



**HAL**  
open science

## 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).

J. Herbauts, J. El Bayad, W. Gruber

### ► To cite this version:

J. Herbauts, J. El Bayad, W. Gruber. 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).. *Revue forestière française*, 1998, 50 (2), pp.124-136. 10.4267/2042/5523 . hal-03443628

**HAL Id: hal-03443628**

**<https://hal.science/hal-03443628>**

Submitted on 23 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# 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)

---

J. HERBAUTS - J. EL BAYAD - W. GRUBER

---

Les effets préjudiciables du compactage des sols par les engins d'exploitation forestière sur la vitalité des peuplements ont été soulignés ces quinze dernières années par différents auteurs (Froehlich, 1979 ; Wingate-Hill, 1982 ; Wingate-Hill et Jakobsen, 1982 ; Delecour, 1987 ; Wästerlund, 1994). Dans l'optique du "dépérissement forestier", ils sont même considérés comme des facteurs édaphiques déclenchant le déclin des peuplements de Hêtre (Nageleisen, 1993).

Des "dépérissements" ont été signalés dès 1976 dans les futaies de Hêtre, souvent âgées, qui composent l'essentiel de la vaste forêt périurbaine de Bruxelles, la forêt de Soignes. Ils se sont accentués dans les années 1990, gagnant aussi divers peuplements de Chêne (Dulière et Malaisse, 1995). Toutefois, contrairement à cette dernière essence, chez laquelle la répartition des dommages est clairement fonction d'une composante individuelle (Vasic *et al.*, 1993), le "dépérissement" du Hêtre en forêt de Soignes paraît plus strictement lié aux conditions édaphiques. En effet, les peuplements développés sur les limons lœssiques, affectés par une hydromorphie temporaire de surface, manifestent en général une plus forte perte de vitalité que leurs homologues croissant sur limons bien drainés. Ce fait est bien connu des forestiers qui ont toujours été confrontés aux problèmes que soulève, en forêt de Soignes, la sylviculture du Hêtre sur les sols limoneux à forte tendance hydromorphe. Les stations naturelles où se développent des sols lessivés à pseudogley n'occupent toutefois que des superficies limitées dans ce massif forestier et les problèmes sylvicoles qui y sont liés pourraient donc être considérés comme secondaires s'il ne s'avérait que l'exploitation forestière contribue très probablement à leur extension. En effet, l'accroissement de la taille, de la puissance et de la charge des engins utilisés pour assurer la vidange des coupes et le débardage des grumes a pour conséquence de soumettre le sol forestier à des contraintes mécaniques extrêmement sévères, entraînant un compactage des horizons de surface, une augmentation de leur densité apparente et une réduction de leur porosité (Dickerson, 1976 ; Foth, 1990). Dans les zones compactées se développent en conséquence des profils de sol présentant des caractères similaires à ceux des stations naturellement plus hydromorphes.

Cette dégradation structurale a un effet dommageable sur les systèmes racinaires des ligneux et pourrait être à l'origine d'une réduction de leur pouvoir d'absorption en eau et en éléments nutritifs (Froehlich, 1979 ; Soane, 1980). Il n'est donc pas exclu que le compactage du sol puisse aggraver des stress hydriques ou d'éventuelles déficiences en éléments nutritifs, en d'autres termes contribuer au phénomène de "dépérissement", qu'il soit d'origine climatique ou nutritionnelle. En outre, dans ces sols à faible activité biologique, la restauration structurale spontanée est extrêmement lente et les dégâts qu'y occasionnent les engins de débardage perdurent pendant de nombreuses années : les superficies occupées par des sols dégradés ne cessent de s'accroître.

Le problème du compactage des sols par les engins forestiers est donc apparu comme particulièrement préoccupant en forêt de Soignes, et son incidence sur la vitalité des peuplements ne doit pas être écartée ou sous-estimée. C'est pour cette raison que la modification de diverses propriétés physiques des sols (densité apparente, spectre de porosité) induite par l'exploitation forestière, ainsi que ses conséquences sur l'économie en eau et le développement de caractères hydro-morphes dans les profils, ont été étudiées par des mesures comparatives entre zones témoins, non soumises au compactage, et secteurs limitrophes, dégradés par orniérage.

