of an Alocrisol (AFES, 1995 (figure 1); Dystric Cambisols-FAO-UNESCO, 1989) (Morvan) were evaluated. The original beech forest was clearcut and replanted with Norway spruce, Douglas fir, beech, and oak (figure 2). The plantations were made in 1976 and a fertilization treatment was operated in Douglas-fir and Norway spruce stands in 1979 in order to test the remediation on soil acidification and stand production. No other source of variation than tree species and fertilisation occurred.

Forest species changes had an effect on chemical properties (bulk density, pH, quality and quantity of organic matter, base cation saturation), biological activity, and consequently on soil physical properties (table 1).

The results showed that the stability of soil aggregates changed according to each species. Soil aggregates under Douglas-fir and Norway spruce showed the high stability, native forest, beech plantation and Norway spruce had intermediary stability, and oak had the low (table 2; figure 3).

The porosity size was quantified on clumps at field moisture and after air-drying. The physico-hydric behaviour of the horizons was described by water retention curves between pF 4,2 and pF 2,5. Oak and spruce had the highest water retention, beech and native forest were intermediate, and Douglas fir had the low (table 3; figures 4 and 5). Fertilisation improved physical properties.

Differences due to species and fertilisation treatments were correlated with organic matter quality in soils and perhaps with the soil microbe activity and biomass (tables 4 and 5). These differences could explain the negative relationship between available water and structure stability in the soil upper layers.

Key-words

Species substitution, forest soil, aggregate stability, porosity, water retention

RESUMEN**EFFECTO DE LAS SUBSTITUCIONES DE ESPECIES FORESTALES Y DE ABONOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ALOCRISOL**

Se estudio el efecto de diferentes poblaciones forestales sobre las características físicas y hídricas de un Alocrisol del bosque de Breuil (Morvan). Se substituyo plantaciones de haya, de Douglas, de picea, y de roble por soto bajo oquedad de haya y roble que constituye la referencia "selva nativa". Las plantaciones tienen 30 años de edad y solo el factor especie varia. Además, el Douglas y el picea recibieron o no una fertilización/abono en N, P, K y Ca.

Se analizaron los suelos de cada parcela por niveles de profundidad, cada 5 cm hasta 15 cm, cada 10 cm hasta 25 cm y cada 15 cm hasta 70 cm.

Se observaron dos indicadores físicos en función de las especies y de los tratamientos:

- la estabilidad estructural de los suelos: Se hicieron tests sobre sus capacidades a resistir al estallido por inmersión rápida en el agua, su resistencia a la rehumectación lenta, y su resistencia a la desestructuración mecánica (diferentemente que por estallido).

- La reserva aprovechada y su repartición de poros. Muestras de diferentes horizontes de suelo de cada especie se localizaron en extractores con placas y se sometieron a presiones crecientes (pF 2,5 (0,33 bares), pF 3 (0,3 bares), pF 3,5 (0,33 bares), pF 4,0 (0,33 bares), et pF 4,2 (0,33 bares) lo que permite estimar una repartición de la reserva aprovechada en porosidades equivalentes.

Los resultados muestran que existe cambios significativos a la vez sobre la estabilidad estructural y sobre la reserva en agua y su repartición en las clases de poros. El efecto de las cubiertas forestales se hace sentir en superficie para estos dos criterios. La clasificación de las cubiertas es diferente para las dos propiedades, la estabilidad estructural crece del roble al Douglas pasando por el haya, el soto bajo oquedad, y el picea. Al revés, el roble presenta la reserva aprovechable la más fuerte, el Douglas la más pequeña con una conservación del ordenamiento para las especies intermedias. La fertilización tiene un efecto positivo significativo sobre las propiedades físicas del suelo.

Estos cambios ocasionados por las especies y la fertilización, son ligados a modificaciones de la calidad de las materias orgánicas de los suelos y probablemente a un cambio de naturaleza y de actividad del acompañamiento de microorganismo. Esto podría explicar la relación inversa observada entre reserva aprovechada y estabilidad estructural para el horizonte de superficie. Se emprendieron ensayos para la modelización de la reserva aprovechable según las correlaciones factor x reserva aprovechable obtenidos con FTP., pero estas estimaciones no permiten detectar más el efecto especie.

Palabras clave

Substitución de especie, estabilidad estructural, reserva aprovechable, suelos forestales, porosidad.

À la fin de la seconde guerre mondiale, une politique productiviste se met en place pour satisfaire la demande de la filière bois. Le Fonds Forestier National (FFN) encourage les plantations d'essences à croissance rapide, tolérant les sols acides de moyenne montagne, soit en substitution d'essence soit pour l'afforestation de sols libérés par l'agriculture. Dans ce contexte, les monocultures de conifères ont été largement utilisées (environ 4 millions d'hectares - IFN, 2005).

Dans les années 70, la résorption programmée de ce déficit a conduit la Société à intégrer les concepts de qualité de l'environnement et de gestion durable des forêts et des sols forestiers, quand le dépérissement des forêts a fait craindre pour la pérennité de cet écosystème.

La substitution d'essence engendre des modifications de l'écosystème et l'enjeu est d'en identifier les effets pour permettre une gestion raisonnée des forêts (Ranger et Nys, 2003). Cette gestion doit permettre de conserver les différentes fonctions des sols, dans le cadre d'un maintien ou d'une amélioration du potentiel de production. Les plantations fortement productives et traitées semi-intensivement représentent un bon modèle pour étudier l'évolution de la fertilité du sol dans toutes ses composantes. En effet les éléments exportés par les récoltes n'étant pas restitués, l'acidification est un processus omniprésent qui menace directement la qualité du sol dans toutes ses composantes (Ranger et Nys, 2003). Concernant la physique du sol, les espèces végétales peuvent modifier l'agrégation du sol, probablement en raison des différences liées à la nature et à la qualité de l'enracinement (densité racinaire, excréments, mycorhisation, prélèvements d'eau et de nutriments), mais aussi en raison de la qualité et de la quantité de matières organiques apportées au sol et de la micro-faune et de la micro-flore qui lui sont associées (Ranger *et al.*, 2004; Thomas et Prescott, 2000; Amézketa, 1999).

L'objectif de ce travail est d'étudier les évolutions de paramètres de physique du sol, associées aux substitutions d'essence.

Cette étude a permis d'observer deux paramètres principaux: l'influence des essences forestières sur la stabilité structurale du sol et la répartition des classes porales du sol sous les différentes essences ainsi que les modifications engendrées sur la réserve utile.

Ces deux propriétés serviront d'indicateurs pour l'évolution de la qualité et du potentiel productif des sols sous les différentes essences forestières.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le site expérimental

Le site expérimental est situé en forêt domaniale de Breuil dans le Morvan au nord/est du Massif central, à 650 m d'altitude. Il a été mis en place en 1976 par M. Bonneau et ses collaborateurs

(Bonneau *et al.*, 1977). Le substratum géologique est constitué par le granite leucocrate de la « Pierre qui Vire » (Dejou, 1966 et 1967; Arousseau, 1976; Seddoh, 1973). Il est recouvert par des limons éoliens diffus et l'ensemble a subi une cryoturbation au cours du Quaternaire (Arousseau, 1996). Le sol est homogène, acide de type Alocrisol ($4 < \text{pH}_{\text{eau}} < 5$) et désaturé (S/T variant de 5 à 15 %). Sa texture est sablo-argileuse (Sa) (60 % de sables et moins de 20 % d'argiles et de limons), plus argileuse en surface et plus limoneuse dans l'arène (dépôts éoliens). L'humus de la forêt native est dégradé (dysmoder épais), avec une crypto-podzolisation de surface se traduisant morphologiquement et chimiquement par des fronts de chéluviation de Fe et Al. (Ranger *et al.*, 2004). La description du sol et ses principales caractéristiques physico-chimiques, sont présentées dans le *tableau 1* et sur la *figure 1*.

Le couvert forestier originel est un taillis-sous-futaie (TsF), fortement sollicité au XIX^e siècle pour la fourniture en bois de chauffage de la ville de Paris. Il est dominé par le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), et le chêne (*Quercus petraea* Liebl.). Le taillis appauvri est composé de diverses essences: *Quercus petraea* Liebl., *Betula pendula* Roth, *Corylus avellana* L. (Ranger *et al.*, 2004).

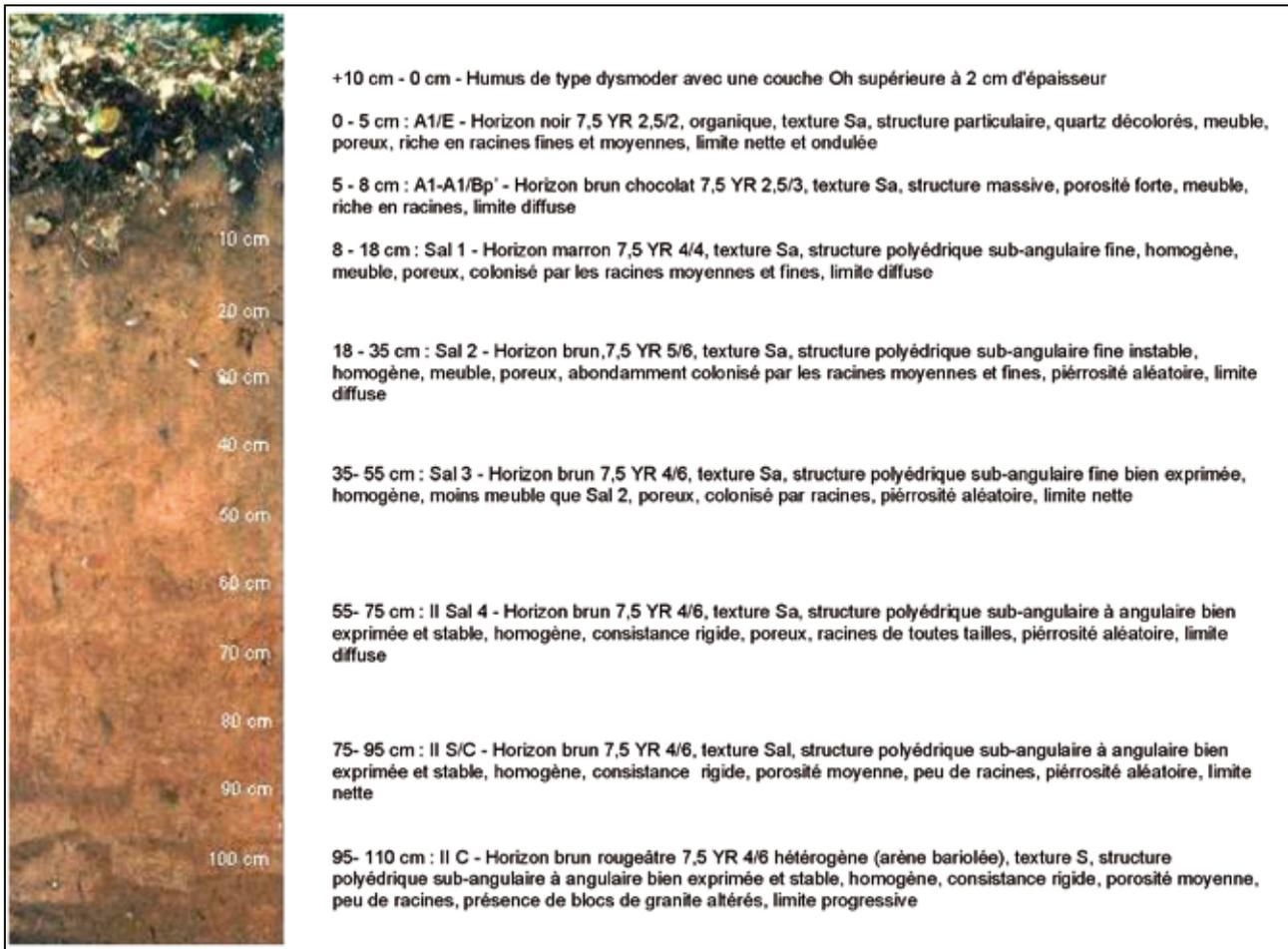
Une partie de la forêt native a été coupée à blanc, et des plantations comparatives correspondant aux essences dominantes de feuillus et de résineux de la forêt française ont été réalisées pour tester leur effet sur le sol: l'épicéa commun (*Picea abies* Karst.), le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco), le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le chêne (*Quercus petraea* Liebl.). Le dispositif a été installé après validation cartographique de l'homogénéité du site. Les peuplements étudiés sont des parcelles monospécifiques de 10 ares. Une parcelle de forêt native a été conservée en référence. Un doublement des parcelles, de Douglas et d'épicéa, a fait l'objet d'une amélioration supplémentaire *a priori* du sol par des amendements destinés à pallier l'éventuelle acidification du sol sous les conifères. Les éléments apportés au début de la plantation (NPK par pied en 1979 et P et Ca en plein en 1983), représentent au total 5,5 kg de N, 100 kg de P, 20 kg de K et 800 kg de Ca par ha.

