

Effets du débardage sur les propriétés physiques et mécaniques d'un sol lessivé sur loess en Forêt de Soignes

Khalid Rohand ⁽¹⁾, Marc Van Molle ⁽¹⁾, Jacques Herbauts ⁽²⁾, Jean-Claude Verbrugge ^(3,4)

⁽¹⁾ Geografisch Instituut. Faculteit Wetenschappen. Vrije Universiteit Brussel. Pleinlaan, 2. B-1050 Brussel (België).
E-mail : khrohand@vub.ac.be

⁽²⁾ Jardin expérimental Jean Massart. Laboratoire de Génétique et d'Écologie végétales. Université Libre de Bruxelles.
Chaussée de Wavre, 1850. B-1160 Bruxelles (Belgique)

⁽³⁾ Service Mécanique des Sols. Laboratoire J. Verdeyen. Université Libre de Bruxelles. Av. A. Buyl, 87. B-1050 Bruxelles (Belgique).

⁽⁴⁾ Laboratoire de Géotechnique environnementale. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).

Reçu le 9 novembre 1999, accepté le 5 juin 2000.

Des échantillons de sol ont été prélevés dans une futaie équienne de hêtres en Forêt de Soignes. Les sols, de texture limoneuse, y sont de type lessivé acide. L'échantillonnage des horizons éluviaux (E : 5–30 cm) et illuviaux (B_t : 30–60 cm) a été réalisé dans des zones non affectées par le passage des engins de débardage (E, B_t) et dans des zones omniérées limitrophes (E_g, B_{tg}). En plus du prélèvement d'échantillons de sol remaniés et non remaniés, des essais au pénétromètre de type cône index y ont été réalisés. Les premiers résultats obtenus sont révélateurs des perturbations qui affectent le profil soumis à des passages répétés d'un engin de débardage de type Timberjack (9,6 tonnes, 130 CV) : les valeurs de résistance à la pointe (q_c) du profil perturbé sont plus élevées que celles du profil témoin. Ceci constitue une confirmation d'observations antérieures qui ont mis en évidence, dans les secteurs omniérés de cette même station, une sévère réduction de la macroporosité des horizons de surface à une valeur proche du seuil critique pour la survie des systèmes racinaires (5,7 % du volume total du sol). Après avoir déterminé au laboratoire différents paramètres mécaniques de résistances (c', φ', σ_c) ainsi que des paramètres physiques (e, n, ρ_d) ou de comportement vis-à-vis de l'eau (w_p, w_p, I_p, I_c), on a pu établir que : – La cohésion effective (c') et la résistance à la compression simple (σ_c) du profil perturbé sont nettement supérieures à celles du profil témoin. – Le poids volumique sec (ρ_d) du profil perturbé est plus élevé que celui du profil témoin tandis que son indice de vide (e) et sa porosité (n) lui sont inférieurs. – Une énergie par unité de volume plus importante est nécessaire pour compacter l'horizon E_g au même poids volumique sec que l'horizon témoin E ; par contre cette énergie est plus grande pour l'horizon B_t que pour le B_{tg}. Ces premiers résultats confirment et précisent les effets défavorables que les techniques mécanisées d'exploitation forestière exercent sur les propriétés physiques et mécaniques des sols limoneux étudiés.

Mots-clés. Dégradation des sols forestiers, compactage, résistance à la pénétration, compression simple, cohésion.

Influence of logging traffic on physical and mechanical properties of a loamy leached soil in the Soignes Forest. In a even-aged high forest of beech in the Soignes Forest (near Brussels, Belgium), both intact and remoulded soil samples were taken in reference and adjacent wheel-rutted areas. Simultaneously, in the same areas, penetration tests were performed on the field. Local soils are argillic brown earths. The soil of the study, with an eluvial E horizon associated with an illuvial B_t horizon (clay accumulation), is a leached brown soil developed on loessic parent materials. In this forest site, soil compaction results from timber harvesting using a Timberjack engine (9.6 tons, 130 HP). Our determinations show clear perturbations in the E_g and B_{tg} horizons of the wheel-rutted soil, where q_c is greater than in the reference soil (E and B_t horizons). These observations bear out previous results which showed that in the wheel-rutted areas soil macroporosity decreases to less than 10% of the total soil volume. Mechanical laboratory tests show the following trends: – The wheel-rutted profile effective cohesion (c') and compressive strength (σ_c) are greater than those on the reference area. – The dry unit weight is higher in the wheel-rutted area than in the reference soil; consequently, void ratio (e) and porosity (n) are lower in the disturbed area. – The optimum Proctor's evolution with the compaction energy is reversed for the eluvial and the illuvial horizons. All these results provide evidence that in the studied soils logging traffic leads to the degradation of both physical and mechanical soil properties.

Keywords. Forest soils degradation, compaction, cone index, compressive strength, cohesion.

1. INTRODUCTION

Les effets préjudiciables que les engins d'exploitation forestière peuvent occasionner aux sols par compactage et leur impact sur la vitalité des peuplements, ont fait l'objet de diverses recherches (Wingate-Hill 1982, Wingate-Hill, Jakobsen, 1982, Wåsterlund 1994, Herbauts *et al.*, 1996). Celles-ci visent non seulement à mieux comprendre les processus de dégradation des sols, mais aussi à développer différentes méthodes pour lutter contre cette dégradation.

La recherche en cours est une contribution à l'étude de l'incidence que peuvent avoir les engins d'exploitation forestière sur les propriétés physiques et mécaniques des sols. Dans ce but les auteurs ont choisi d'étudier différentes stations en Forêt de Soignes, en l'occurrence des hêtraies installées sur des matériaux d'origine loessique. Les sols sont de type lessivé acide et à humus de type moder-mor. De texture limoneuse, ils sont réputés sensibles aux phénomènes de tassement (Delecour, 1987) et leur très faible activité biologique, liée à leur forte acidité ($\text{pH.H}_2\text{O} < 5$ jusqu'à une profondeur d'environ 2 m), s'oppose à une restauration structurale spontanée. Les dégâts que peuvent y occasionner les engins de débardage sont donc susceptibles de perdurer de nombreuses années et pourraient compromettre l'avenir des peuplements soniens, particulièrement des hêtraies dont on connaît la sensibilité à cet égard (Le Tacon, 1981 ; Nageleisen, 1993, 1994). Des mesures dendroécologiques récentes réalisées en Forêt de Soignes tendent à conforter cette hypothèse (Penninckx *et al.*, 1998).