### CONDITIONS DE MILIEU ET ENVIRONNEMENT FORESTIER

La forêt de Soignes constitue un vaste massif forestier d'environ 4 400 hectares, situé à l'est et au sud de l'agglomération bruxelloise. Elle occupe un plateau limoneux à une altitude moyenne de 100 m. Le climat est du type tempéré atlantique, avec une température moyenne annuelle de 9,4 °C et 780 mm de précipitations annuelles. Une futaie équienne de Hêtre couvre 80 % de la superficie boisée, alors que les chênaies et les plantations de résineux n'en occupent respectivement que 7 et 8 %. Plus de la moitié du massif forestier est constituée de peuplements âgés de plus de 100 ans ; parmi ceux-ci, 50 % ont plus de 150 ans. La plupart des associations forestières de Soignes sont indicatrices de sols acides à humus de type mull oligotrophe, moder ou dysmoder : hêtraie à *Millium effusum*, hêtraie-chênaie à *Pteridium aquilinum*, hêtraie à *Deschampsia flexuosa* et *Luzula sylvatica*, hêtraie à *Leucobryum glaucum*.

### LES TYPES DE SOLS ET LEUR ÉVOLUTION DANS LE CONTEXTE LOCAL

La grande majorité des peuplements ligneux de la forêt de Soignes se développent sur des limons lœssiques profondément acidifiés et désaturés, reposant, entre 4 et 10 m de profondeur selon les conditions topographiques, sur des sédiments tertiaires (sables, argiles et grès calcaires) ; le lœss originel, carbonaté (il contient un peu moins de 10 % de  $\text{CaCO}_3$ ), n'est généralement atteint par sondage qu'au-delà de 3 mètres de profondeur. Ces matériaux limoneux donnent naissance à des sols lessivés acides, caractérisés par des humus à faible ou très faible activité biologique et à statut nutritionnel souvent critique (Vasic *et al.*, 1993), tout particulièrement sous les vieux peuplements équiennes de Hêtre. Leur granulométrie est dominée par la fraction limoneuse : plus de 70 % des particules sont comprises entre 2 et 50  $\mu\text{m}$ . Le quartz y est le minéral largement majoritaire (80 %) et la réserve en minéraux altérables est faible, avec seulement en moyenne 7 % de ferromagnésiens, 13 % de minéraux micacés, 5 % d'orthose et moins de 6 % de plagioclases.

La discontinuité texturale qui caractérise ces sols lessivés apparaît vers une trentaine de cm de profondeur. Elle sépare un compartiment éluvial, appauvri en argile ( $\pm 10$  % de particules  $< 2 \mu\text{m}$  dans les horizons E), très acide (pH-eau compris entre 3,5 et 4,5) et un compartiment illuvial, enrichi en particules fines ( $\pm 20$  % d'argile dans les horizons B<sub>1</sub>) et dont le pH est un peu moins acide (4,5 - 4,9). Les horizons éluviaux sont en outre influencés par des composés organiques issus des

horizons humifères, particulièrement sous les humus de type dysmoder. À cette discontinuité texturale correspond une discontinuité structurale qui se marque par une augmentation significative des densités apparentes dans les niveaux illuviés (1,3 kg/dm<sup>3</sup> dans les horizons E contre 1,5 kg/dm<sup>3</sup> dans les horizons B<sub>t</sub>) et donc une diminution des porosités totales (51 % en E contre 42 % en B<sub>t</sub>). Le drainage de ces sols peut dès lors être entravé et une tendance à l'hydromorphie secondaire par formation d'une nappe perchée temporaire au sommet du B<sub>t</sub> est souvent perceptible ("pseudogleyification"). Sur la carte des sols de Belgique, ces sols sont d'ailleurs rattachés aux séries limoneuses à horizon « *B textural tacheté* » ou « *fortement tacheté* », ou même aux sols limoneux « *faiblement ou modérément gleyifiés à horizon B textural fortement tacheté* » (Louis, 1959).