L'échantillonnage a été réalisé sur la grille systématique utilisée pour le prélèvement des sols (*figure 2*). Les échantillons ont été prélevés en février 2005 et conservés à l'état frais en chambre froide en attendant leur traitement. Ce prélèvement hivernal, sous couvert neigeux, garantit une bonne saturation en eau du sol. Pour prendre en compte la variabilité spatiale des sols, quatre répétitions systématiques ont été faites par parcelle. Le sol a été prélevé jusqu'à 40 centimètres de profondeur sur les 4 profils par parcelle et un profil complet a été prélevé jusqu'à 70 cm. Les 7 niveaux de prélèvement sont: [0-5], [5-10], [10-15], [15-25], [25-40], [40-55], [55-70] cm.

Les données analytiques spécifiques aux profils étudiés (granulométrie, analyses des éléments totaux, éléments libres et échangeables et pH) proviennent de la base de données -sols- du site de Breuil, réalisée à partir de l'échantillonnage complet du site en 2001 (Ranger *et al.*, 2004).

Tableau 1 - Caractéristiques physico-chimiques moyennes du sol des peuplements (analyses rapportées à la terre fine séchée à 105 °C)**Table 1** - Mean physico-chemical characteristics of soil under different species

Essence	Profondeur (cm)	Analyse granulométrique				Matière organique			Densité		pH (eau)	Caractérisation du complexe d'échange cationique						
		Terre fine (% du sol total)	Argiles ---(g.kg ⁻¹ de sol sec)---	Limons	Sables	C (g.kg ⁻¹ de sol sec)	N (g.kg ⁻¹ de sol sec)	C/N	Da	Dr		CEC	Al (titré)	Fe	Mn	Mg	Ca	S/T
épicéa	0-5	79	169	212	619	47,5	2,5	19,3	1,04	2,42	4,3	7,18	5,91	0,18	0,09	0,16	0,15	0,11
	5-10	79	159	209	633	36,5	2,0	18,4	0,86	2,43	4,6	5,21	4,67	0,04	0,07	0,09	0,08	0,09
	10-15	82	155	217	629	25,1	1,4	18,5	0,95	2,43	4,8	3,95	3,51	0,02	0,06	0,05	0,05	0,08
	15-25	89	165	230	605	19,5	1,1	17,6	1,22	2,48	4,8	3,19	2,86	0,03	0,05	0,03	0,02	0,08
	25-40	88	160	225	615	12,7	0,6	15,9	1,22		4,8	2,64	2,34	0,01	0,05	0,03	0,03	0,10
	40-55	85	150	233	617				1,32		4,7	2,93	2,50	0,15	0,06	0,02	0,03	0,13
	55-70	87	153	232	615				1,63		4,8	2,72	2,31	0,08	0,10	0,02	0,03	0,13
épicéa amendé	0-5	79	202	202	596	60,8	3,0	20,8	0,71		3,9	8,44	6,53	0,40	0,05	0,17	0,39	0,15
	5-10	76	192	200	609	44,1	2,1	18,9	0,95		4,2	7,14	6,20	0,15	0,04	0,12	0,10	0,08
	10-15	77	191	211	598	34,4	1,8	18,3	1,09		4,5	5,30	4,81	0,04	0,05	0,07	0,04	0,06
	15-25	85	182	219	599	25,1	1,3	19,0	1,23		4,6	3,80	3,54	0,01	0,04	0,03	0,01	0,04
	25-40	85	199	234	568	15,8	0,8	17,9	1,28		4,6	2,89	2,69	0,01	0,04	0,03	0,01	0,05
	40-55	84	183	223	594				1,37		4,5	2,75	2,46	0,00	0,04	0,07	0,09	0,08
	55-70	82	184	226	590				1,37		4,5	2,94	2,75	0,00	0,04	0,02	0,00	0,04
Douglas	0-5	75	192	230	578	53,4	2,9	18,5	0,87	2,31	4,0	8,49	6,20	0,17	0,23	0,20	0,65	0,18
	5-10	73	184	214	603	46,2	2,5	18,6	0,92	2,26	4,1	7,14	5,93	0,11	0,09	0,13	0,16	0,10
	10-15	73	185	228	588	35,2	2,0	17,8	0,97	2,40	4,3	6,13	5,23	0,06	0,06	0,10	0,08	0,09
	15-25	79	187	233	581	24,9	1,5	17,0	1,34	2,45	4,5	4,54	4,11	0,03	0,05	0,05	0,03	0,06
	25-40	86	198	263	539	13,6	0,9	15,9	1,15		4,5	3,36	3,07	0,01	0,06	0,02	0,01	0,06
	40-55	87	204	254	542				1,33		4,4	3,61	3,33	0,01	0,06	0,02	0,01	0,05
	55-70	89	193	250	557				1,48		4,4	3,68	3,44	0,00	0,05	0,02	0,00	0,04
Douglas amendé	0-5	73	187	178	635	53,3	2,7	19,6	0,95		4,4	8,30	5,61	0,25	0,20	0,22	1,28	0,27
	5-10	72	153	155	692	37,2	2,3	20,7	0,99		4,4	6,51	5,55	0,12	0,06	0,10	0,22	0,10
	10-15	70	168	188	644	34,4	1,9	20,9	0,98		4,6	5,04	4,48	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07
	15-25	82	180	196	674	21,5	1,3	19,9	1,17		4,7	3,78	3,40	0,02	0,05	0,04	0,04	0,06
	25-40	81	152	197	651	11,6	0,9	17,4	1,29		4,7	2,77	2,49	0,02	0,05	0,02	0,01	0,06
	40-55	78	160	198	642				1,38		4,6	2,72	2,43	0,01	0,06	0,01	0,01	0,07
	55-70	71	153	170	678				1,56		4,6	2,71	2,47	0,01	0,04	0,01	0,00	0,05
chêne	0-5	78	191	211	598	64,5	3,6	17,8	0,89	2,26	3,9	8,47	6,03	0,22	0,17	0,28	0,44	0,18
	5-10	78	169	201	631	39,5	2,6	19,3	0,94	2,39	4,3	6,90	5,85	0,10	0,04	0,10	0,08	0,09
	10-15	78	173	204	623	38,8	2,0	21,5	1,02	2,41	4,4	5,47	4,81	0,05	0,03	0,06	0,05	0,07
	15-25	85	156	211	633	24,3	1,2	19,4	1,35	2,44	4,7	3,71	3,34	0,02	0,03	0,03	0,01	0,07
	25-40	87	171	252	578	13,5	0,8	17,4	1,12		4,7	2,77	2,44	0,02	0,03	0,02	0,01	0,10
	40-55	88	165	242	593				1,27		4,6	2,73	2,50	0,02	0,04	0,01	0,00	0,07
	55-70	84	162	230	609				1,41		4,6	3,12	2,86	0,02	0,04	0,01	0,00	0,06
hêtre	0-5	73	206	218	576	73,3	4,1	17,9	0,58	2,24	4,0	9,09	6,49	0,29	0,34	0,23	0,61	0,20
	5-10	68	184	215	602	47,6	1,8	18,3	0,85	2,34	4,2	6,94	5,83	0,16	0,08	0,11	0,11	0,10
	10-15	63	184	236	580	34,7	1,6	17,7	1,11	2,34	4,5	5,68	5,02	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08
	15-25	79	160	241	600	21,4	1,1	17,0	1,25	2,42	4,7	3,86	3,52	0,01	0,06	0,03	0,02	0,06
	25-40	76	175	247	578	12,2	0,7	15,8	1,30		4,7	3,16	2,66	0,00	0,06	0,04	0,04	0,12
	40-55	77	185	258	557				1,48		4,6	3,36	2,74	0,37	0,07	0,01	0,01	0,14
	55-70	71	175	253	573				1,08		4,7	3,47	3,03	0,02	0,07	0,03	0,03	0,09
taillis sous futaie (TsF)	0-5	71	189	204	608	64,1	3,5	18,1	0,84	2,28	3,9	8,65	6,47	0,47	0,07	0,24	0,11	0,15
	5-10	70	161	199	641	36,1	1,9	19,2	1,05	2,41	4,3	6,06	5,28	0,14	0,06	0,10	0,02	0,08
	10-15	70	142	209	649	29,8	1,6	19,2	1,22	2,42	4,6	4,49	4,08	0,05	0,04	0,06	0,02	0,07
	15-25	82	155	227	619	21,4	1,1	19,6	1,16	2,42	4,6	3,55	3,20	0,02	0,06	0,04	0,01	0,07
	25-40	78	164	235	602	14,0	0,8	17,9	1,21	2,40	4,5	2,81	2,54	0,02	0,06	0,02	0,00	0,06
	40-55	77	162	230	608				1,26	2,49	4,5	3,13	2,48	0,02	0,08	0,06	0,08	0,16
	55-70	81	167	229	604				0,70	2,50	4,5	2,99	2,72	0,01	0,08	0,02	0,00	0,07

Figure 1 - Profil de l'Alocrisol de la forêt de Breuil-Chenu (Référentiel pédologique, 1995)**Figure 1** - *Dystric Cambisol of Breuil-Chenu forest description (FAO soil classification)*

Les textures pédologiques sont nommées d'après le triangle des textures GEPPA

Méthode d'étude

La densité du sol

La densité apparente du sol a été mesurée par la méthode des cylindres pour les horizons superficiels du sol, de 0 à 15 cm (AFNOR, 1996), puis par la méthode du carottier de 15 à 70 cm. Les observations ont été réalisées sur 16 profils par peuplement.

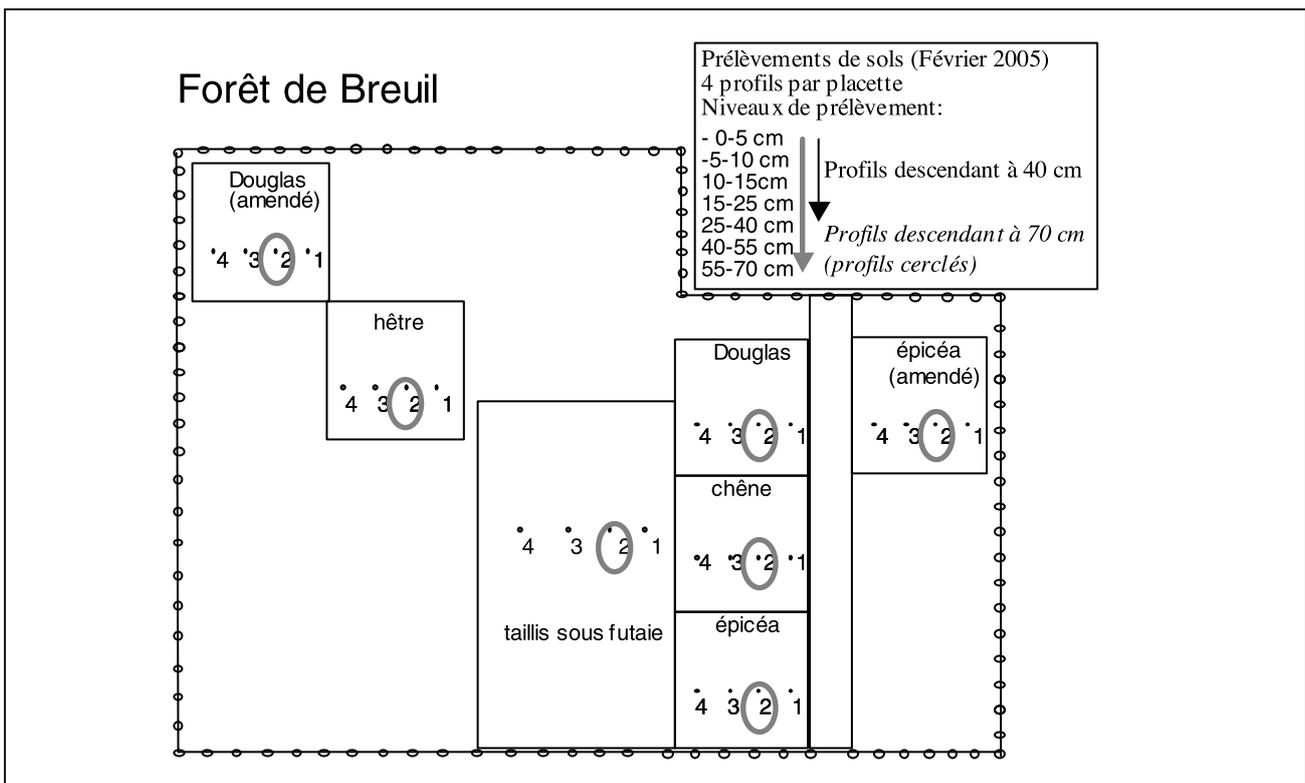
La densité réelle a été mesurée par la méthode du pycnomètre sur le profil n° 2 de chaque parcelle, jusqu'à 70 cm pour la référence taillis-sous-futaie, et jusqu'à 25 cm pour les parcelles de Douglas, épicéa, hêtre et chêne. Trois répétitions ont été réalisées pour chaque niveau. Un étalonnage des mesures a été réalisé sur un substrat de quartz pur et a fourni des valeurs de D_r moy. = 2,64 avec un écart-type de 0,04 pour 10 mesures.