Le présent article est un bilan des premières mesures de mécanique des sols qui ont été réalisées dans une futaie de hêtres de ce massif forestier. Ce peuplement a fait antérieurement l'objet d'une étude pédologique, axée principalement sur la caractérisation physico-chimique des sols, l'évolution des types de porosité, la géochimie du fer et l'altération des minéraux ; elle avait mis en évidence une dégradation hydromorphe très active des sols dans les secteurs ornierés (Herbauts *et al.*, 1996, 1998). Il a donc paru opportun de poursuivre et de développer ces investigations dans une direction qui fait appel à la mécanique des sols.

Les essais menés en laboratoire sur des échantillons provenant de sols témoins (c'est-à-dire non perturbés par le passage des engins d'exploitation forestière) et de sols compactés dans des secteurs limitrophes ornierés, couplés à des observations menées *in situ*, doivent permettre de déterminer leurs paramètres géomécaniques respectifs et mettre en évidence leur évolution sous l'action anthropique.

2. MATERIEL ET MÉTHODES

2.1. Site étudié

Le site étudié est une futaie équienne de hêtre, plantée en 1812. Elle est localisée sur le plateau limoneux, par ailleurs disséqué, de la Forêt de Soignes. Le sol, de type lessivé acide (Duchaufour, 1995) est cartographié comme "sol limoneux à horizon B textural fortement tacheté" (Abc) sur la Carte des Sols de la Belgique (Louis, 1959). Le matériau parental est un lœss d'origine périglaciaire dont la granulométrie est dominée par la fraction 2-50 μm ($> 70\%$) ; la teneur en argile ($< 2\ \mu\text{m}$) y est de l'ordre de 15 %. Le profil du sol est caractérisé par un horizon d'éluviation (E) d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur, appauvri en argile (10 % d'argile), surmontant un horizon d'illuviation argileuse (B_t : 20 % d'argile) qui se prolonge jusqu'à 1,50 m ou plus. À cette discontinuité texturale se superpose une discontinuité structurale, liée à la variation verticale de la densité sèche, de la porosité totale et de la macroporosité (**Figure 1**).

2.2. Échantillonnage

Le prélèvement des échantillons de sol a été réalisé dans des zones non perturbées par les engins de débardage (secteur témoin) et des zones ornierées adjacentes. Pour chacune de ces zones, des échantillons remaniés et non remaniés ont été prélevés dans les horizons de surface éluviaux (E et E_g : 5–30 cm) et les horizons illuviaux (B_t et B_{tg} : 30–60 cm), avec g pour marquer un effet d'hydromorphie (**Figure 1**).

Des mesures répétées au pénétromètre ont également été réalisées sur les lieux de prélèvements.

2.3. Méthodologie

Essais en laboratoires. Les échantillons prélevés *in situ* ont fait l'objet des essais suivants en laboratoire :

– *Essais Proctor*. Les essais Proctor ont été réalisés sur du sol remanié au Laboratoire de Géotechnique environnementale de la Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (FUSAGx). Il existe deux types d'essai Proctor qui correspondent à des énergies de compactage différentes (E_C) : l'essai Proctor normal (PN) avec $E_{CN} = 0,6\ \text{MJ/m}^3$ et l'essai Proctor modifié (PM) pour lequel $E_{CM} = 2,7\ \text{MJ/m}^3$ (Verbrugge, 1998b).

– *Essais triaxiaux et de compression simple*. Ces essais ont été réalisés au Service de Mécanique des Sols (Laboratoire Jacques Verdeyen) de l'Université Libre de Bruxelles, sur des éprouvettes de sols non remaniés. Les procédures utilisées pour ces essais correspondent aux modes opératoires habituels (Norme Française, 1994 ; Verbrugge, 1998a).

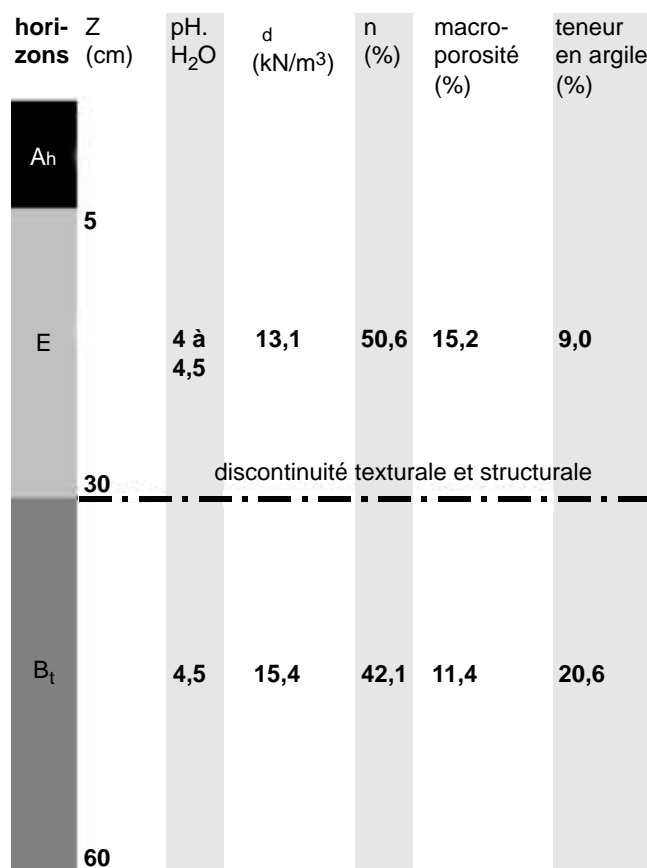


Figure 1. Représentation schématique du profil de sol et principales caractéristiques analytiques — *Outline of soil profile and main analytical data.*

Essais *in situ*. Des essais au pénétromètre statique ($n=10$) ont été réalisés dans la zone témoin (horizons E/B_t) et dans la zone perturbée (horizons E_g/B_{tg}). La tige du pénétromètre est enfoncée progressivement jusqu'à une profondeur maximale de 43,5 cm, puis retirée du sol. Les valeurs des forces exercées en fonction de la profondeur sont automatiquement mémorisées pour dix valeurs présélectionnées de la profondeur (Z) et ainsi récupérées après chaque essai.