L'ensemble de ces propriétés rendent ces sols lessivés acides particulièrement sensibles à la "dégradation", tant par podzolisation que par hydromorphie (Duchaufour, 1995). Une "dégradation" des sols limoneux de la forêt de Soignes a d'ailleurs été signalée dès les années cinquante (Galoux, 1953 ; Dudal, 1953 ; Louis, 1959). Elle était interprétée comme un processus de podzolisation progressant dans l'horizon éluviaire du sol lessivé des vieilles hêtraies. Les termes de "néopodzol", "podzol secondaire" ou "micropodzol" ont tour à tour été utilisés pour désigner ce processus de "dégradation". Mais l'hypothèse d'une dégradation hydromorphe liée à la présence d'un horizon compacté, d'origine périglaciaire, dans la zone de transition entre l'horizon E et le B<sub>t</sub>, a également été émise par Langohr et Vermeire en 1982.

Des données récentes, basées essentiellement sur la distribution des formes du fer et de l'aluminium dans différents types de profils limoneux en forêt de Soignes, ont permis de montrer qu'effectivement une double tendance évolutive est décelable dans les horizons de surface des sols lessivés soniens : podzolisation superficielle et "pseudogleyification" (El Bayad, 1996). Dans les vieilles futaies équiennes de Hêtre en position de plateau, ces deux processus coexistent fréquemment. La micropodzolisation a bien entendu tendance à se renforcer et à s'étendre spatialement lorsque les limons sont contaminés par les sables issus du substratum tertiaire, mais, sur limons purs, il se confirme que c'est essentiellement une hydromorphie temporaire de surface qui est à l'origine d'une importante redistribution du fer dans les horizons supérieurs des sols "dégradés".

L'extension spatiale actuelle en forêt de Soignes des sols limoneux affectés par un processus d'hydromorphie de surface est loin d'être négligeable : d'après les mesures de terrain réalisées en hêtraie, une hydromorphie plus ou moins intense couvre en moyenne 20 % de la superficie parcellaire et peut atteindre 40 % dans les secteurs les plus dégradés (Herbauts *et al.*, 1996). Il semble par ailleurs que l'extension des processus hydromorphes doive être mise en relation avec l'exploitation mécanisée de ces peuplements forestiers. En effet, l'utilisation des engins de débardage constitue une des causes principales de la dégradation des sols forestiers par orniérage et compactage (Rotaru, 1985) et la texture limoneuse, la forte acidité et la faible activité biologique des sols lessivés de Soignes les rendent particulièrement sensibles à ces processus de dégradation physique. La carte de praticabilité des sols forestiers établie par Delecour en 1987 leur impose d'ailleurs des "limitations sérieuses".

## SITES, MATÉRIEL ET MÉTHODES

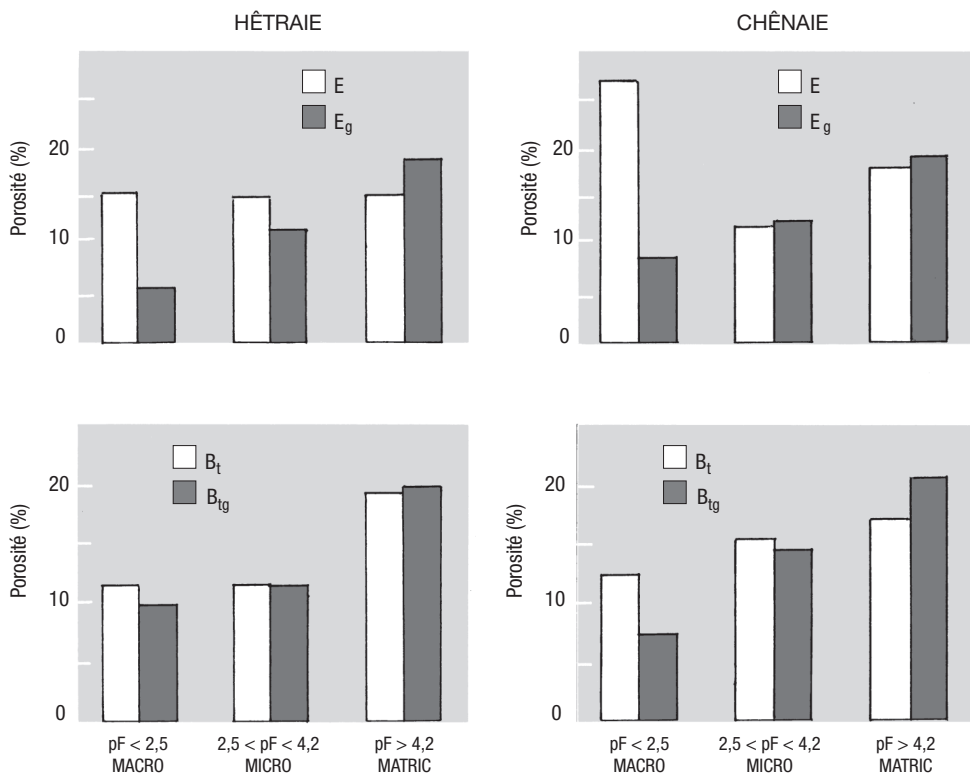
Deux sites principaux ont été étudiés : une futaie équienne de Hêtre, plantée en 1812, et une futaie à dominance de Chêne pédonculé, datant de 1815. Ces deux peuplements croissent sur des sols lessivés acides à dysmoder (hêtraie) ou moder (chênaie) et occupent un même plateau limoneux. Le traitement sylvicole appliqué en forêt de Soignes aux peuplements arrivés à maturité, c'est-à-dire ceux qui sont âgés de 130 à 140 ans, est une méthode par coupes progressives à caractère jardinatoire (Galoux, 1959 ; Liénard, 1975). Les coupes successives s'effectuent avec une rotation de 8 ans, ce qui est le cas dans la hêtraie et la chênaie étudiées. Dans la hêtraie, une machine de type