La stabilité structurale

Pour la mesure des stabilités structurales, le protocole de Le Bissonnais et Gaillard (2004), qui est la réactualisation du protocole de Le Bissonnais (1996), a été utilisé.

Trois tests sont appliqués au sol et sont élaborés pour caractériser le comportement et la résistance de la structure des horizons de surface, soumis aux actions des intempéries (pluie, gel...) et aux activités biologiques et humaines. La stabilité structurale des horizons plus profonds (jusqu'à 70 cm), a été également caractérisée, car, même si ces tests ne miment plus les mêmes phénomènes qu'en surface, ils peuvent donner une indication comparative sur une éventuelle évolution de la stabilité structurale sur l'ensemble du profil de sol.

Figure 2 - Description du site atelier de la forêt de Breuil-Chenue (Morvan), et répartition des points de prélèvement sur les placettes
Figure 2 - Description of the experimental site of Breuil-Chenue (Morvan) and description of the sampling methodology



Test HL : Humectation lente : teste le comportement de matériaux secs ou peu humides, soumis à des pluies modérées = résistance au gonflement.

Test MECA : Pré-humectation à l'éthanol et agitation dans l'eau : test de la cohésion de matériaux humides indépendamment de l'éclatement = résistance à la destruction mécanique.

Test HR : Comportement de matériaux secs soumis à une ré-humectation rapide, du type irrigation par submersion, ou pluie intense = résistance à l'éclatement.

Les trois tests sont appliqués indépendamment au sol, 4 répétitions par parcelle jusqu'à 25 cm, puis une seule mesure jusqu'à 70 cm pour chacun des tests. Les mesures uniques sur les niveaux profonds (40 à 70 cm), ne permettent pas de faire de test statistique. La répétabilité de la méthode a été éprouvée. Les agrégats ou équivalents d'agrégats issus des trois tests sont séchés puis passés sur une série de tamis (2000, 1000, 500, 100 et 50 μm). Le pourcentage de chaque fraction est calculé par rapport au poids initial de l'échantillon, puis le MWD (diamètre moyen pondéral « Mean Weight Diameter ») est calculé suivant la formule :

$$\text{MWD} = \sum (\text{maille moyenne entre deux tamis}^* (\% \text{ pondéral des particules retenues sur le tamis})/100).$$

Des MWD moyens pour chaque test sont calculés ainsi qu'un MWD moyennant les trois tests. Les sols étudiés étant très sableux, il est utile de distinguer les agrégats réels des éléments grossiers de même taille : le poids des éléments grossiers dont le diamètre est supérieur à la maille du tamis considéré a été soustrait au poids de chaque fraction granulométrique.

La rétention en eau

Pour l'obtention des rétentions en eau, nous avons utilisé le protocole de Quéting et Gaillard (1998). La rétention en eau d'un sol étant la variation de la teneur en eau en fonction du potentiel matriciel de l'eau ψ (en hPa), des pressions croissantes sont appliquées sur les échantillons initialement prélevés à la capacité au champ, vidant les pores de plus en plus fins. Le dispositif utilisé est un extracteur à plaques poreuses (Soil Moisture Equipment Corp, Santa Barbara USA: 15 bars Ceramic plate extractor CAT 1500). A une pression (P) donnée, l'eau n'est plus présente que dans des pores de rayon équivalent inférieur ou égal à (r) (loi de Jurin) : $r = 1500/P$ (r étant exprimé en μm et P en hPa.).

Les pressions appliquées 330, 1000, 3300, 10000 et 15000 hPa, sont exprimées dans ce rapport sous forme d'unités pF ($pF = \log(P \text{ (hPa)})$). La gamme de pF prospectée est pF 2,5 à pF 4,2, et l'eau

Tableau 2 - Représentation des valeurs de stabilité structurale (en MWD : diamètres moyens pondéraux) pour tous les niveaux de profondeur des sols (0 à 70 cm) et sous chaque essence**Table 2** - Structural stability represented by Mean Weight Diameter (MWD values from 0 to 70 cm depth and for each stand)

Test HL

Niveaux (en cm)	épicéa		épicéa amendé		Douglas		Douglas amendé		chêne		hêtre		TsF	
	MWD	Ec-type	MWD	Ec-type	MWD	Ec-type	MWD	Ec-type	MWD	Ec-type	MWD	Ec-type	MWD	Ec-type
0-5	2,03 (b)4	0,10	1,97 (b)1	0,08	2,08 (b)3	0,03	2,10 (b)2	0,01	1,77 (a)1	0,10	1,98 (b)2	0,03	1,92 (b)3	0,05
5-10	1,94 (a)3	0,10	2,30 (b)2	0,03	2,02 (a)2	0,12	2,26 (b)3	0,01	1,91 (a)2	0,16	2,09 (a)3	0,03	1,96 (a)3	0,16
10-15	1,82 (a)2	0,12	2,06 (a)1	0,14	1,81 (a)1	0,09	2,06 (a)2	0,18	1,79 (a)1	0,13	2,02 (a)2	0,12	1,79 (a)2	0,13
15-25	1,72 (a)1	0,12	1,95 (a)1	0,12	1,82 (a)1	0,09	1,85 (a)1	0,05	1,83 (a)1	0,06	1,84 (a)1	0,02	1,63 (a)1	0,19
25-40	1,60		1,83		1,65		1,76		1,80		1,71		1,49	
40-55	1,22		1,82		1,38		1,48		1,68		1,69		1,53	
55-70	0,97		1,73		1,43		0,95		1,83		1,39		1,36	

Test MECA

0-5	1,84 (a)1	0,17	1,93 (a)1	0,10	2,01 (a)2	0,13	2,05 (a)1	0,17	1,75 (a)1	0,14	1,86 (a)1	0,11	1,93 (a)2	0,16
5-10	1,81 (a)1	0,13	2,21 (b)2	0,10	2,02 (a)2	0,09	2,00 (a)1	0,10	1,81 (a)1	0,14	2,06 (a)2	0,14	1,96 (a)2	0,13
10-15	1,77 (b)1	0,13	1,98 (b)1	0,10	1,77 (b)1	0,12	1,96 (b)1	0,11	1,83 (b)1	0,05	1,99 (b)2	0,14	1,55 (a)1	0,07
15-25	1,75 (a)1	0,13	1,96 (a)1	0,11	1,72 (a)1	0,15	2,01 (a)1	0,17	1,74 (a)1	0,14	1,86 (a)1	0,10	1,64 (a)1	0,18
25-40	1,73		1,94		1,68		2,01		1,75		1,78		1,56	
40-55	1,52		1,84		1,80		1,79		1,69		1,75		1,65	
55-70	1,31		1,81		1,73		1,40		1,72		1,56		1,56	

Test HR

0-5	1,72 (b)3	0,08	1,98 (c)3	0,08	1,96 (c)4	0,08	2,13 (c)3	0,13	1,55 (a)2	0,03	1,70 (b)3	0,12	1,84 (b)3	0,05
5-10	1,75 (b)3	0,12	1,97 (c)3	0,09	1,80 (b)3	0,07	2,11 (c)3	0,07	1,55 (a)2	0,03	1,76 (b)3	0,10	1,67 (b)2	0,08
10-15	1,42 (a)2	0,18	1,72 (a)2	0,18	1,53 (a)2	0,08	1,71 (a)2	0,27	1,45 (a)1	0,13	1,59 (a)2	0,10	1,34 (a)1	0,18
15-25	1,20 (a)1	0,17	1,50 (a)1	0,17	1,23 (a)1	0,14	1,39 (a)1	0,11	1,38 (a)1	0,09	1,41 (a)1	0,12	1,20 (a)1	0,18
25-40	0,87		1,23		0,96		1,19		1,10		1,29		0,90	
40-55	0,77		1,01		0,81		0,98		1,04		1,01		0,90	
55-70	0,73		0,98		0,75		0,74		0,97		0,80		0,89	

Stabilités structurales (en MWD) moyennant les 3 tests

0-5	1,86 (b)2	0,10	1,96 (b)1	0,05	2,02 (c)2	0,07	2,10 (c)2	0,02	1,69 (a)1	0,07	1,85 (b)1	0,07	1,9 (b)2	0,04
5-10	1,83 (a)2	0,12	2,16 (b)2	0,07	1,97 (a)2	0,09	2,12 (b)2	0,08	1,76 (a)1	0,14	1,95 (a)2	0,02	1,86 (a)2	0,14
10-15	1,67 (a)1	0,14	1,92 (a)1	0,14	1,70 (a)1	0,10	1,91 (a)1	0,19	1,69 (a)1	0,12	1,87 (a)1	0,09	1,56 (a)1	0,13
15-25	1,53 (a)1	0,15	1,80 (a)1	0,13	1,55 (a)1	0,14	1,75 (a)1	0,07	1,65 (a)1	0,09	1,70 (a)1	0,08	1,43 (a)1	0,26
25-40	1,40		1,66		1,43		1,65		1,55		1,59		1,32	
40-55	1,17		1,55		1,33		1,42		1,47		1,48		1,36	
55-70	1,00		1,50		1,30		1,03		1,51		1,25		1,27	

Test de la variabilité intra-parcellaire : pour les 4 premiers niveaux (0 à 25 cm) sont représentés les moyennes et les écart-types des 4 répétitions. Pour les niveaux inférieurs (25 à 70 cm), une seule répétition a été traitée. Les groupements statistiques issus du test Anova sont symbolisés par les chiffres 1... 4 (un chiffre différent signifie une valeur statistiquement différente au seuil de 5 %).

Test de la variabilité inter-parcellaire : Test de la variable « nature du couvert ». Les groupements statistiques ont été établis à partir d'un test Anova. Pour chaque niveau une lettre différente signifie une valeur statistiquement différente au seuil de 5 %.

contenue entre ces deux pressions limites, constitue la réserve utile. Les classes de pores équivalents ainsi « vidangées » sont les suivantes : 4,5 à 1,5 μm (pF 2,5 à pF 3), 1,5 à 0,45 μm (pF 3 à pF 3,5), 0,45 à 0,15 μm (pF 3,5 à pF 4), 0,15 à 0,1 μm (pF 4 à pF 4,2).

La teneur en eau à chaque valeur de potentiel matriciel (pF) est donnée par la relation

$W = (mh - ms) / ms$ (W = teneur en eau massique à la valeur de pression ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); mh = masse de la motte humide (g); ms = masse de la motte sèche à 105 °C (g)).

Les mesures répétitives ont été réalisées sur les échantillons prélevés jusqu'à 40 cm puis une seule mesure pour les horizons plus profonds entre 40 et 70 cm.

Analyses statistiques

L'analyse de la variance ANOVA a été utilisée pour tester l'effet des essences sur la stabilité structurale en fonction des horizons, et pour tester la variation intra-parcellaire. Le seuil d'acceptation du risque de 5 % a été retenu.

RÉSULTATS

Stabilité structurale du sol

Analyse des 3 tests

Le *tableau 2* présente les valeurs de stabilité structurale pour chacun des 3 tests ainsi que la stabilité structurale moyenne.

- **Test HL** : entre 0 et 5 cm de profondeur, le Douglas, l'épicéa, le hêtre et le TsF présentent respectivement des MWD plus élevés (2,08 à 1,92) par rapport au chêne (1,77). Au-delà de 5 cm, il n'existe plus de différence significative entre les essences, et les MWD décroissent jusqu'à 25 cm.

- **Test MECA** : entre 0 et 10 cm, les valeurs de MWD ne sont pas statistiquement différentes entre les essences et varient de 2,02 à 1,75. Cependant, entre 10 et 15 cm, le TsF présente des MWD significativement plus faibles (1,55 contre des valeurs variant de 1,99 à 1,77 pour les plantations). Entre 15 et 25 cm, les MWD ne sont pas significativement différents entre les essences.