3. RÉSULTATS DES ESSAIS *IN SITU*

Les résultats de ces essais, sous la forme d'un graphique donnant la moyenne des résistances à la pointe q_c en fonction de la profondeur Z , sont données à la **figure 2**.

On constate que q_{cc} (zone perturbée) augmente rapidement avec la profondeur pour atteindre une valeur proche de 5500 kPa qui se maintient jusqu'à environ 30 cm, puis elle chute légèrement vers $Z = 33,5$ cm, c'est-à-dire au niveau de l'horizon B_{tg} dans lequel les q_{cc} se stabilisent aux environs de 4500 kPa.

Quand à q_{ct} (zone témoin), elle augmente uniformément et à peu près linéairement avec la

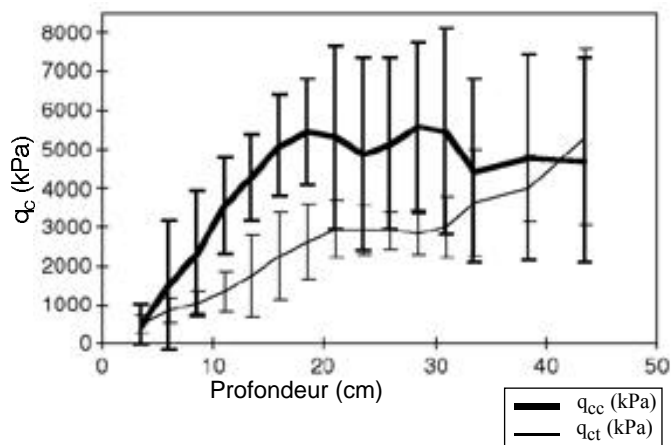


Figure 2. Résistance à la pointe q_c dans la zone témoin (q_{ct}) et dans la zone perturbée (q_{cc}); les barres d'erreurs représentent les déviations standards — q_c in the reference area (q_{ct}) and in the wheel-rutted area (q_{cc}); error bars represent standard deviations.

profondeur, jusqu'à environ 26 cm de profondeur, puis elle grimpe brusquement à partir de 30 cm (début de l'horizon B_t).

Par ailleurs, au niveau de l'horizon supérieur E, l'écart entre les deux diagrammes est important, celui de E_g valant presque le double de l'autre. Le **tableau 1** illustre les résultats du test-t qui montre que la différence entre les q_c est respectivement non significative entre 3,5 et 8,5 cm (Z est inférieur à la profondeur critique), très hautement significative entre 11 et 18,5 cm, hautement significative entre 21 et 31 cm et non significative entre 33,5 et 43,5 cm, c'est-à-dire au niveau des horizons B_t et B_{tg}.

À titre de comparaison, la **figure 3** reprend les valeurs de la **figure 2** et les résultats d'essais pénétrométriques effectués dans un sol agricole limoneux de la région de Gembloux.

L'intérêt, purement indicatif, de ces essais est de montrer la différence de condition initiale (q_{ct} et q_o) et de rappeler l'influence du passage répété des roues. Sur la **figure 3**, q_{co} , q_{c1} et q_{c2} correspondent aux valeurs moyennes des résistances à la pointe, respectivement, pour zéro, un et deux passages de tracteur sur un sol limoneux agricole immédiatement après labour, le

Tableau 1. Test-t non païré de q_c des horizons E vs E_g et B_t vs B_{tg} — *Unpaired t-test of q_c for E vs E_g and B_t vs B_{tg}.*

Test-t (n = 10)	profondeurs	q_c
E vs E _g	de 3,5 à 8,5 cm	NS
	de 11,0 à 18,5 cm	***
	de 21,0 à 31,0 cm	**
B _t vs B _{tg}	de 33,5 à 43,5 cm	NS

*** = $P < 0,001$; ** = $P < 0,01$; * = $P < 0,05$; NS = non significative

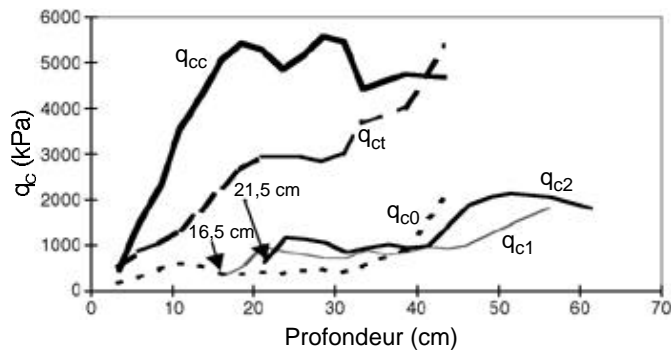


Figure 3. Résistance à la pointe q_c pour un sol forestier (q_{cc} et q_{ct}) et pour un sol agricole (q_{c0} , q_{c1} et q_{c2}) — q_c in the forest soil (q_{cc} and q_{ct}) and in the agricultural soil (q_{c0} , q_{c1} and q_{c2}).

décalage des courbes correspond à la profondeur d'ornièrre, qui pour le premier passage est de 16,5 cm et après le second vaut 21,5 cm.

On constate l'influence du nombre de passages du tracteur sur la valeur de q_c , ainsi que la différence importante entre le sol forestier et le sol agricole. Ceci montre que la transposition au sol forestier (Abc) de l'expérience acquise sur sol agricole (Aba) doit être faite avec le discernement de la carte des sols.

4. RÉSULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE

4.1. Essai d'identification

Les échantillons provenant des quatre horizons étudiés, à savoir, E, B_t , E_g et B_{tg} ont fait l'objet d'analyses granulométriques, ainsi que de la détermination des limites d'Atterberg. Les résultats obtenus sont groupés dans les **tableaux 2** et **3**.

On confirme une présence plus importante de particules dont le diamètre est inférieur à $2 \mu\text{m}$ dans les horizons illuviaux (B_t et B_{tg}) que dans les horizons éluviaux (E et E_g).