“Timberjack” (9,6 tonnes, 130 CV) a réalisé la vidange de nombreux chablis en 1991 (c’est-à-dire 5 ans après un passage en coupe normale) et les houppiers ont été exploités par un porteur “Iglan” (8 tonnes, 100 CV) ; d’assez vastes superficies de sol ont donc été affectées par le passage de ces engins (40 % de la superficie parcellaire selon nos mesures). Dans la chênaie, la vidange d’une coupe normale, effectuée en 1995 par une machine de type “Agris” (8 tonnes, 100 CV), a occasionné des dégâts plus limités (zones d’orniérage plus localisées). La dégradation des sols était traduite dans les deux stations par la formation, durant la période hivernale, de nappes perchées temporaires dans les zones compactées et orniérées et, au cours de la période de végétation, par le développement localement vigoureux, dans les zones fortement dégradées de la hêtraie, d’espèces indicatrices d’un engorgement temporaire des profils : *Polygonum hydropiper* L., *Carex remota* Just. ex L. et *Juncus effusus* L. (Dulière *et al.*, 1995).

La morphologie des profils dans les zones parcourues par les engins de débardage a été modifiée par rapport au sol lessivé des zones témoins, particulièrement dans la hêtraie. Les profils des zones compactées sont caractérisés par un blanchiment plus ou moins accentué et une dégradation structurale de l’horizon éluvial, c’est-à-dire *grosso modo* des 30 cm supérieurs des profils. Ce blanchiment s’accompagne d’une forte ségrégation du fer (taches et concrétions) à la base de l’horizon E et au sommet du B textural, signes tangibles d’une augmentation des conditions hydromorphes dans les profils dégradés. L’horizon E des sols lessivés témoins est de couleur brune (brun très pâle en hêtraie) et est assez friable, particulièrement en chênaie où la macroporosité est bien développée (figure 1, p. 128) ; cet horizon devient extrêmement compact et cohérent dans les zones orniérées et les couleurs évoluent vers le “gris mastic” (horizon E<sub>g</sub>). En parallèle, une structure lamellaire ou, plus fréquemment encore, massive, s’y généralise. À la base de cet horizon E<sub>g</sub> se développent de nombreuses taches et concrétions ferro-manganiques, symptomatiques d’un drainage déficient et de la présence d’une nappe perchée à éclipse. Le sommet de l’horizon B<sub>t</sub>, cohérent et à structure polyédrique anguleuse dans les profils témoins, voit également se développer des caractères liés à une dégradation hydromorphe dans les secteurs orniérés, à savoir une forte ségrégation du fer aboutissant à la formation de concrétions ferro-manganiques. La couleur orange de certaines d’entre elles est probablement due à la formation d’un hydroxyde de fer typique des sols hydromorphes “pseudogleyifiés”, la lépidocrocite. Quant aux horizons humifères des sols orniérés, ils peuvent présenter localement un développement plus important (1 dm ou même plus) que leurs homologues des secteurs témoins, très organiques mais peu épais (en moyenne, quelques cm seulement).