- **Test HR** : entre 0 et 5 cm, le Douglas présente le MWD le plus élevé (1,96), l'épicéa, le hêtre et le TsF présentent des valeurs intermédiaires (entre 1,84 et 1,70) et le chêne présente le MWD le plus faible (1,55). Entre 5 et 10 cm, des différences significatives persistent entre le chêne et les autres essences et, au-delà de 10 cm, les différences entre essences disparaissent.

- **Indice de stabilité structurale moyenne** (*tableau 2*) : la stabilité des agrégats décroît avec la profondeur (*figure 3*). Les couverts forestiers diffèrent pour les stabilités structurales des niveaux superficiels du sol. Le Douglas présente les MWD les plus élevés (2,02), l'épicéa, le hêtre et le TsF présentent des valeurs intermédiaires entre 1,90 et 1,85, et le chêne présente les MWD les plus faibles (1,69). Au-delà de 5 cm, il n'existe plus de différence significative entre les essences et les variabilités intra et inter-parcelles empêchent de discriminer les couverts. Seul le TsF présente des stabilités structurales significativement plus faibles entre 10 et 40 cm.

Porosités et réserves utiles (RU) des sols

Le *tableau 3* présente les résultats obtenus pour la quantification et la répartition des réserves utiles sous les différents peuplements.

Analyse quantitative de la réserve utile (*figure 4*) :

Entre 0 et 5 cm, le Douglas a les RU les plus faibles (0,09 g g⁻¹), le hêtre, l'épicéa et le TsF ont des RU intermédiaires (0,11 à 0,13 g g⁻¹), tandis que le chêne présente les RU les plus fortes (0,18 g g⁻¹). Entre 5 et 10 cm, les différences entre essences s'estompent. Seules les RU sous Douglas (0,09 g g⁻¹) sont significativement inférieures à celles des autres essences dont les valeurs varient de 0,11 à 0,14 g g⁻¹. Dans les niveaux intermédiaires 10 à 40 cm, les

courbes convergent et il n'apparaît plus de différence significative entre les différents couverts, les RU varient de 0,11 à 0,14 g g⁻¹ (*figure 4*).

Analyse qualitative de la RU, répartition dans la porosité du sol :

Les contributions des classes porales au stockage d'eau du sol, sont présentées en pourcentages pondéraux à la *figure 5*.

- Entre 0 et 10 cm :

Sous chêne, les pores les plus grossiers [4,5 à 1,5 µm] sont les plus abondants, participant à hauteur de 60 % à la RU du niveau 0-5 cm et 45 % pour le niveau 5-10 cm. En parallèle, les pores les plus fins [0,15 à 0,1 µm] sont peu abondants et les classes intermédiaires de pores [1,5 à 0,45 µm] et [0,45 à 0,15 µm] représentent ensemble moins de 40 % de la RU de ces niveaux.

Sous hêtre et TsF, les contributions des classes porales intermédiaires [1,5 à 0,45 µm] et [0,45 à 0,15 µm] représentent ensemble 70 à 80 % de la RU. En revanche, les contributions des classes extrêmes, fine [0,1 à 0,15 µm] et grossière [4,5 à 1,5 µm], ne représentent respectivement que 2 à 5 % et 2 à 23 % des RU. L'épicéa présente quant à lui quelques singularités par rapport au hêtre et au TsF, avec une proportion de pores grossiers [4,5 à 1,5 µm] plus forte. La proportion de pores grossiers atteint 40 % de la RU en surface et 25 % pour l'ensemble des pores intermédiaires.

Sous Douglas, la microporosité grossière [4,5-1,5 µm] est faible et stocke 10 % de la RU, et, la porosité fine [0,15 et 0,1 µm] ne participe pratiquement pas au stockage de la RU (1 à 4 %). Ce sont les classes porales intermédiaires qui stockent la plus grande partie de la RU, stockant chacune 40 % de la RU de ces niveaux.

-Entre 10 et 40 cm :

Il n'y a pas de différence significative entre les différentes essences concernant la répartition porale des RU pour ces niveaux et la répartition de la RU est à peu près équilibrée entre les 4 classes de pores.

Effet de l'amendement

Stabilité structurale :

Les MWD des sols des parcelles amendées (épicéa et Douglas) sont significativement supérieures à celles relevées sous les témoins entre 5 et 10 cm (*figure 3*). Néanmoins, les différences entre parcelles amendées et témoins pour 0-5 cm, ne sont pas significatives (*tableau 2*).

Effet quantitatif sur la RU :

Sous Douglas, les RU du niveau [0-5 cm] du témoin et de la parcelle amendée, ne sont pas significativement différentes (0,09 g g⁻¹). Cependant, il y a une augmentation significative de la RU dans le niveau 5-10 cm de la parcelle amendée (0,12 g g⁻¹) par

Figure 3 - Stabilités structurales en diamètres moyens pondéraux (MWD) entre 0 et 70 cm pour chacun des 3 tests, en fonction des peuplements (n = 4) et du traitement d'amendement sous Douglas et épicéa quand il existe.

Figure 3 - Structural stability values (Mean weight Diameter: MWD) for layers from 0 to 70 cm depth, under each stand (n = 4), with or without fertilisation for Douglas and spruce, for the three tests.

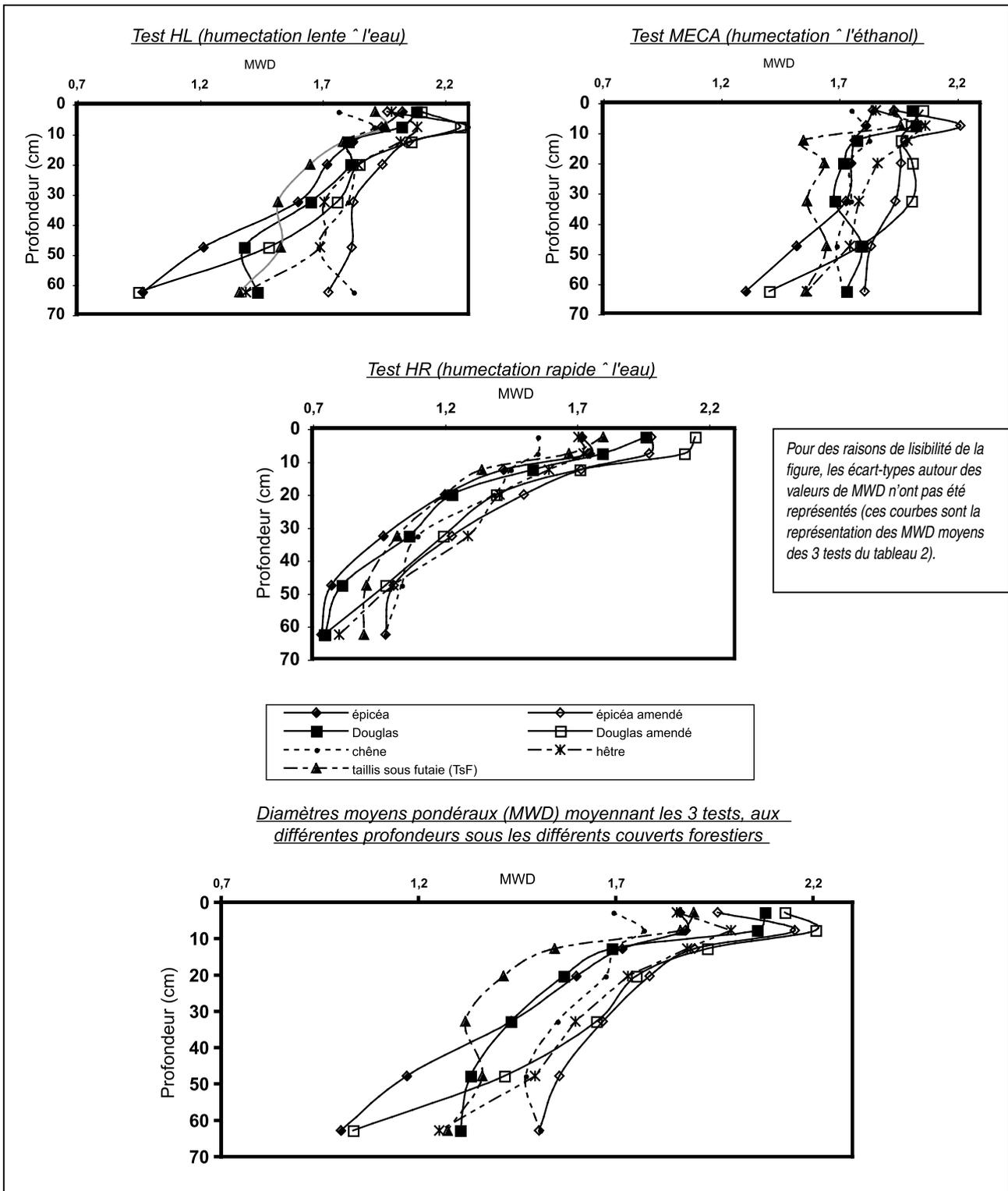


Tableau 3 - Valeurs de réserve utile « RU » (en g d'eau par g de sol) pour tous les niveaux de profondeur des sols (0 à 70 cm) et sous chaque essence

Table 3 - Available water retention values « RU » (expressed as gram of water per gram of soil) for the set of soil layers from 0 to 70 cm depth for each stand