Par ailleurs, les valeurs de l'indice de consistance I_c (**Tableau 3**) dans les horizons perturbés sont plus élevées que celles des horizons témoins. En effet, pour E_g cet indice vaut environ le double de celui de son homologue E.

4.2. Essais Proctor

Les résultats des essais Proctor sont synthétisés au **tableau 4** et à titre d'exemples les **figures 4** et **5** reprennent les graphiques issus des analyses des essais PN et PM.

Tableau 2. Analyse granulométrique des quatre horizons étudiés — *Particle size distribution of the soil horizons.*

Horizon	Catégorie			
	sable	limon grossier	limon fin	argile
	2–0,05 mm	50–20 μm	20–2 μm	< 2 μm
E	17,9	50,0	24,4	7,6
B_t	24,0	44,0	20,4	11,6
E_g	30,0	41,5	19,0	9,6
B_{tg}	13,0	49,0	24,3	13,7

Tableau 3. Teneur en eau et résultats des essais de comportement des horizons E, B_t , E_g et B_{tg} — *Water content and the Atterberg limits of E, B_t , E_g and B_{tg} .*

Horizon	Teneur en eau w (%)	Limites d'Atterberg			
		w_l (%)	w_p (%)	I_p	I_c
E	29	34	25,0	9	0,55
B_t	22	28	20,5	7,5	0,80
E_g	27	39	27,0	12,0	1,00
B_{tg}	20	29	20,4	8,6	1,05

Tableau 4. Teneur en eau optimale de l'essai Proctor w_{opt} et poids volumique apparent sec γ_{dmax} des différents horizons étudiés — *w_{opt} and γ_{dmax} for the studied soil horizons.*

Horizon	Proctor normal		Proctor modifié	
	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)
E	18,9	15,8	16,8	17,0
B_t	17,0	16,5	14,0	17,8
E_g	18,4	15,5	16,4	16,3
B_{tg}	16,0	17,2	14,0	18,0

Essai Proctor normal. La **figure 4** qui représente les courbes Proctor normales des deux horizons homologues B_t et B_{tg} , montre que les teneurs en eau optimales (w_{opt}) sont de 16,0 % pour B_{tg} et de 17,0 % pour B_t . Les poids volumiques apparents secs maxima (γ_{dmax}) correspondants sont, respectivement, de 17,2 et 16,5 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$. On constate que pour une énergie spécifique de compactage identique, γ_{dmax} de B_t est inférieur à celui de B_{tg} .

Pour les horizons homologues éluviaux, E et E_g , γ_{dmax} vaut respectivement 15,8 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ et 15,5 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$; tandis que pour w_{opt} on trouve 18,9 % et 18,4 %. Donc, pour une même énergie de compactage, la valeur de γ_{dmax} de l'horizon E_g est inférieure à celle de l'horizon E. Les points représentatifs des optima sont plus proches dans les horizons E et E_g que dans B_t et B_{tg} .

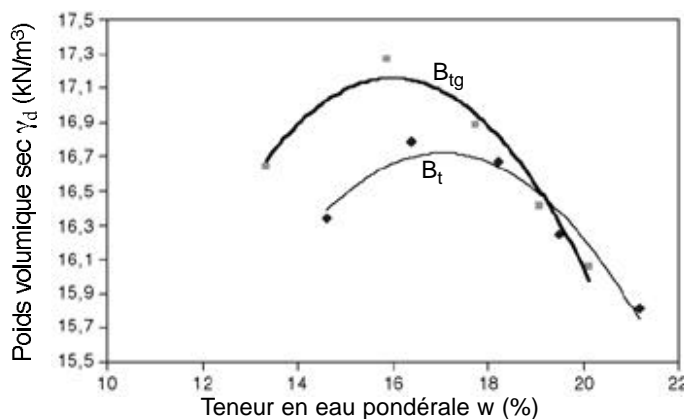


Figure 4. Courbe Proctor normale de B_t et B_{tg} — *Normal Proctor of B_t and B_{tg} .*

Essais Proctor modifié. À l'optimum Proctor modifié, pour B_t et B_{tg} , les teneurs en eau sont similaires et égales à 14,0 %; par contre les valeurs respectives du poids volumique apparent sec maximum sont de 17,8 et 18,0 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$. Ici aussi, on constate que la densité sèche optimum γ_{dmax} de l'horizon perturbé B_{tg} est plus élevée que celui de l'horizon témoin B_t . Néanmoins, la différence est moindre que pour le Proctor normal.

Les deux courbes de la **figure 5** ne se recoupent plus et sont situées l'une au-dessus de l'autre. Pour E_g , γ_{dmax} vaut 16,3 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ et reste inférieur à la valeur de E qui est de 17,00 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$. Les teneurs en eau optimales w_{opt} sont de 16,8 % pour E_g et de 16,4 % pour E .

Interprétation. Les résultats de l'ensemble des essais Proctor sur les échantillons homologues du site étudié, sont synthétisés à la **figure 6**, où on a porté le poids volumique apparent sec maximum des horizons E , E_g , B_t et B_{tg} , en fonction du logarithme de l'énergie spécifique de compactage. En principe cette évolution est linéaire (Verbrugge, 1998b).

Il ressort de cette figure que l'évolution de ces optima en fonction de l'énergie est inversée pour les horizons éluviaux (E , E_g) par rapport aux horizons illuviaux (B_t , B_{tg}). Cette inversion indique que pour une énergie donnée, l'horizon E est plus sensible au compactage que E_g ; par contre B_{tg} l'est plus que B_t . La pente de l'horizon B_{tg} est quasi parallèle à celle de E_g et elle est moins prononcée que celle des horizons B_t et E ; ceci signifie que pour le profil perturbé l'évolution de γ_{dmax} et donc de la compacité maximale est moins affectée par l'énergie de compactage. Or, il est intéressant de rappeler que celle-ci s'exprime en MJ/m^3 c'est-à-dire en fin de compte en kPa , soit la même unité que la pression de contact des pneumatiques sur le sol forestier. D'autre part, des