Dans chacune des deux parcelles (hêtraie et chênaie), des échantillonnages de sol ont été réalisés dans les zones non perturbées et les zones orniérées avoisinantes, correspondant à des layons primaires (hêtraie) et secondaires (chêne) de débusquage (selon la terminologie de Delecour, 1987). Le choix des points d’échantillonnage sur le terrain a été guidé par des indices facilement observables et, dans la hêtraie, présents de façon concomitante : empreintes de compaction ou d’ornières et composition du tapis herbacé, c’est-à-dire présence ou absence des espèces sociales (précédemment citées) indicatrices de sols à régime hydrique alternatif. Dans les secteurs parcourus par les engins de débardage, l’échantillonnage des sols n’a pas été réalisé au fond des ornières principales elles-mêmes, mais sur toute la surface perturbée par le passage de ces engins, englobant donc non seulement des zones d’orniérage peu profondes, mais aussi des zones “scalpées” (Rotaru, 1985) ou même tout simplement compactées. Les prélèvements ont été effectués trois ans après l’intervention sylvicole dans la hêtraie, quelques mois seulement après la coupe d’éclaircie dans la chênaie. Les mesures ont porté principalement sur la densité apparente (méthode du cylindre) des horizons éluviaux (E, E<sub>g</sub>) et illuviaux (B<sub>t</sub>, B<sub>tg</sub>), leur spectre de porosité, leur économie en eau (courbes de pF), leur potentiel rédox (Eh), la détermination des formes du fer et de l’aluminium (fer “échangeable” aisément réductible, fer et aluminium organo-complexés, oxyhydroxydes amorphes et cristallisés) et la dispersibilité à l’eau des argiles. Les méthodes physico-chimiques utilisées ont été décrites précédemment (Herbauts *et al.*, 1996) ; la dispersibilité des argiles a été mesurée sur sol fraîchement prélevé selon un protocole semblable à ceux décrits par De Coninck *et al.* (1976) et Gury (1990).

Figure 1 **DISTRIBUTION DES TROIS PRINCIPALES CLASSES DE POROSITÉ (macroporosité, microporosité et porosité matricielle) dans les horizons éluviaux et illuviaux de sols témoins (E, B<sub>t</sub> : moyenne de 2 mesures par horizon) et ornierés (E<sub>g</sub>, B<sub>tg</sub> : moyenne de 4 mesures par horizon), en hêtraie et en chênaie.**  
Les porosités sont exprimées en % du volume total du sol.



## CONSÉQUENCES DU COMPACTAGE SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SOL

Les sols lessivés de la forêt de Soignes présentent, en dehors de tout phénomène récent de compactage, une densité apparente des horizons E généralement comprise entre 1,2 et 1,3 kg/dm<sup>3</sup>, ce qui correspond à des porosités totales de l'ordre de 55 à 51 %. Pour rappel, dans les horizons B<sub>t</sub> sous-jacents, les densités apparentes sont voisines de 1,5 kg/dm<sup>3</sup>, soit une porosité de quelque 43 %. Les contraintes mécaniques auxquelles ces sols limoneux acides sont soumis du fait de l'exploitation forestière entraînent un tassement important des 30 cm supérieurs des profils, accompagné d'une augmentation très significative de leur densité apparente (tableau I, p. 129). En conséquence, la porosité totale descend à 43 % dans la chênaie et 39 % dans la hêtraie. Dans les zones dégradées, la perte de porosité totale par rapport à l'état originel est donc au minimum de 20 %. À l'opposé, dans les horizons illuviaux sous-jacents, cette perte est beaucoup plus limitée ou non significative.

La porosité totale n'a toutefois pas de sens biologique par elle-même, car seuls les vides d'une dimension suffisante permettent drainage et aération ; d'où la nécessité de déterminer les modifications induites par le compactage sur la répartition des catégories de pores et tout particulièrement

son incidence sur la macroporosité. Des courbes pF ont été réalisées sur des échantillons prélevés dans les horizons E, E<sub>g</sub>, B<sub>t</sub> et B<sub>tg</sub> en hêtraie et en chênaie (deux mesures par horizon en zone témoin, quatre en zone dégradée, plus hétérogène). Elles ont permis de déterminer les modifications qualitatives et quantitatives subies par l'espace poral du sol.