Essences	Niveaux	Réserve utile quantitative				Réserve utile qualitative			
		eau résiduelle moyenne à pF 2,5	eau résiduelle moyenne à pF 4,2	RU (g/g sol)	Ec-Type RU	pF 4,2 à pF 4 0,1 à 0,15µm	pF 4 à pF 3,5 0,15 à 0,45µm	pF 3,5 à pF 3 0,45 à 1,5µm	pF 3 à pF 2,5 1,5 à 4,5µm
épicéa	0-5	0,27	0,14	0,13 (c)1	0,02	0,01 (b)1	0,04 (b)1	0,04 (b)2	0,05 (b)3
	5-10	0,24	0,11	0,13 (b)1	0,01	0,01 (b)2	0,04 (b)2	0,03 (a)2	0,04 (c)2
	10-15	0,24	0,10	0,13 (a)1	0,01	0,02 (a)3	0,06 (a)3	0,02 (b)1	0,03 (b)1
	15-25	0,24	0,10	0,14 (a)1	0,01	0,02 (a)3	0,05 (a)3	0,03 (a)1	0,03 (a)1
	25-40	0,23	0,09	0,13 (a)1	0,01	0,02 (a)3	0,05 (a)3	0,03 (a)2	0,03 (a)1
	40-55	0,17	0,08	0,09		0,01	0,04	0,02	0,02
	55-70	0,15	0,08	0,07		0,00	0,03	0,03	0,01
épicéa amendé	0-5	0,31	0,17	0,16 (d)2	0,02	0,02 (b)1	0,01 (a)1	0,08 (c)3	0,04 (b)3
	5-10	0,26	0,14	0,13 (b)1	0,02	0,01 (b)1	0,03 (a)2	0,06 (b)2	0,03 (c)2
	10-15	0,24	0,14	0,12 (a)1	0,01	0,03 (a)1	0,04 (a)2	0,04 (b)1	0,03 (b)1
	15-25	0,23	0,13	0,13 (a)1	0,01	0,02 (a)1	0,04 (a)3	0,04 (a)1	0,03 (a)1
	25-40	0,25	0,12	0,13 (a)1	0,01	0,03 (a)1	0,04 (a)3	0,04 (a)1	0,03 (a)2
	40-55	0,21	0,12	0,13		0,03	0,01	0,03	0,05
	55-70	0,19	0,10	0,11		0,02	0,02	0,06	0,01
Douglas	0-5	0,25	0,16	0,09 (a)1	0,02	0,00 (b)1	0,04 (b)1	0,03 (b)2	0,01 (a)1
	5-10	0,24	0,15	0,09 (a)1	0,02	0,00 (a)1	0,05 (c)1	0,03 (b)2	0,01 (b)1
	10-15	0,26	0,13	0,13 (a)1	0,02	0,02 (a)2	0,05 (a)1	0,02 (b)1	0,03 (b)2
	15-25	0,26	0,12	0,14 (a)1	0,02	0,02 (a)2	0,06 (a)1	0,03 (a)1	0,03 (a)2
	25-40	0,23	0,12	0,11 (a)1	0,02	0,02 (a)2	0,06 (a)1	0,02 (a)1	0,02 (a)2
	40-55	0,23	0,12	0,11		0,01	0,05	0,03	0,01
	55-70	0,23	0,12	0,11		0,02	0,04	0,01	0,04
Douglas amendé	0-5	0,23	0,14	0,09 (a)1	0,02	0,01 (b)1	0,03 (b)1	0,05 (c)2	0,01 (a)1
	5-10	0,25	0,13	0,12 (b)2	0,02	0,01 (a)1	0,05 (b)2	0,04 (b)1	0,03 (c)2
	10-15	0,24	0,12	0,12 (a)2	0,02	0,01 (a)2	0,04 (a)2	0,03 (b)1	0,03 (b)2
	15-25	0,25	0,12	0,13 (a)2	0,02	0,01 (a)2	0,05 (a)2	0,04 (a)1	0,02 (a)2
	25-40	0,22	0,11	0,11 (a)2	0,01	0,02 (a)2	0,05 (a)2	0,03 (a)1	0,02 (a)2
	40-55	0,20	0,11	0,09		0,01	0,05	0,02	0,01
	55-70	0,18	0,09	0,09		0,02	0,04	0,01	0,01
chêne	0-5	0,33	0,15	0,18 (d)2	0,02	0,01 (b)1	0,05 (b)1	0,02 (a)1	0,10 (c)4
	5-10	0,27	0,13	0,14 (b)1	0,02	0,00 (a)1	0,05 (b)1	0,03 (a)2	0,05 (d)3
	10-15	0,26	0,13	0,13 (a)1	0,02	0,01 (a)2	0,05 (a)1	0,03 (b)3	0,03 (b)2
	15-25	0,25	0,12	0,13 (a)1	0,01	0,01 (a)2	0,05 (a)1	0,03 (a)3	0,03 (a)2
	25-40	0,24	0,11	0,13 (a)1	0,02	0,02 (a)3	0,04 (a)1	0,03 (a)3	0,02 (a)1
	40-55	0,22	0,11	0,12		0,02	0,04	0,02	0,04
	55-70	0,21	0,11	0,10		0,01	0,04	0,03	0,03
hêtre	0-5	0,28	0,16	0,11 (b)1	0,02	0,01 (b)1	0,07 (c)2	0,03 (b)2	0,01 (a)1
	5-10	0,25	0,13	0,12 (b)1	0,02	0,01 (a)1	0,07 (d)2	0,03 (b)2	0,00 (a)1
	10-15	0,22	0,12	0,12 (a)1	0,02	0,01 (a)1	0,05 (a)1	0,03 (b)2	0,02 (b)2
	15-25	0,22	0,12	0,11 (a)1	0,02	0,02 (a)2	0,04 (a)1	0,04 (a)2	0,02 (a)2
	25-40	0,21	0,11	0,11 (a)1	0,01	0,02 (a)2	0,05 (a)1	0,03 (a)1	0,02 (a)2
	40-55	0,19	0,10	0,09		0,02	0,04	0,02	0,01
	55-70	0,17	0,10	0,07		0,02	0,03	0,02	0,00
taillis sous futaie (TsF)	0-5	0,27	0,16	0,11 (b)1	0,02	0,00 (a)1	0,04 (b)1	0,04 (b)2	0,03 (a)2
	5-10	0,23	0,12	0,11 (b)1	0,01	0,01 (b)2	0,04 (b)1	0,05 (b)2	0,00 (b)1
	10-15	0,23	0,11	0,12 (a)1	0,02	0,01 (a)2	0,05 (a)2	0,03 (a)1	0,02 (a)1
	15-25	0,25	0,11	0,14 (a)1	0,02	0,02 (a)2	0,04 (a)1	0,04 (a)2	0,02 (a)1
	25-40	0,23	0,10	0,13 (a)1	0,02	0,02 (a)3	0,05 (a)2	0,03 (a)1	0,02 (a)1
	40-55	0,22	0,10	0,12		0,02	0,03	0,05	0,02
	55-70	0,21	0,10	0,11		0,03	0,04	0,03	0,02

La contribution de 4 classes porales pour le stockage des réserves utiles, est étudiée pour tous les niveaux de profondeur de chaque placette.

Statistiques appliqués à la RU :

Test de la variabilité intra-parcellaire sur la RU : pour les 5 premiers niveaux (0 à 40 cm) sont représentés les écart-types à la moyenne des 4 répétitions. Pour les niveaux inférieurs (40 à 70 cm), une seule répétition a été traitée. Les regroupements statistiques issus du test Anova sont symbolisés par les chiffres 1... 4 (un chiffre différent signifie

une valeur statistiquement différente au seuil de 5 %).

Test de la variabilité inter-parcellaire sur la RU : test de la variable « nature du couvert ». Les groupements ont été établis à partir d'un test Anova. Pour un niveau donné de chaque parcelle une lettre différente signifie une valeur statistiquement différente au seuil de 5 %.

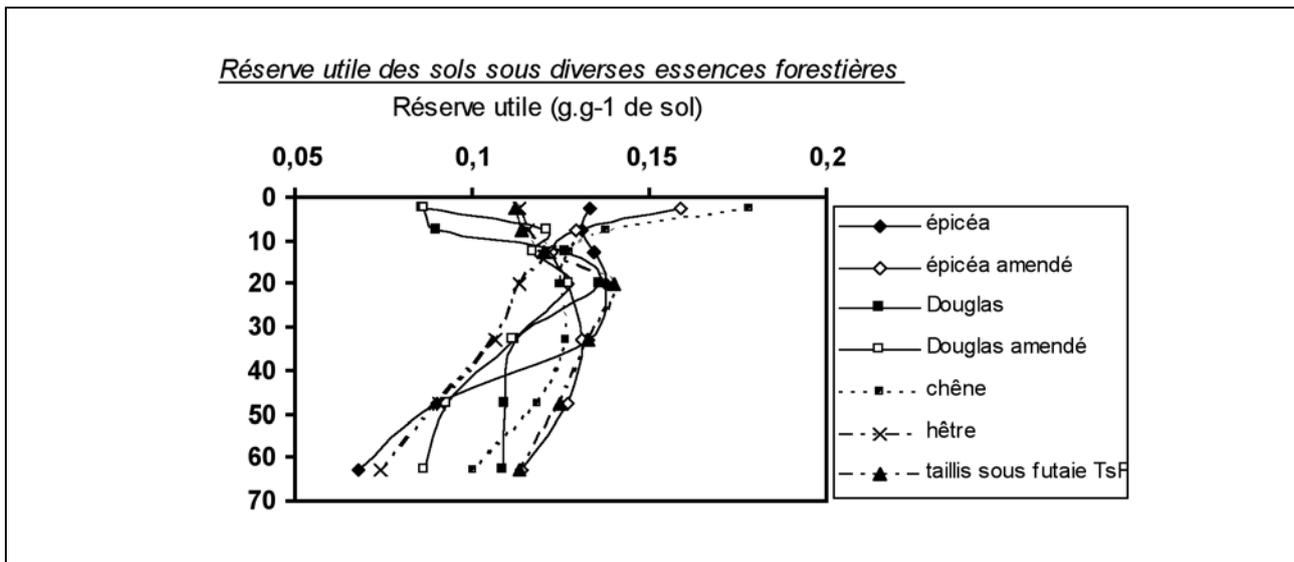
Statistiques appliqués à la répartition porale de la RU :

Test de la variabilité intra-parcellaire de la répartition porale : pour chacune des 4 classes porales, les groupements statistiques (Anova) des niveaux sont symbolisés par

les chiffres 1... 4 (un chiffre différent signifie une valeur statistiquement différente au seuil de 5 %).

Test de la variabilité inter-parcellaire : Test de la variable « nature du couvert ». Pour chaque niveau, des groupements des couverts ont été établis à partir d'un test Anova, et ceci pour chacune des 4 classes porales. Une lettre différente signifie une valeur statistiquement différente au seuil de 5 %.

Figure 4 - Représentation des réserves utiles (RU: en gramme d'eau par gramme de sol), en fonction de la profondeur
Figure 4 - Representation of available water retention values (RU: gram of water / gram of soil) as a function of soil depth



Remarque: les écart-types autour des moyennes des RU ne sont pas figurés pour des raisons de lisibilité de la figure, cependant, ils figurent dans le tableau 3.

Tableau 4 - Matrice de corrélation linéaire globale entre les caractéristiques du sol pour les couches situées entre 0 et 25 cm de profondeur, toutes situations confondues, et les valeurs de stabilité structurale et de réserve utile

Table 4 - Statistical relationships between soil characteristics and available water holding capacity or structural stability, for all layers between 0 and 25 cm depth and for all sites

	Analyse granulométrique (%)			Matière organique			Densités		pH	Caractérisation du complexe d'échange					stabilité structurale	
	teneur de cailloux	teneur en argiles	teneur en sables	teneur en C	teneur en N	C/N	Da	Dr	(eau)	S/T	teneur en Al	teneur en Fe	teneur en Mn	teneur en Mg		teneur en Ca
Réserve utile	$r = -0,3$	$-0,2$	$0,2$	$-0,1$	$-0,1$	$0,1$	$0,1$	$0,4$	$0,2$	$-0,1$	$-0,1$	$-0,2$	$-0,1$	$-0,1$	$-0,2$	-0,5
	$P = 0,1$	$0,3$	$0,3$	$0,6$	$0,6$	$0,7$	$0,5$	$0,1$	$0,3$	$0,7$	$0,6$	$0,3$	$0,7$	$0,8$	$0,6$	<0,01
Stabilité structurale	$r = 0,4$	0,5	$-0,2$	0,6	0,6	$-0,1$	$-0,7$	$-0,4$	$-0,5$	0,5	0,7	0,5	0,5	0,6	0,5	
	P < 0,05	<0,05	$0,3$	<0,05	<0,01	$0,6$	<0,01	$0,1$	<0,05	<0,05	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	

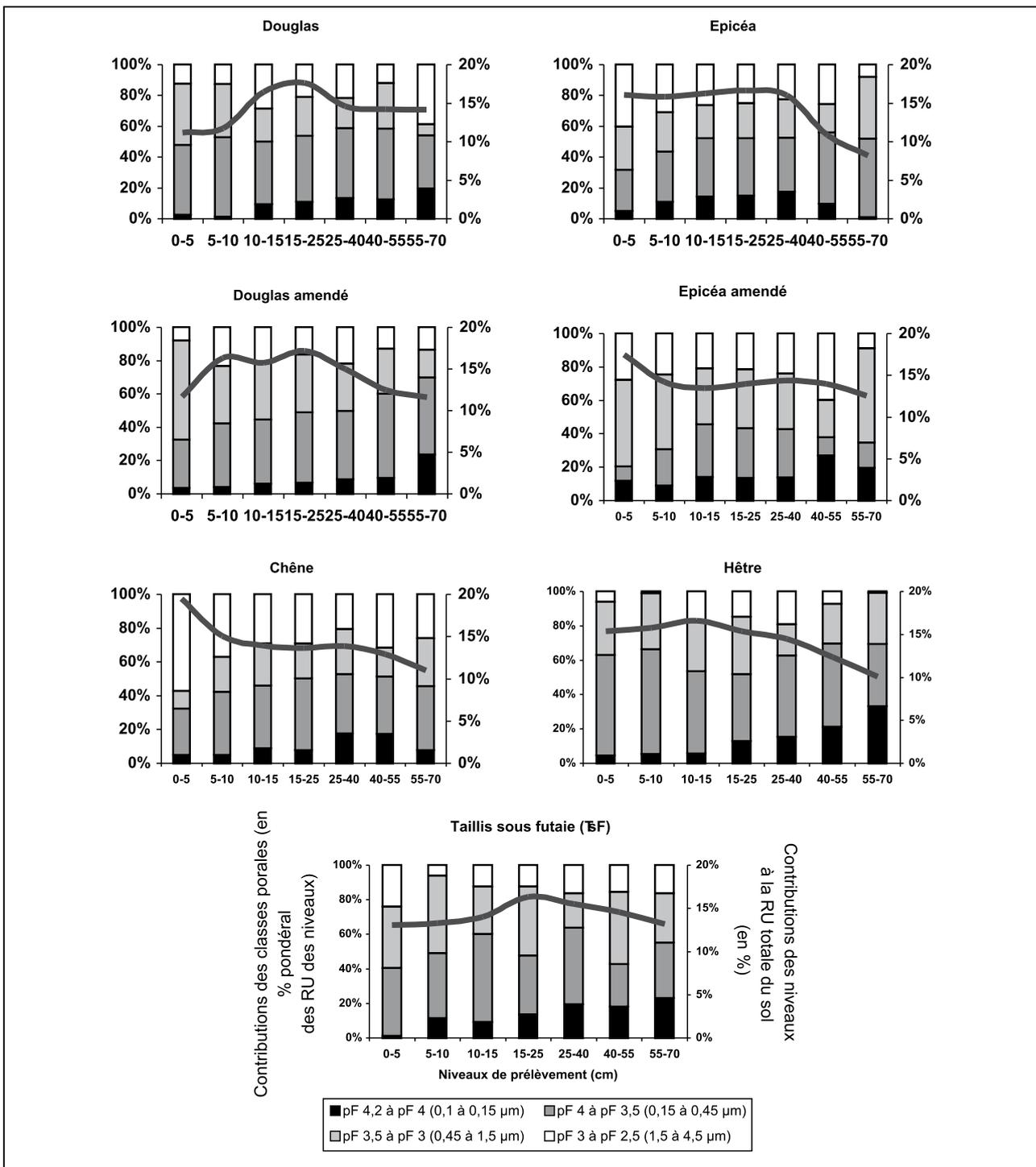
rapport à la parcelle témoin (0,09 g.g⁻¹). Entre 10 et 40 cm, les deux traitements ne présentent plus de différence de RU, celles-ci variant de 0,11 à 0,14 g.g⁻¹ pour le témoin et de 0,11 à 0,13 g.g⁻¹ pour la parcelle amendée.