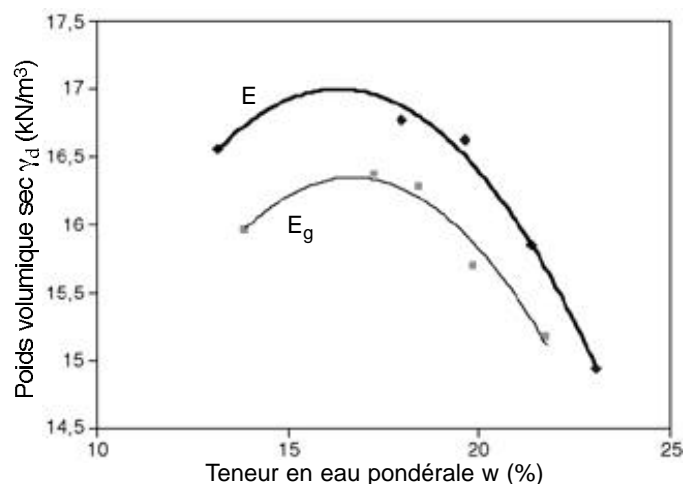


Figure 5. Courbe Proctor modifié de E et E_g — *Modified Proctor of E and E_g .*

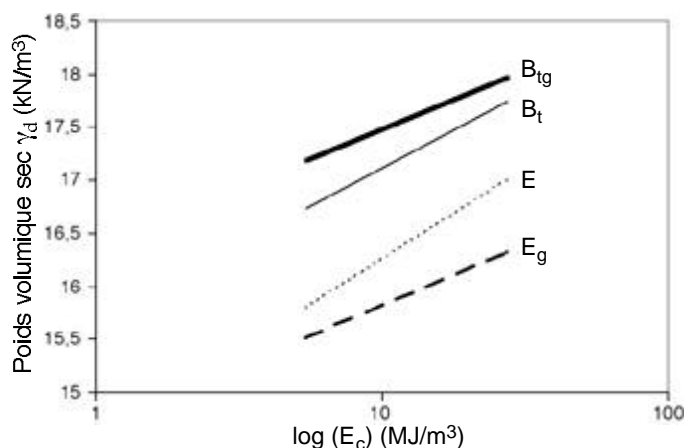


Figure 6. Compactabilité des horizons B_{tg} , B_t , E et E_g — *Compactness of B_{tg} , B_t , E and E_g .*

analyses des diverses formes extractibles du fer et de l'aluminium (Herbauts *et al.*, 1996) montrent que l'horizon E_g est significativement appauvri en fer libre et en fer amorphe par rapport au E témoin alors qu'à l'opposé le B_{tg} s'enrichit en composés ferriques par rapport au B_t original. C'est là une explication probable du comportement inversé de ces horizons, qui fera l'objet des essais futurs.

4.3. Essais triaxiaux

Le type d'essai choisi pour nos éprouvettes non remaniées, provenant des quatre horizons étudiés, est l'essai consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU). Cet essai nécessite le cisaillement d'au moins trois éprouvettes du même échantillon, préparées et saturées dans des conditions identiques et soumises à des pressions de consolidation différentes.

Paramètres physiques des horizons. Ces essais ont également permis de déterminer le poids volumique apparent sec (γ_d), la porosité (n) et l'indice de vides (e) de chacun de ces horizons. Les résultats sont donnés dans le **tableau 5**. Comme on pouvait s'y attendre, on constate que la porosité et l'indice de vides des horizons perturbés sont inférieurs à ceux des horizons témoins homologues ; réciproquement, leur poids volumique sec est supérieur.

Paramètres mécaniques. Les essais triaxiaux ont permis de déterminer la cohésion ainsi que l'angle de frottement interne effectifs des quatre horizons. Le **tableau 6** fournit les valeurs de c' et ϕ' calculées à partir des cercles de Mohr et à partir de la droite M d'état critique. La cohésion effective de B_{tg} est environ trois fois plus élevée que celle de B_t alors que celle de E_g est sensiblement voisine ou légèrement inférieure à celle de E. Il est bien établi que pour un sol donné la valeur de l'angle de frottement interne augmente avec sa compacité, cette règle se retrouve ici au niveau des horizons homologues.

Pour les horizons supérieurs E/ E_g , la cohésion varie peu, par contre le frottement interne augmente fortement, ce qui traduit les effets de la compacité dus à la perturbation liée aux travaux forestiers. Pour ϕ' on ne constate que de faibles fluctuations pour les horizons B_t/B_{tg} moins soumis au compactage. Le triplement de la cohésion dans une couche plus profonde et moins influencée par la pression des

Tableau 5. Porosité, indice des vides et poids volumique sec maximum des quatre horizons — *Porosity, void ratio and dry unit weight of the four horizons.*

Horizon	Porosité n (%)	Indice des vides e (%)	γ_d (kN/m ³)
E	44,1	79,1	14,5
B_t	39,2	64,4	15,8
E_g	40,5	68,3	15,4
B_{tg}	36,2	57,0	16,5

Tableau 6. Cohésion effective et angle de frottement interne effectif des quatre horizons (méthodes de Mohr et d'état critique) — *Effective cohesion intercepts and effective angle of internal friction (Mohr and critical state methods).*

Horizons	c' Mohr (kPa)	ϕ' Mohr (°)	c' état critique (kPa)	ϕ' état critique (°)
E	17,7	29,0	19,5	33,2
B_t	7,7	35,0	8,0	36,2
E_g	17,9	38,4	18,9	40,0
B_{tg}	23,0	35,0	33,1	39,2

pneumatiques, alors que ϕ' varie peu, semble devoir être cherché ailleurs que dans le simple effet des actions mécaniques. Ceci peut être attribué à une forme de cimentation liée à l'accumulation du fer provenant de l'horizon E, phénomène mis en évidence antérieurement par Herbauts *et al.* (1996). Cette explication est conforme aux observations de Biarez *et al.* (1998) sur des sols avec et sans "colle".

Déformations à la rupture. Le **tableau 7** représente le déviateur des contraintes à la rupture (q) relatif aux éprouvettes soumises à une pression de consolidation différente (50, 100 et 200 kPa) ainsi que la déformation axiale à la rupture.

Quelle que soit la pression de consolidation σ_3 , les ruptures sont atteintes pour des déformations plus grandes pour les horizons témoins que pour les horizons perturbés homologues et correspondent à des déviateurs inférieurs à ceux des horizons perturbés.