Tableau I

**Densité apparente et porosité totale d'horizons éluviaux et illuviaux, prélevés dans des secteurs non perturbés (E, B<sub>t</sub>) ou ornierés (E<sub>g</sub>, B<sub>tg</sub>) de deux peuplements forestiers**

Valeurs moyennes affectées de leur déviation standard et test *t* non païré de comparaison de moyennes (n = 30 ; \*\*\* P < 0,001 ; \*\* P < 0,01 ; \* P < 0,05)

	Horizon	Profondeur (cm)	Densité apparente (kg/dm <sup>3</sup> )	Porosité totale (%)
Hêtraie (n = 30)	Sol témoin			
	E	10-30	1,31 ± 0,10	50,6 ± 3,8
	B <sub>t</sub>	30-50	1,54 ± 0,06	42,1 ± 3,8
	Sol ornieré			
Chênaie (n = 30)	E <sub>g</sub>	10-30	1,62 ± 0,07	38,9 ± 2,8
	B <sub>tg</sub>	30-50	1,54 ± 0,05	41,8 ± 1,8
	Sol témoin			
	E	10-30	1,20 ± 0,08	54,8 ± 2,9
Chênaie (n = 30)	B <sub>t</sub>	30-50	1,49 ± 0,07	43,9 ± 2,5
	Sol ornieré			
	E <sub>g</sub>	10-30	1,50 ± 0,13	43,4 ± 5,0
	B <sub>tg</sub>	30-50	1,57 ± 0,07	40,7 ± 2,7

Test-t	Densité apparente	
	Hêtraie	Chênaie
E vs E <sub>g</sub>	- 13,61 ***	- 10,88 ***
B <sub>t</sub> vs B <sub>tg</sub>	NS	- 4,81 ***

Une vue d'ensemble de l'évolution des trois composantes principales de la porosité du sol, macroporosité, microporosité et porosité matricielle, est reprise à la figure 1, p. 128. On rappellera qu'à chaque type de porosité correspond une fonction spécifique : la macroporosité (ou porosité à l'air) assure la circulation de l'air et de l'eau gravitaire (pores de transmission), la microporosité assure le stockage de l'eau disponible pour les végétaux (eau utile : pores de réserve) et la porosité matricielle retient de l'eau considérée comme non utilisable par les végétaux (pores résiduels). On convient habituellement qu'une bonne diffusion de l'air dans le sol requiert une macroporosité d'au moins 10 % du volume total du sol et même dans la plupart des cas de 20 à 30 % ; une macroporosité de 5 % est considérée comme un seuil critique en dessous duquel l'aération du sol est insuffisante, source d'anaérobiose, et compromet la survie des systèmes racinaires (Mathieu *et al.*, 1981 ; Duchaufour, 1995).

Comme le montrent les données de la figure 1, la réduction de la porosité totale est la conséquence de l'occlusion des macropores : la perte de macroporosité en E<sub>g</sub> par rapport à l'horizon E témoin est considérable : elle est de 63 % en hêtraie et de 67 % en chênaie. On constate aussi qu'en dépit

d'une macroporosité largement plus élevée avant compactage dans le compartiment supérieur du sol de la chênaie (27 % au lieu de 15 % en hêtraie), les spectres de porosité sont très semblables dans les horizons  $E_g$  dégradés des deux peuplements. Cette uniformisation consécutive au compactage est également observable dans les horizons illuviaux au sein desquels les pertes en  $B_{tg}$  sont respectivement de 14 % et 40 % de la porosité originelle à l'air du  $B_t$  témoin. Le passage des engins forestiers fait donc disparaître plus de la moitié de la macroporosité dans les 30 cm supérieurs de ces sols limoneux, avec, pour conséquence, dans tous les horizons dégradés par orniérage ( $E_g$ , mais aussi  $B_{tg}$ ), une chute de la macroporosité en-dessous de 10 % du volume total du sol, compromettant la diffusion de l'air et la circulation de l'eau gravitaire. Avec une macroporosité abaissée à 5,7 %, le seuil critique pour la survie des systèmes racinaires (5 %) est presque atteint dans l'horizon  $E_g$  fortement dégradé de la hêtraie. Même si les valeurs obtenues ne sont qu'indicatives (un échantillonnage plus important serait nécessaire pour pouvoir tester le niveau de signification des différences enregistrées), on ne peut que s'inquiéter des conséquences sylvicoles d'une extension des zones compactées, compte tenu des fortes pertes de macroporosité révélées par nos mesures.