Sous épicéa, une augmentation significative des RU est observée dans le niveau 0-5 cm sous la parcelle amendée (0,16 g.g⁻¹) par rapport au témoin (0,13 g.g⁻¹). Les niveaux inférieurs 5-10 cm, ne révèlent pas de différence significative, avec une RU moyenne de 0,13 g.g⁻¹, et il n'y a pas non plus de différence entre 10 et 40 cm, les RU variant de 0,12 à 0,14 g.g⁻¹ en fonction des niveaux.

Effet qualitatif sur la RU :

Pour le Douglas et l'épicéa, entre 0 et 10 cm, les contributions à la RU des classes porales les plus grossières ont tendance à

augmenter alors que les contributions des classes porales plus fines diminuent avec l'amendement. Entre 10 et 40 cm, il n'y a pas de différence significative entre les traitements concernant la répartition porale de la RU, qui reste à peu près équilibrée entre les 4 classes de pores : les classes [4,5-1,5 µm] et [1,5-0,45 µm] stockent chacune 20 à 30 % de la RU, la classe [0,45-0,15 µm] 30 à 40 % et la classe [0,15-0,1 µm] 5 à 20 % de la RU.

Figure 5 - Répartition de la réserve utile du sol dans 4 classes porales (4,5 à 1,5; 1,5 à 0,45; 0,45 à 0,15; 0,15 à 0,1 μm)**Figure 5** - Distribution of available water retention in four pore class size (4,5 à 1,5; 1,5 à 0,45; 0,45 à 0,15; 0,15 à 0,1 μm)

Les histogrammes représentent la distribution relative des classes porales pour chaque niveau ; la courbe continue présente la contribution de chaque niveau du profil de sol, à la RU totale du sol. La contribution de chaque classe de pore est représentée en pourcentage pondéral de la RU du niveau de prélèvement considéré. Ces contributions porales sont un indice qualitatif, et sont rapportées aux contributions réelles de chaque niveau dans le stockage de la RU totale du sol (courbe des contributions de chaque niveau à la réserve utile totale (l'échelle se rapportant à la courbe est placée à la droite des figures)).

Remarque : Les différents niveaux de prélèvement ne représentent pas les mêmes volumes de sol. Nous avons représenté sur cette figure, leurs contributions réelles de chaque niveau à la RU totale du sol, et non pas des contributions relatives rapportées à un même volume pédologique.

DISCUSSION

Stabilité structurale

Les valeurs de stabilité structurale fournies par le test HR sont les plus faibles et sont déterminantes pour la valeur du MWD moyen. C'est le test le plus drastique qui discrimine le mieux l'effet des essences, distinguant les 3 groupes suivants : Douglas / épicéa, hêtre, TsF / chêne. Ce groupement se retrouve pour les MWD moyennant les 3 tests.

Les agrégats deviennent plus fragiles avec la profondeur en relation avec les teneurs en MO et en cations polyvalents qui diminuent (*tableau 1*). Avec la profondeur, le sol semble perdre rapidement sa résistance à l'éclatement (test HR), alors qu'il conserve une bonne résistance au gonflement (test HL) ainsi qu'à la désagrégation mécanique (test MECA). Ceci peut s'expliquer simplement, par le fait que ces capacités à résister aux différentes contraintes font appel à des propriétés physiques ou chimiques différentes (Henin *et al.*, 1958). La MO de ce sol forestier (complexes argilo-humiques et organo-métalliques) assurerait principalement la résistance à l'éclatement, et, la relative constance de la cohésion et de la résistance au gonflement s'expliqueraient simplement par le taux d'argile quasi constant sur tout le profil (Mareschal, 2005).

La stabilité structurale décroît globalement avec profondeur, cependant, le niveau [5-10 cm] marque une légère augmentation des MWD moyens sous toutes les essences. Le sol étant légèrement crypto-podzolique (Ranger *et al.*, 2004), l'accumulation de complexes organo-métalliques contribuerait à augmenter localement la stabilité structurale.

Il semblerait que la forêt soit le système de culture qui permette l'établissement des stabilités structurales les plus fortes, mais les données de la littérature sont limitées. Ainsi, sur des sols de nature similaire « Alocrisol sablo-argileux », mais sous couvert de prairies et sous des parcelles cultivées, les stabilités structurales présentent des valeurs deux fois plus faibles que sous forêt. Les valeurs moyennes suivantes sont relevées (entre 0 et 10 cm) : test HL = 1,06 ; test MECA = 0,77 ; test HR = 0,69 ; MWD moyens = 0,84 (Base de données AGRESTA) alors que dans la présente étude les valeurs des tests sont les suivants : test HL = 2,3 à 1,77 ; test MECA = 2,21 à 1,75 ; test HR = 2,13 à 1,55 ; MWD moyens = 2,16 à 1,69. Les sols forestiers seraient donc moins sensibles à la dégradation physique, qu'elle se fasse par désagrégation mécanique (test MECA), par éclatement (test HR), ou par gonflement (test HL). Ceci peut s'expliquer de différentes manières : les conditions climatiques ainsi que les conditions d'exploitation, sont différentes. Les houpiers permanents protègent physiquement les litières et la surface des sols forestiers, permettant d'avoir une structuration du sol conservative, et permettant également une accumulation de matière organique en retardant sa dégradation, ce qui accroît la stabilité structurale. Les restitutions de cations et en particulier des alcalino-terreux floculants (Ca et Mg),

par la décomposition des litières et par l'enracinement abondant, contribuent à accroître la stabilité structurale. Sous les parcelles expérimentales, les restitutions de litières apportent en moyenne de 15 à 50 kg de Ca et 10 fois moins de Mg. Sous les sols cultivés, la stabilité structurale diminue vers la surface en raison de la teneur en MO relativement faible, de sa dégradation rapide, et de la lixiviation des cations polyvalents dans cette partie du sol fréquemment mise à nu (Haynes et Swift, 1990 ; Amézketa, 1999).

Porosité et Réserve utile (RU)

- Entre 0 et 10 cm :

Le Douglas diminue le plus la RU alors que hêtre, TsF, et épicéa, semblent la maintenir et que le chêne l'augmente, et ceci par rapport aux RU des niveaux 10 à 40 cm. Les résultats concernant les RU « quantitatives » (*figure 4*) et « qualitatives » (*figure 5*) montrent que les changements dans les horizons superficiels [0-10 cm] sont effectivement liés à une influence des essences sur toutes les classes de pores. Ceci indique qu'en surface il y a des changements structuraux mais également texturaux par rapport à la profondeur.

Les proportions des classes grossières [4,5 à 1,5 μm] et [1,5 à 0,45 μm] semblent avoir un rôle prépondérant dans les changements qui affectent la RU. Les essences qui possèdent en surface le plus de micro-porosité grossière (chêne et épicéa), présentent les RU les plus importantes. A l'inverse, les essences possédant les micro-porosités grossières les moins importantes (Douglas) s'accompagnent des RU globales les plus faibles.

- En profondeur (10 à 40 cm) :

Les modifications physiques (effet méso- et pédoclimatique), biochimiques (qualité des matières organiques aérienne et souterraines), et biologiques (structuration des populations), spécifiques aux essences, n'interviennent plus. De plus, la teneur globale en matière organique décroît fortement, expliquant probablement la diminution de la RU.

Discrimination des essences

Relations entre les effets des essences sur la réserve utile (RU) et sur la stabilité structurale :

- Entre 0 et 10 cm

Le chêne présente la stabilité structurale la plus faible mais la RU la plus forte. Epicéa et hêtre, améliorent la structuration du sol en surface, en augmentant de manière générale la stabilité structurale et la porosité globale. Le Douglas et le TsF, ont en revanche un effet contrasté sur la structure, améliorant nettement la stabilité structurale mais diminuant la porosité globale du sol (*figure 3*).

- Entre 10 et 40 cm

L'influence des essences est nettement estompée. Cependant, concernant la stabilité structurale, il est possible qu'en augmentant les répétitions sur ces profondeurs l'on puisse différencier TsF et plantations (*figure 3*). Cette observation peut s'expliquer par le fait que TsF n'a pas subi le même traitement que les plantations. Les sols des plantations ont subi un andainage des rémanents après la coupe à blanc, et le passage des engins a pu compacter les sols, ce qui aurait eu pour effet d'augmenter les stabilités structurales de ces sols sableux. Les procédures d'implantation et l'âge des couverts étant différents entre TsF et plantations, TsF est une référence mais pas un témoin. Si cette hypothèse était vérifiée, ce serait la preuve que la restauration de la qualité du sol est très longue pour les horizons profonds dans ce milieu acide à activité biologique limitée.

Les sols sous TsF présentent également une diminution significative de la proportion des pores grossiers [4,5-1,5] et [1,5-0,45 µm] entre 10 et 15 cm, sans différence significative de RU par rapport aux plantations. La coupe à blanc puis la mise en place de nouvelles plantations pourraient avoir favorisé un renouveau de l'activité biologique à cette profondeur, créant plus de porosité grossière que sous la forêt native. Cette phase de régénération des peuplements correspond entre autres à une forte perturbation de l'humus dégradé de la forêt native, qui aurait donc des effets positifs.

- Entre 40 et 70 cm :

Les courbes de MWD et de RU sont distinctes entre peuplements, et même si les répétitions sont insuffisantes, on peut se demander si ce n'est pas une hétérogénéité, due à la cryoturbation quaternaire observée par Arousseau (1976), et qui commence à apparaître.

Les facteurs influençant la discrimination en termes de RU et de stabilité structurale (*tableaux 4 et 5*) :

L'analyse des indicateurs physiques et chimiques mesurés sur ces sols, entre 0 et 25 cm, montre que bon nombre d'entre eux sont significativement corrélés à la stabilité structurale (*tableau 4*), notamment les teneurs en cations échangeables polyvalents (Fe, Mg, Al), les teneurs en C et N organiques, la densité apparente, le rapport C/N et les teneurs en argiles et cailloux. Ces corrélations ne signifient pas pour autant que tous ces facteurs agissent sur la stabilité structurale, mais probablement pour certains, qu'ils ont une évolution avec la profondeur similaire à celle de la stabilité structurale. En revanche, aucun de ces indicateurs ci-dessus n'est corrélé avec la RU (entre 0 et 25 cm) et seule la stabilité structurale est inversement corrélée avec cette dernière ($r = -0,5$). La porosité a une importance certaine dans l'existence d'un degré de stabilité du sol et à l'inverse, la stabilité structurale a aussi un impact sur l'existence, le maintien, la création ou la suppression de la porosité, ce que souligne Amézketa (1999). Il y a probablement d'autres facteurs que ceux que nous avons étudié qui ont une influence significative sur la RU, comme par exemple les facteurs biologiques.

Si aucune variable n'est corrélée à l'évolution des RU sur l'ensemble des profils de sol, certaines d'entre elles permettent cependant de différencier les essences entre 0 et 5 cm. Ainsi, les teneurs en C et en N organiques, et le rapport C/N permettent de discriminer les différents couverts pour la RU et la stabilité structurale (*tableau 5*).