Donc, les chemins de contrainte suivis montrent que l'écroutissage est plus marqué au niveau du profil perturbé qu'il ne l'est au niveau du profil témoin (les éprouvettes de E_g et de B_{tg} présentent un comportement de type plus raide et se cisailent plus vite).

4.4. Essais de compression simple

Les **figures 7a** et **7b**, regroupent les courbes représentant, deux par deux, la variation de la contrainte de compression avec la déformation axiale des quatre horizons. On constate que l'éprouvette provenant de l'horizon E_g est plus résistante à l'écrasement et atteint la rupture pour $\sigma_c = 260$ kPa, alors que pour l'éprouvette de l'horizon E, σ_c n'atteint que 75 kPa. D'autre part, pour les horizons illuviaux homologues, on obtient une résistance à l'écrasement égale à 190 kPa pour le B_{tg} et seulement de 90 kPa pour le B_t .

Les rapports des compressions simples σ_c maximales des horizons homologues sont :

$$\sigma_c(E_g)/\sigma_c(E) \approx 3,5 \text{ et } \sigma_c(B_{tg})/\sigma_c(B_t) \approx 2.$$

Tableau 7. Taux de déformation et contrainte de rupture correspondant aux trois pressions de consolidation des horizons E, E_g , B_t et B_{tg} — *Deformation rate and failure strength corresponding to each of the three consolidation stresses, for E, E_g , B_t and B_{tg} .*

Horizon	$\sigma_3 = 200\text{kPa}$		$\sigma_3 = 100\text{kPa}$		$\sigma_3 = 50\text{kPa}$	
	q (kPa)	(%)	q (kPa)	(%)	q (kPa)	(%)
E	277	15,0	217	8,4	117	5,1
B_t	494	6,3	238	5,0	139	3,2
E_g	510	6,7	377	3,9	180	4,1
B_{tg}	514	4,0	349	1,8	171	1,3

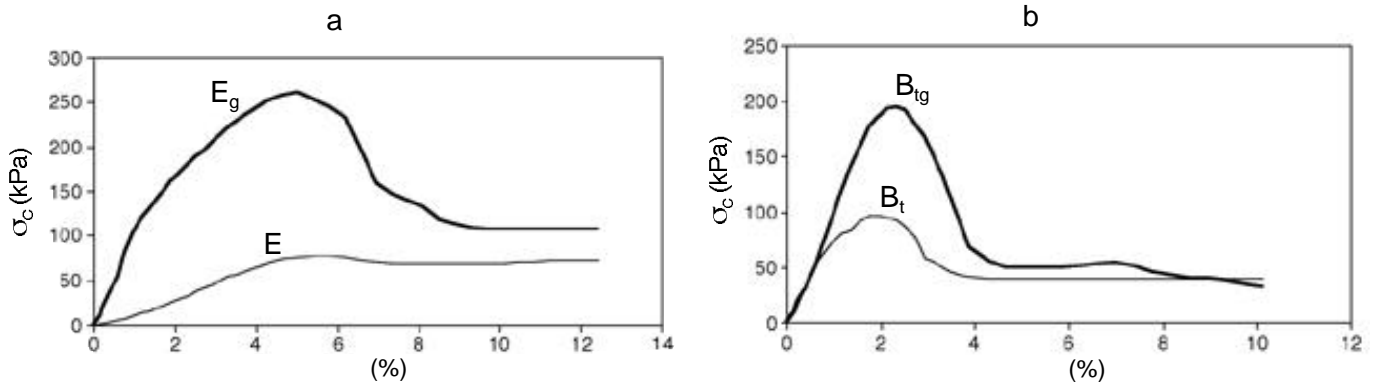


Figure 7. Compression simple des horizons E_g et E en **a** et des horizons B_{tg} et B_t en **b** — Simple compression of E_g and E in **a** and of B_{tg} and B_t in **b**.

Ceci est à mettre en rapport avec le compactage qui est plus fort en surface qu'en profondeur (**Figure 8**). En effet, dans la zone perturbée, la résistance à la compression simple diminue avec la profondeur, alors que l'évolution est inversée dans la zone témoin.

L'allure des courbes de la **figure 7a** permet également plusieurs autres constatations intéressantes. Pour l'horizon superficiel, le sol témoin présente un comportement se traduisant par une courbe $\sigma_c - \epsilon$, quasiment bi-linéaire de type "élasto-plastique", caractéristique du domaine sous-critique ou normalement consolidé. Pour E_g , la courbe présente un pic, suivi d'un radoucissement et tend, pour de grandes déformations vers une valeur résiduelle (comportement supercritique) qui vaut environ 1,6 fois la valeur de E . Ce comportement est, entre autre, caractéristique d'un effet de surconsolidation, lié au passage des engins. Au voisinage de l'origine, la pente des deux courbes est significativement différente, le module de déformation de E_g vaut environ 6 fois celui

de E , ce qui constitue une indication supplémentaire de la surconsolidation.

Pour l'horizon inférieur (**Figure 7b**) on ne peut attribuer la totalité de la différence entre les pics de B_{tg} et de B_t à la surconsolidation. En effet, contrairement à la figure 7a, on constate que les deux courbes ont même allure, se confondent au voisinage de l'origine et présentent des valeurs de contrainte résiduelle sensiblement égales. Ces constatations sont identiques à celles faites par plusieurs auteurs parmi lesquels Biarez *et al.* (1998), lors d'essais triaxiaux sur des sables et des argiles ayant subi soit une addition de "colle", soit une cimentation naturelle au CaCO_3 . Selon ces études, la différence entre les courbes B_{tg} et B_t de la figure 7b caractérise un effet de "colle" ou de "cimentation". Compte tenu des constatations déjà faites dans le paragraphe traitant les paramètres mécaniques (p. 186), cet effet pourrait être lié à la migration du fer mise en évidence par Herbauts *et al.* (1996). Lors de la prochaine campagne de prélèvement, cet aspect sera approfondi par une approche micromorphologique, des analyses d'images de lames minces et des examens au microscope électronique.