On constate également que la perte importante de la porosité à l'air suite au compactage ne se fait jamais au bénéfice de la microporosité qui, dans la plupart des cas, n'évolue guère. Toutefois, dans l'horizon  $E_g$  dégradé de la hêtraie, la perte de macroporosité s'accompagne d'une diminution sensible de la microporosité : 22 % des pores de réserve originels y sont perdus par compactage. En réalité, lorsqu'il y a transfert de porosité, c'est plutôt vers la porosité matricielle que ce transfert se produit : c'est le cas dans les horizons compactés  $E_g$  de la hêtraie et  $B_{tg}$  de la chênaie : la porosité résiduelle, "morte" au point de vue biologique, s'y accroît respectivement de 24 et 21 %.

Ces importantes modifications de la porosité du sol ont bien entendu des effets défavorables sur l'économie en eau du sol, non seulement parce qu'elles entravent à court terme l'évacuation de l'eau gravitaire et sont donc à l'origine de la formation de nappes perchées temporaires dont les conséquences sont évoquées au paragraphe suivant, mais aussi parce qu'elles modifient les caractéristiques hydriques d'horizons qui assurent une part importante de l'alimentation en eau des peuplements. C'est le cas en hêtraie, où la résorption des micropores dans les horizons éluviaux compactés détermine une diminution de leur réserve utile en eau utile : celle-ci est de 45 mm dans les 30 cm supérieurs du sol témoin et s'abaisse à 35 mm dans le sol orniéré. Comme indiqué ci-dessus, la teneur en eau non absorbable par les racines, liée à l'augmentation de la porosité matricielle de ces mêmes horizons, s'y accroît de 24 %. Par contre, dans le cas présent, les caractéristiques hydriques des horizons illuviaux de la hêtraie ne sont pas modifiées par le compactage. En chênaie, c'est au contraire l'horizon compacté  $B_{tg}$  qui voit s'accroître de 21 % le stock d'eau confiné dans les pores résiduels.

## CONSÉQUENCES DU COMPACTAGE SUR L'ÉVOLUTION DES FORMES DU FER DANS LE SOL

La diminution de la macroporosité induite par le compactage détermine la formation d'une nappe temporaire qui s'installe dans la partie supérieure des profils pendant environ 4 mois par an (de décembre à mars). Cette nappe n'affleure que très fugacement à la surface du sol et uniquement dans les secteurs les plus dégradés ; des mesures piézométriques ont montré que, perchée sur l'horizon  $B_{tg}$ , elle oscille généralement entre 40 et 10 cm de profondeur. Le potentiel rédox (Eh) moyen des horizons éluviaux traduit le caractère réducteur de cette nappe : il s'abaisse de 450 mV dans les sols témoins à 263 mV dans les secteurs dégradés. Cette chute de Eh, couplée à des valeurs acides de pH ( $pH < 5$ ), est à l'origine d'une importante déferrification des horizons éluviaux par réduction du fer, suivie de la dissolution partielle des oxyhydroxydes (goethite) ou même des minéraux ferromagnésiens (Herbauts *et al.*, 1996). La perte moyenne en fer libre ( $Fe_{cid}$ ) par rapport à l'état initial est encore modérée (17 %) — mais néanmoins déjà significative — dans les secteurs faible-



Tableau II

**Formes du fer ( $Fe_{cid}$  = oxyhydroxydes "libres" ;  $Fe_{EDTA}$  = fer organo-complexé),  
rapport Fe/Al des formes organo-complexées ( $Fe_{EDTA}/Al_{EDTA}$ )  
et indices d'entraînement du fer "libre" ( $B_t/E$  et  $B_{tg}/E_g$ )  
déterminés sur les horizons éluviaux et illuviaux de sols témoins (E,  $B_t$ ) et ornierés ( $E_g$ ,  $B_{tg}$ )  
en hêtraie et en chênaie**  
Test *t* non païré de comparaison de moyennes (n = 10 ; \*\*\* P < 0,001 ; \*\* P < 0,01 ; \* P < 0,05).