Un effet prépondérant de la MO sur la physique du sol

Les MO (qualité et quantité) ont une influence notable et connue sur la stabilité structurale et la RU (Amézketa, 1999). D'après le *tableau 5*, les facteurs liés à la matière organique du sol (C/N, teneurs en C et N org.) permettent de retrouver l'ordonnement des essences pour la RU (chêne > épicéa > hêtre = TsF > Douglas) et la stabilité structurale (Douglas > épicéa = hêtre = TsF > chêne), ce qui corrobore les résultats de Nys (1987). La matière organique semble à elle seule induire un fonctionnement du sol différent sous chaque essence. Les teneurs en cations échangeables, le pH, le taux de saturation, et la granulométrie, ne permettent pas d'expliquer les différenciations physiques des sols entre les feuillus et les résineux (*tableau 5*). Par définition, le site expérimental ayant été choisi en raison d'une variabilité du milieu physique réduite au maximum.

Hypothèses pour expliquer les différences de RU et de stabilité structurale entre essences :

- *Hypothèse 1* « influence de la qualité des MO du sol » : il semble que le fonctionnement du sol soit orienté par la qualité des litières ou par des activités biologiques différentes, discriminant feuillus et résineux (Thomas et Prescott, 2000), puisque le milieu est homogène (Ranger *et al.*, 2004). Il ressort ainsi deux qualités de MO des sols significativement différentes : la MO sous résineux et celle sous feuillus (*tableau 1*), avec des teneurs en C et N organiques plus élevées et des C/N plus bas sous feuillus que sous résineux. Ces différences de qualité de MO dans les sols, pourraient expliquer les variations de RU et de stabilité structurale entre feuillus et résineux et la relation inverse RU/Stabilité structurale à l'échelle du site expérimental. Sous feuillus, les matières organiques du sol ont un rapport C/N bas et sont considérées comme 'facilement' biodégradables. Ces matières organiques dites « riches » forment un substrat favorable pour l'établissement d'une activité intense des micro-organismes. La consommation d'une partie des MO entraînerait une fragilisation de l'agrégation du sol mais parallèlement cette activité occasionnerait des porosités plus fortes par fuissement et par création de galeries, et contribuerait à augmenter les classes de pores grossiers [4,5 à 1,5 µm] sous le chêne, le hêtre, et le TsF (*figure 5*). Inversement, les matières organiques avec un rapport C/N plus élevé sous Douglas et épicéa confèreraient au sol une stabilité structurale durable (MO pérennes). Le substrat organique est moins propice à l'établissement d'une activité microbiologique intense, la porosité du sol est donc plus faible, le niveau de surface semble être moins bio-turbé avec une porosité [4,5-1,5 µm] qui reste réduite. La matière organique aurait un temps de résidence

Tableau 5 - Discrimination des horizons [0-5 cm] des différents couverts par leurs paramètres physico-chimiques**Table 5** - Discrimination of [0-5 cm] horizons for each stand according its physico-chemical characteristics

	Cailloux	Argiles	Sables	C	N	C/N	Da	pH	S/T	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	RU	Stabilité structurale
épicéa	a	a	a	a b	a	b	a	b c	a	a	a	a b	a	a	c	b c
épicéa amendé	a	a	a	b	b	b	a	a	a	a	a	a	a	a	d	b c
Douglas	a	a	a	a	a	b	a	a b	a b	a	a	a b	a b	a	a	c
Douglas amendé	a	a	a	a	a	b	a	c	b	a	a	a b	a b	b	a	c
hêtre	a	a	a	b	c	a	a	a b	a b	a	a	b	a b	a	b	a b
chêne	a	a	a	b	c	a	a	a b	a b	a	a	a b	b	a	d	a
TsF	a	a	a	b	c	a	a	a	a	a	a	a	a b	a b	b	a b

(Une lettre différente signifie une valeur statistique différente au seuil 5 %).

plus long dans le sol car elle serait moins vite consommée et elle pourrait servir à la consolidation de la structure. Cette explication peut alors étayer les observations faites sous Douglas, montrant une stabilité structurale élevée mais une réserve utile faible dans l'horizon de surface. Pour le chêne, le hêtre et le TsF, nous expliquons ainsi les volumes poraux importants mesurés dans ces sols et les stabilités structurales plus faibles que sous Douglas et épicéa. Une nuance toutefois subsiste : pour l'épicéa, la qualité et la quantité de MO ne semblent pas être les seuls facteurs influant de manière prépondérante et discriminante sur les propriétés physiques du sol. En effet, les parcelles d'épicéa présentent des stabilités structurales élevées (comportement des résineux) mais elles présentent également des porosités grossières et des RU importantes (comportement des feuillus).

- *Hypothèse 2 « des populations fongiques, bactériennes, méso-fauniques, différentes entre les essences »* qui induiraient par leur activité des variations de stabilité structurale et de porosité sous les couverts. Les résultats de travaux d'inventaires en cours permettront de tester cette hypothèse. Une approche globale des populations bactériennes et fongiques réalisée à partir de l'extraction de l'ADN total du sol montre effectivement que les essences structurent les communautés de micro-organismes des sols (Lejon *et al.*, 2005).

- *Hypothèse 3 « la stabilité structurale est fortement influencée par l'hydrophobicité de la MO du sol et des litières, et par les assemblages argiles-MO naturellement hydrophobes »* : de nombreux auteurs ont relevé que l'hydrophobicité de la MO jouait sur la quantité de macro-agrégats résistants à HR et surtout à HL, ce qui contribue à accroître la stabilité structurale globale des sols forestiers par rapport au sols cultivés (De Gryze *et al.*, 2006; Chenu *et al.*, 2000). Or, le sol minéral est homogène et les retombées de litière sont identiques en quantité entre les parcelles (Ranger *et al.*, 2004). C'est donc la nature des retombées et ou la qualité des assemblages Argiles-MO qui doit changer sous les essences. Le degré d'hydrophobicité pourrait varier et serait plus important sous résineux, accentué par une abondance de débris persistants de litière (Chenu *et al.*, 2000), ce qui a été observé mais pas mesuré.

Ces 3 hypothèses font l'objet de travaux en cours et constituent une ouverture sur la suite des études à entreprendre. Ainsi, des

projets sont programmés concernant l'analyse chimique poussée des litières (hydrophobicité, aromaticité...), l'analyse de leur dynamique de dégradation, et les inventaires des populations biologiques du sol. On peut espérer pouvoir préciser davantage l'action des essences sur la physique du sol et sur l'orientation de la pédogenèse.

Effets des amendements

La croissance des arbres et la production de bois sont significativement augmentées par amendement (Sicard *et al.*, 2005). Le rapport C/N des sols a tendance à être plus élevé sous les parcelles traitées par rapport aux témoins (*tableau 1*). L'augmentation du C/N du sol peut être liée à celle du C/N des litières mais pourrait aussi provenir d'une modification du fonctionnement du sol. L'amendement a probablement modifié directement (apports d'éléments dans le cycle en particulier pour P et Ca) ou indirectement (prélèvement, restitution, efficacité d'utilisation, enracinement, exsudats racinaires etc.) la quantité et la nature des populations de micro-organismes. La fertilisation a re-dynamisé le cycle biogéochimique avec un effet sur la RU et sur la stabilité structurale, mais cet effet se cantonne à la surface du sol où les dynamiques de recyclage et d'activité biologique sont les plus intenses.

- *Effet de l'amendement sur la RU* : dans les horizons de surface [0 à 10 cm], l'amendement pourrait avoir induit une augmentation de l'activité biologique, ce qui aurait eu pour effet d'augmenter les porosités grossières et la RU (*figures 4 et 5*). Cependant, l'amendement n'a pas le même effet sous épicéa et sous Douglas, améliorant les RU entre 5 et 10 cm sous Douglas et entre 0 et 5 cm sous épicéa. Il s'agit d'un effet spécifique lié à des facteurs complexes de type enracinement, exsudation, qualité des MO fraîches restituées au sol, qualité des MO du sol. Entre 10 et 40 cm, le fait qu'il n'y ait plus de différence significative sur la RU et sa répartition porale, entre parcelles témoins et amendées, est révélateur d'un effet ténu de cette fertilisation qui ne s'est pas propagée en profondeur.

- *Effet de l'amendement sur la stabilité structurale* : les apports d'amendements qui ont eu lieu 25 années auparavant ont encore une action sur la stabilité structurale. Ce phénomène exceptionnel est lié à l'extrême efficacité du cycle biologique en milieu forestier,

réapprovisionnant les horizons de surface en cations alcalino-terreux peu compétitifs en sol acide, vis-à-vis de Al, pour saturer le complexe d'échange. Dans d'autres contextes, comme le contexte agricole de production céréalière, l'effet sur la stabilité structurale n'est pas significatif avec des doses d'amendements comparables (Eviner et Stuart Chapin III, 2002). Des éléments comme Ca, ont des teneurs supérieures sur les parcelles amendées (entre 0 et 10 cm (*tableau 1*)), et sont fortement recyclés par les litières, ayant ainsi un rôle direct et indirect sur l'agrégation (Wallace *et al.*, 1966).

Les limites des méthodes d'acquisition de la stabilité structurale et des RU : en échantillonnant en février, des facteurs dynamiques agissant sur la structure ont pu être omis. Les fluctuations du climat induisent des changements dans le stockage de matières organiques et dans le degré d'agrégation du sol (Carter et Stewart, 1996; Blackman, 1992), les exsudats racinaires et l'activité biologique du sol étant plus intenses au printemps qu'en hiver (Amézqueta, 1999; Chenu, 1993; Oades, 1993). La quantité et la qualité des restitutions varient également au cours de l'année, et les variations temporelles de la stabilité structurale devraient être quantifiées par un suivi saisonnier.

La stabilité structurale varie aussi avec la teneur en eau du sol. Il semblerait que l'augmentation de la teneur en eau puisse avoir un effet global positif sur la stabilité structurale, qui serait dû à une augmentation de la résistance des agrégats humides au test de réhumectation rapide (Caron *et al.*, 1996; Truman *et al.*, 1990; Le Bissonnais *et al.*, 1989; Gollany *et al.*, 1991; Le Bissonnais et Singer, 1992). Il serait intéressant de mesurer des stabilités structurales pour différentes teneurs en eau (et pas seulement secs).

La variabilité temporelle au cours du développement des peuplements reste également à étudier. Au bout de 25 années, si le Douglas et l'épicéa ont atteint leur vitesse maximale de croissance, ça n'est pas le cas des feuillus. Il faudra suivre l'évolution des états de structuration et de RU des sols avec le vieillissement des plantations et comparer les effets d'un cycle végétatif entier de chacune des essences, sur les propriétés physiques du sol. L'effet des amendements n'est également pas illimité. Un suivi sur le long terme s'impose et le dispositif de Breuil le permet.

Essais de modélisation

- Estimation des propriétés de rétention en eau (RU) des sols de Breuil, par l'intermédiaire de fonctions de pédo-transfert (FTP).

Des FTP ont été établies entre 0 et 25 cm (FTP 1) puis entre 0 et 10 cm (FTP 2), en entrant la seule variable corrélée significativement avec la RU : la stabilité structurale (*tableau 4*). Elles expliquent respectivement 58 % et 65 % de la variabilité des RU mesurées.

$$RU = 0,25 - (0,08 \times \text{Stabilité structurale}) \quad (1)$$

$$RU = 0,548 - (0,226 \times \text{Stabilité structurale}) \quad (2)$$

Les RU estimées varient significativement avec la profondeur, cependant, elles ne permettent pas de retrouver une discrimination significative des essences ni de visualiser un effet de l'amendement.

- Prédiction des conductivités à saturation (Ks) avec le modèle Rosetta du laboratoire « Agricultural Research Service of United States Department of Agriculture ».

Comme pour l'estimation des RU, les effets des essences et de l'amendement sont trop ténus pour qu'ils puissent être visualisés avec ce modèle qui ne prend en compte que les variables Da, pF 4.2, pF 2.5, teneurs en argiles et sables, somme toute très homogènes dans cette expérimentation.

CONCLUSION

Les recherches entreprises depuis 30 ans dans le Morvan (forêt de Breuil) sur la substitution d'essences, ont permis de préciser l'impact comparatif de ces différentes essences sur le fonctionnement et la structuration physique du sol.

Effet des couverts forestiers

Au bout de 30 années, les modifications apportées par ces différents peuplements à la stabilité structurale, restent localisées en surface des sols, entre 0 et 10 cm. Les résineux semblent apporter plus de stabilité dans l'agrégation du sol que les feuillus. Le classement obtenu pour ce critère est le suivant : Douglas (témoin et amendé), épicéa (témoin et amendé), taillis-sous-futaie, hêtre, et chêne.