Par ailleurs, il est également intéressant de mettre l'allure des courbes de la **figure 7** en rapport avec l'indice de consistance I_c (**Tableau 3**) qui est voisin de 1 pour les horizons E_g , B_t et B_{tg} (sol consistant) et proche de 0,5 pour E (transition entre consistance molle et faible) (Verbrugge, 1998 a).

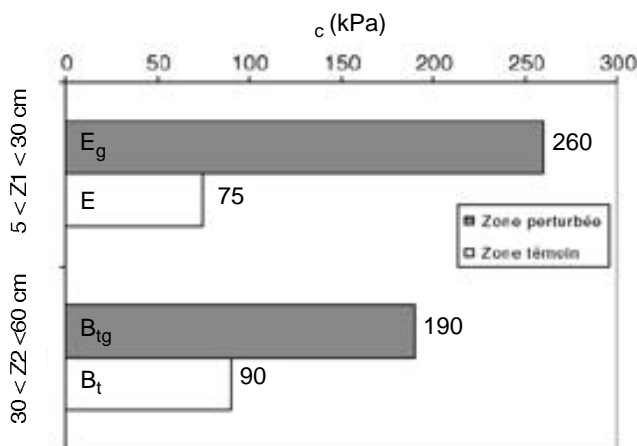


Figure 8. Variation de la résistance à la compression simple avec la profondeur et avec les horizons étudiés — Simple compression strength variation with depth and with different studied horizons.

4.5. Relation entre σ_c et la pression de contact des pneus

Compte tenu des caractéristiques et de la pression de gonflage des pneumatiques ainsi que de l'engin utilisé, l'application de la relation proposée par Dwyer (1984) donne une pression moyenne de contact $p_s = 235$ kPa. Connaissant la pression exercée en surface du sol forestier étudié, on peut, grâce aux formules de Boussinesq, déterminer les contraintes verticales correspondant

aux différentes profondeurs. Ceci est fait en assimilant la surface de contact à une aire circulaire, on obtient ainsi la courbe donnant l'évolution de la contrainte verticales avec la profondeur (**Figure 9**).

On a aussi représenté sur cette même figure, la variation de la contrainte géostatique en fonction de la profondeur, mais à une échelle triple.

Par ailleurs, si on compare les **figures 8 et 9**, on s'aperçoit que l'évolution de c en fonction de la profondeur est de type linéaire pour le profil témoin et de type 'Boussinesq' pour le profil perturbé.

5. CONCLUSIONS

Des échantillons prélevés dans les horizons de surface (horizons éluviaux E : 5–30 cm) et de moyenne profondeur (horizons B_t illuviaux : 30–60 cm) d'un sol limoneux lessivé développé sous futaie de hêtres en Forêt de Soignes ont été soumis, tant *in situ* qu'au laboratoire, à des essais géotechniques. Dans les situations affectées par ornierage, les horizons homologues sont de type E_g et B_{tg}. Le but était de déterminer dans quelle mesure les propriétés physiques et mécaniques de ce sol ainsi que son comportement sont modifiés lorsqu'il a été soumis au passage répété d'engins d'exploitation forestière lors des opérations de débardage.

Sur base des différentes mesures effectuées dans le cadre de la présente étude et précédemment (Herbauts *et al.*, 1996), on peut mettre en évidence les points suivants.

– La cohésion effective (c') et la résistance à la compression simple (c_c) du profil perturbé sont nettement supérieures à celles du profil témoin :

$$\begin{aligned} c'(B_{tg})/c'(B_t) &= 3 \\ c_c(B_{tg})/c_c(B_t) &= 2 \\ c_c(E_g)/c_c(E) &= 3,5 \end{aligned}$$

– Le poids volumique sec du profil perturbé est plus élevé que celui du profil témoin alors que son indice de vide (e) et sa porosité (n) lui sont inférieurs :

$$\begin{aligned} d(B_{tg}) &> d(B_t) > d(E_g) > d(E) \\ 16,5 &> 15,8 > 15,4 > 14,5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n(B_{tg}) &< n(B_t) < n(E_g) < n(E) \\ 36,2 &< 39,2 < 40,5 < 44,1 \text{ \%} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e(B_{tg}) &< e(B_t) < e(E_g) < e(E) \\ 57,0 &< 64,4 < 68,3 < 79,1 \text{ \%} \end{aligned}$$

– Une énergie par unité de volume plus importante est nécessaire pour compacter l'horizon E_g au même poids volumique sec que l'horizon témoin E ; par contre cette énergie est plus grande pour l'horizon B_t que pour le B_{tg}. En fait, l'évolution des optima Proctor en fonction de l'énergie est inversée pour les horizons éluviaux et illuviaux. Cette inversion pourrait être expliquée, partiellement, par une augmentation de la cohésion de l'horizon B_{tg} due à la translocation du fer des horizons éluviaux vers les horizons illuviaux.

– La diminution de la macroporosité (Herbauts *et al.*, 1996) et l'augmentation de la cohésion dans les sols compactés.

– La différence de comportement mécanique entre les horizons B_{tg} et B_t révèle l'existence d'un effet de "colle" ou de "cimentation" au niveau de B_{tg} par rapport à B_t. Ceci est à mettre en parallèle avec les migrations de fer constatées. Des investigations complémentaires sont toutefois nécessaires pour établir et étayer une relation entre ces deux constatations.

Les mesures géomécanique réalisées confirment et précisent ce qu'une analyse pédologique du même site forestier avait antérieurement mis en évidence (Herbauts *et al.*, 1996), à savoir une forte dégradation des propriétés physiques du sol dans les secteurs affectés par le passage des machines d'exploitation forestière et, en conséquence, une sévère limitation de ses capacités sylvicoles. Comme il s'agit de sols très acides et à faible activité biologique, on peut craindre que leur restauration structurale spontanée soit extrêmement lente et que les dégâts occasionnés perdurent de nombreuses années. Par ses effets négatifs sur la porosité des sols et donc leur économie en eau, le compactage d'origine anthropique accroît probablement la sensibilité de la hêtraie sonienne vis-à-vis des stress climatiques (sécheresses). La dégradation physique des sols dans ce contexte forestier constitue donc un réel problème de gestion sylvicole.