Les changements de réserve utile, comme pour la stabilité structurale, n'affectent que les niveaux superficiels du sol [0 à 10 cm]. Ces changements sont liés à des différences dans les proportions des classes porales qui contribuent au stockage de cette RU du sol. Les essences semblent principalement avoir agi sur les proportions des classes porales les plus grossières [4,5 à 0,45 μm]. Quantitativement, les sols où les classes porales [4,5-1,5] et [1,5-0,45 μm] sont augmentées et par conséquent où les RU ont été accrues concernent l'épicéa et le chêne. A l'inverse, sous le Douglas, la proportion des classes porales grossières et la RU des niveaux de surface, ont diminué. Les parcelles de hêtre et le taillis-sous-futaie ont des proportions des classes [4,5 à 0,45 μm] qui sont intermédiaires, et les RU de ces sols sont également intermédiaires.

La stabilité structurale et les réserves utiles semblent intimement liées l'une à l'autre. La corrélation entre ces deux paramètres semble tenir de la qualité et de la quantité de matières organiques présentes dans les sols. Les matières organiques dont le C/N est le plus faible, sont associées aux stabilités structurales les plus faibles et aux RU les plus fortes alors que les matières organiques avec un C/N élevé sont associées aux sols avec les stabilités structurales les plus fortes et les RU les plus faibles. Seul l'épicéa ne semble pas obéir tout à

fait à cette règle puisque les sols sous ce couvert présentent à la fois des RU et des stabilités structurales élevées.

L'amendement améliore significativement la stabilité structurale et la RU. Dans des milieux à faibles intrants, et sur des roches acides pauvres en éléments nutritifs, l'amendement a permis à des essences à croissance rapide (épicéa et Douglas), de palier les carences nutritives et a permis d'amplifier l'action des couverts sur « le sol » en augmentant la production des compartiments ligneux et en modifiant la qualité des litières (plus riche en Ca en particulier). Cet effet est remarquablement durable par le biais du recyclage biologique particulièrement performant pour améliorer la production et les restitutions au sol, mais également pour maintenir sur le complexe adsorbant, les éléments les moins compétitifs et/ou qui ne peuvent provenir de l'altération de minéraux altérables inexistantes en sol très acide (ex: Ca).

Cette étude va à l'encontre de certaines idées reçues qui tendent à « diaboliser » les plantations de résineux et leurs effets sur les sols. S'il est communément admis que les résineux ont un impact néfaste sur la chimie des sols et des eaux, par acidification, en revanche, il apparaît ici qu'ils ont un effet plutôt positif sur leurs structurations physiques. En effet, cette étude montre clairement que les plantations d'épicéa ont eu un impact positif et équilibré,

et semblent être un bon compromis entre production, maintien et régénération des qualités physiques du sol. Le Douglas augmente lui aussi la stabilité structurale même s'il diminue la réserve utile des horizons de surface.

Se pose alors la question de la pérennité de ces porosités et de leurs efficacités dans le transfert de fluides. On peut penser que les indices de stabilité structurale élevés sont les garants d'une RU et d'une connectivité porale conservative, facilitant les infiltrations par capillarité et les prélèvements par les plantes. Dans ce contexte pédoclimatique précis, les résineux pourraient bien contribuer à l'amélioration de la dynamique des fluides dans les sols, mais ceci reste à vérifier par des études de conductivité hydraulique et/ou par des études radiographiques et micromorphologiques ainsi que par une étude de l'effet des essences sur la macroporosité (tableau 6).

Généralisation des observations faites à Breuil

Les méthodes utilisées se sont révélées être assez fines pour enregistrer l'effet des essences sur la physique du sol mais elles restent spécifiques à ce site et ne peuvent être généralisées directement. Il faudrait faire le même travail dans un réseau d'observation

Tableau 6 - Estimation de la porosité totale du sol et de sa répartition entre la microporosité, la réserve utile et la macroporosité

Table 6 - Estimation of total porosity and its distribution between microporosity, capacity for available water storage and macroporosity

	Dr moy.	Dr (e-t)	Da	Porosité totale (% du volume de sol)	Microporosité (% de la porosité totale)	RU (% de la porosité totale)	Macroporosité (% de la porosité totale)
Epicéa							
0-10 cm	2,42	0,02	1,03	57	21	28	51
10-25 cm	2,43	0,05	0,86	65	15	18	66
25-55 cm	2,43	0,01	0,95	61	16	21	63
55-70 cm	2,48	0,04	1,22	51	24	32	44
Douglas							
0-10 cm	2,31	0,03	0,87	62	23	12	65
10-25 cm	2,26	0,04	0,92	59	23	11	66
25-55 cm	2,40	0,06	0,97	60	22	21	58
55-70 cm	2,45	0,05	1,34	45	37	40	23
Chêne							
0-10 cm	2,26	0,03	0,89	61	22	26	52
10-25 cm	2,39	0,03	0,94	61	20	22	58
25-55 cm	2,41	0,04	1,02	58	23	22	55
55-70 cm	2,44	0,02	1,35	45	36	38	26
Hêtre							
0-10 cm	2,24	0,03	0,78	65	19	13	68
10-25 cm	2,34	0,02	0,85	64	18	15	67
25-55 cm	2,34	0,03	1,11	53	26	25	50
55-70 cm	2,42	0,01	1,25	48	30	26	44
Taillis-sous-futaie							
0-10 cm	2,28	0,05	0,84	63	21	13	66
10-25 cm	2,41	0,03	1,05	56	21	22	56
25-55 cm	2,42	0,08	1,22	49	24	33	43
55-70 cm	2,42	0,01	1,16	52	22	28	50

La porosité totale ($1 - (Da/Dr)$) est exprimée en pourcentage volumique par rapport au volume de sol considéré. La microporosité (porosité dont le rayon de pore équivalent est $< 0,1 \mu\text{m}$ ($\psi < pF 4,2$)), la réserve utile « RU » (définie entre le point de flétrissement permanent ($\psi \leq pF 4,2 \Rightarrow$ rayon de pore équivalent à $0,1 \mu\text{m}$) et la capacité au champ ($\psi \geq pF 2,5 \Rightarrow$ rayon de pore équivalent à $4,5 \mu\text{m}$)), la macroporosité (pores grossiers servant à l'écoulement gravitaire ($\psi \leq pF 2,5 \Rightarrow$ rayon de pore équivalent $> 4,5 \mu\text{m}$)), sont exprimées en pourcentage volumique par rapport à la porosité totale.

où la variabilité des facteurs du milieu serait explorée. Il n'existe cependant pas d'autre site expérimental en France s'intéressant aux interactions essence x milieu ; ces données sont pourtant indispensables pour comprendre, généraliser et prévoir l'effet des essences.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier O. Duval, H. Gaillard, Y. Le Bissonnais de l'INRA d'Orléans pour l'aide efficace qu'ils nous ont apportées pour l'exécution des protocoles. Nous tenons également à remercier l'ensemble des collaborateurs techniques du projet "Breuil" D. Gelhaye, L. Gelhaye, B. Pollier, P. Bonneau, S. Bienaime, J.P. Calmet, G. Nourrisson, pour leur participation à l'acquisition des données constitutives de la base de données du site ORE de Breuil.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR Norme française NF ISO 10390, 1996 - Techniques d'échantillonnage ; qualité des sols. Troisième édition.
- Agresta, 2004 - Base de données sur la stabilité structurale. Contact: INRA Orléans UR272 Science du sol, Odile Duval.
- Amézketa E., 1999 - Soil aggregate stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, Vol. 14(2/3).
- Aourousseau P., 1976 - Morphologie et genèse des sols sur granite du Morvan. Thèse de Docteur Ingénieur Université de Rennes ENSAR 220 p.
- Blackman J.D., 1992 - Seasonal variation in the aggregate stability of downland soils. *Soil use & management* 8 - pp. 142-150.
- Bonneau M., Brethes A., Larcaze J.F., Lelong F., Levy G., Nys C., Souchier B., 1977 - Modifications de la fertilité des sols sous boisements artificiels de résineux purs. C.R. Fin d'Etude D.G.R.S.T.: 88 p.
- Caron J., Espindola C.R., Angers D.A., 1996 - Soil structural stability during rapid wetting: Influence of land use on some aggregate properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 pp. 901-908.
- Carter R. et Stewart B.A., 1996 - Structure and organic matter storage in agricultural soils. *Advances in Soil Science*. Lewis Publishers, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Chenu C., Le Bissonnais Y., Arrouays D., 2000 - Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 - pp. 1479-1486.
- Chenu C., 1993 - Clay-or-sand-polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure. *Geoderma* 56 - pp. 143-156.
- De Gryze S., Jassogne L., Bossuyt H., Six J., Merckx R., 2006 - Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture. *European Journal of Soil Science*, 57 - pp. 235-246.
- Dejou J., 1967 - L'altération des granites à 2 micas du massif de la Pierre qui Vire. Etude pétrographique de ses différents faciès. *Annales agronomiques*, vol 18.
- Dejou J., 1966 - Le granite à 2 micas de la Pierre qui Vire. Etude pétrographique de ses différents faciès. *Annales agronomiques*, vol 17.
- Eviner T. V. et Stuart Chapin III F., 2002 - The influence of plant species, fertilization and elevated CO₂ on soil aggregate stability. *Plant and soil*, 246 - pp. 211-219.
- Gollany H.T., Schumacher T.E., Everson P.D., Lindstrom M.J., Lemme G.D., 1991 - Aggregate stability of an eroded and desurfaced typical Argiustoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55 - pp. 811-816.
- Haynes R. J. & R.S. Swift, 1990 - Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *Journal of soil Science*, 41 - pp. 73-83.
- Hénin S, Monnier G, et Combeau A., 1958 - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9 - pp. 73-92.
- IFN, 2005 - Site internet de l'inventaire forestier national : www.ifn.fr.
- Le Bissonnais Y., et Gaillard H., 2004 - Mesure de la stabilité structurale des sols : test sur les agrégats. Fiche protocole INRA Orléans, Unité de science du sol-SESCPF .
- Le Bissonnais Y., 1996 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: 1. theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47 - pp. 425-437.
- Le Bissonnais Y., Singer M.J., 1992 - Crusting, runoff and erosion response to soil water content and successive rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 - pp. 1898-1903.
- Le Bissonnais Y., Bruand A., Jamagne M., 1989 - Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena* 16 - pp. 377-392.
- Lejon D.P.H., Chaussod R., Ranger J., Ranjard L., 2005 - Microbial community structure and density under different tree species in an acid forest soil (Morvan-France). *Microbial Ecology* - pp. 1-12.
- Mareschal L., 2005 - Effet de la substitution d'essences forestières sur la minéralogie des sols. Rapport de DEA National de Science du Sol.
- Nys C., 1987 - Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier : conséquences des enrénements. Thèse présentée à l'université de Nancy I.
- Oades J.M., 1993 - The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56 - pp. 377-400.
- Quétin Ph., et Gaillard H., 1998 - Mesure des propriétés de rétention en eau sur des mottes. Fiche protocole INRA Orléans, Unité de Science du sol-SESCPF.
- Ranger J., Andreux F., Bienaimé S., Berthelin J., Bonneau P., Boudo J.P., Bréchet C., Buée M., Calmet J.P., Chaussod R., Gelhaye D., Gelhaye L., Gérard F., Jaffrein J., Lejon D., Le Tacon F., Lévêque J., Maurice J.P., Merlet D., Moukoui J., Munier-Lamy, Nourrisson G., Pollier B., Ranjard L., Simonsson M., Turpault M.P., Vairalles D., Zeller B., 2004 - Effet des substitutions d'essences sur le fonctionnement organo-minéral de l'écosystème forestier, sur les communautés microbiennes et sur la diversité fongiques mycorhiziennes et saprophytes (cas du dispositif expérimental de Breuil – Morvan). Rapport final du contrat INRA-GIP Ecofor -24, N°INRA 1502A.
- Ranger J., et Nys C., 2003 - La qualité des sols forestiers français. Etude et gestion des sols Vol 10, n° 4 - pp. 263 à 285.
- Seddoh F. K., 1973 - Altération des roches cristallines du Morvan (Granite, granophyres, rhyolites) : Etude minéralogique, géochimique et micro-morphologique. Thèse de Doc., Université de Dijon, 377 p.
- Sicard C., Saint-André L., Gelhaye D., Ranger J., 2005 - Effect of initial fertilisation on biomass, nutrient content and nutrient-use efficiency of even-aged Norway spruce and Douglas-fir stands planted in the same ecological conditions. *Trees Structure and Function* (sous presse).
- Thomas K.D., Prescott C.E., 2000 - Nitrogen availability in forest floors of three tree species on the same site: the role of litter quality. *Can. J. for Res/Rev* 30 (11) - pp. 1696-1706.
- Truman C.C., Bradford J.M., Ferris J.E., 1990 - Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 - pp. 1385-1392.
- Wallace A., Frolich E., Lunt OR., 1966 - Calcium requirements of higher plants. *Nature* 209:634.