On peut espérer qu'une meilleure compréhension du processus de dégradation et de ses conséquences permettra à l'avenir d'en supprimer ou, du moins, d'en atténuer les effets négatifs.

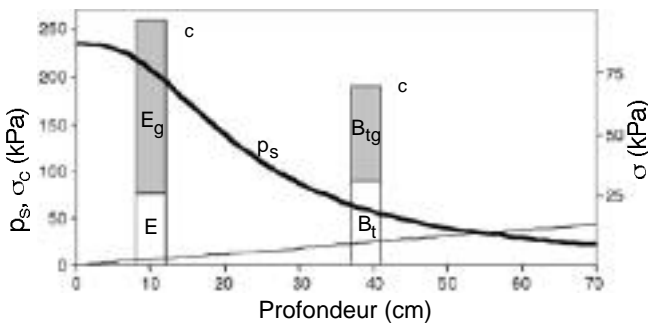


Figure 9. Évolution de la surcharge p_s et de la pression géostatique σ avec la profondeur par rapport à la résistance à la compression simple des quatre horizons — *Overload p_s and geostatic stress σ evolution with depth related to the simple compression strength of the four horizons.*

Liste des symboles et des unités

E_{CN} :	énergie de compactage pour l'essai Proctor normal (MJ/m ³)
E_{CM} :	énergie de compactage pour l'essai Proctor modifié (MJ/m ³)
I_c :	indice de consistance = $\frac{w_l - w}{I_p}$
I_p :	indice de plasticité (%) = $w_l - w_p$
c' :	cohésion effective (kPa)
e :	indice des vides (%)
n :	porosité (%)
p_s :	pression moyenne de contact du pneu (kPa)
q :	déviateur des contraintes (kPa)
q_c :	résistance en pointe statique (kPa)
q_{cc} :	résistance en pointe statique dans la zone compactée (kPa)
q_{ct} :	résistance en pointe statique dans la zone témoin (kPa)
q_{co} , q_{c1} , q_{c2} :	résistance en pointe statique d'un sol agricole pour zéro, un et deux passages de tracteur (kPa)
w :	teneur en eau pondérale (%)
w_l :	limite de liquidité (%)
w_{opt} :	teneur en eau optimale de l'essai Proctor (%)
w_p :	limite de plasticité (%)
ϵ :	déformation principale majeure axiale (%)
d :	poids volumique apparent sec (kN/m ³)
d_{max} :	poids volumique apparent sec maximal de l'essai Proctor (kN/m ³)
δ :	angle de frottement interne effectif (°)
σ :	contrainte géostatique verticale (kPa)
σ_3 :	pression de consolidation (kPa)
c :	résistance à la compression (kPa)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Monsieur Dominique Leclercq, garde forestier au Cantonnement de Bruxelles (Région de Bruxelles Capitale), pour l'aide précieuse qu'il a bien voulu apporter lors des échantillonnages sur le terrain. Nos remerciements vont aussi à Monsieur l'Ingénieur Xavier Lejeune, pour l'autorisation qu'il nous a accordée afin de mener nos investigations en Forêt de Soignes.

Bibliographie

Biarez J., Fayat T., Tailliez S., Gomes Correia A. (1998). Argiles et craies du tunnel sous la Manche, grains sans et avec colle. In Evangelista A., Picarelli L. (eds) *The*

geotechnics of hard soils – soft rocks, vol. 1. Rotterdam: Balkema, p. 437–445.

- Delecour F. (1987). Carte des sols et praticabilité des terrains forestiers en Belgique. *Pédologie* **37** (3), p. 299–320.
- Duchaufour P. (1995). *Pédologie. Sol, végétation, environnement*. 4e éd. Paris : Masson, 324 p.
- Dwyer MJ. (1984). The tractive performance of wheeled vehicles. *J. Terramech.* **21**, p. 19–34.
- Herbauts J., El Bayad J., Gruber W. (1996). Influence of logging traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soils developed on loessic loam in Middle Belgium. *For. Ecol. Manage.* **87**, p. 193–207.
- Herbauts J., El Bayad J., Gruber W. (1998). L'impact de l'exploitation forestière mécanisée sur la dégradation physique des sols : le cas des sols limoneux acides de la Forêt de Soignes (Belgique). *Rev. For. Fr.* **87**, p. 193–207.
- Le Tacon F. (1981). Écologie du Hêtre et de la Hêtraie. Caractérisation édaphique. In E. Teissier du Cros (coord.). *Le Hêtre*. Versailles : INRA, p. 77–84.
- Louis A. (1959). *Carte des Sols de la Belgique*. Planchette d'Uccle. Texte explicatif 102W. Bruxelles : IRSIA, 90 p.
- Nageleisen LM. (1993). Le point sur le dépérissement du Hêtre. In *La santé des forêts (France) en 1992*. Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. DERF. Département de la Santé des Forêts, p. 23–26.
- Nageleisen LM. (1994). Le dépérissement actuel de feuillus divers : Hêtre, Merisier, Alisier torminal, Érable sycomore, Peuplier, Châtaignier, Charme, Aulne glutineux. *Rev. For. Fr.* **XLVI** (5), p. 554–562.
- Norme Française (NFP 94-070) (Octobre 1994). Essais à l'appareil triaxial de révolution. Paris : Association Française de Normalisation (AFNOR).
- Penninckx V., Meerts P., Herbauts J., Gruber W. (1998). Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. *For. Ecol. Manage.* **113**, p. 23–33.
- Verbrugge JC. (1998a). *Mécanique des sols et fondations*. Volumes I et II, 4^e éd. Presses Universitaires de Bruxelles, 316 p.
- Verbrugge JC. (1998b). *Ouvrages en terre*. 4^e éd. Presses Universitaires de Bruxelles, 271 p.
- Wästerlund I. (1994). Environmental aspects of machine traffic. *J. Terramech.* **31**, p. 265–277.
- Wingate-Hill R. (1982). Compaction of soil by pneumatic tyres in agriculture and forestry: A bibliography. *Soil Tillage Res.* **3**, p. 99.
- Wingate-Hill R., Jakobsen BF. (1982). Increased mechanisation and soil damage in forests. A review. *N. Z. J. For. Sci.* **12**, p. 380–393.

(17 réf.)