	Horizons				Test <i>t</i>		Rapports	
	E	$E_g$	$B_t$	$B_{tg}$	E vs $E_g$	$B_t$ vs $B_{tg}$	$B_t/E$	$B_{tg}/E_g$
<b>Hêtraie</b>								
$Fe_{cid}$ (g/kg) . . . . .	4,88	1,97	6,37	10,45	11,230***	- 4,710***	1,3	5,3
$Fe_{EDTA}/Fe_{cid}$ (%) . . . . .	7,50	27,80	1,70	5,30	- 6,657***	- 6,591***		
$Fe_{EDTA}/Al_{EDTA}$ . . . . .	0,90	1,50	0,30	16,00	- 3,741**	- 11,069***		
<b>Chênaie</b>								
$Fe_{cid}$ (g/kg) . . . . .	6,14	5,07	8,51	9,83	3,780**	NS	1,4	2,0
$Fe_{EDTA}/Fe_{cid}$ (%) . . . . .	6,40	13,10	1,90	6,40	- 3,010*	- 10,557***		
$Fe_{EDTA}/Al_{EDTA}$ . . . . .	0,86	1,58	0,27	0,95	- 3,594**	- 6,517**		

ment ornierés de la chênaie ; elle atteint 60 % dans les zones les plus dégradées de la hêtraie (tableau II, ci-dessus). Cette différence s'explique aussi par le fait qu'en hêtraie, les mesures ont été réalisées trois années après l'intervention sylvicole, permettant à la nappe perchée temporaire d'exercer ses effets dans les zones ornierées pendant un laps de temps beaucoup plus long qu'en chênaie où les prélèvements de sol ont été réalisés quelques mois seulement après exploitation du peuplement. Quoi qu'il en soit, les conséquences édaphiques de l'ornierage sont similaires dans les deux situations et ne se différencient en réalité que par leur intensité.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le processus de déferrification se manifeste, au plan morphologique, par un fort blanchiment des horizons supérieurs des profils, avec apparition de taches de couleur rouille et de petites concrétions ferrugineuses, surtout à la base de l'horizon  $E_g$  et au contact du B textural. Ces phénomènes sont peu réversibles (sauf important travail du sol) et non seulement augmentent dans les 30 cm supérieurs des profils l'instabilité structurale de ces matériaux limoneux, mais déclenchent aussi, comme nous le verrons au paragraphe suivant, la dispersion de la phase argileuse.

Le fer est éliminé des horizons de surface pendant les phases d'engorgement qui affectent de façon plus ou moins prolongée les sols compactés. Des mesures répétées dans le temps et réalisées dans les horizons éluviaux fortement dégradés de la hêtraie ont permis de montrer que le fer y est libéré sous sa forme ionique ferreuse ( $Fe^{2+}$  facilement réductible ou "échangeable"), entraînant une augmentation très hautement significative de l'indice de réduction du fer dans les sols ornierés (rapport entre le fer échangeable et le fer des oxyhydroxydes : 5,9 % en E au lieu de 28,4 % en  $E_g$  ;  $t = - 7,594$ ,  $P < 0,001$ ) (Herbauts *et al.*, 1996). Le fer réduit est ensuite mobilisé vers les horizons sous-jacents, probablement pour l'essentiel sous forme chélatée. On constate en effet, tant en chênaie qu'en hêtraie, une augmentation significative des taux de fer organo-complexé ( $Fe_{EDTA}/Fe_{cid}$ ) dans les horizons  $E_g$  et même dans les horizons  $B_{tg}$  sous-jacents (tableau II, ci-dessus) qui constituent le niveau d'accueil des chélates de fer à l'issue de leur translocation. Ils y évoluent par formation d'oxyhydroxydes amorphes ou cristallisés, à l'origine des taches et des concrétions. L'augmentation des indices d'entraînement du fer (rapports des teneurs en fer des oxyhydroxydes entre horizons illuviaux et éluviaux : tableau II) traduit bien l'ensemble de ces processus (illustrés

pour la hêtraie à la figure 2, ci-dessous). Il est intéressant de noter à ce propos que l'indice d'entraînement moyen du fer mesuré dans les sols dégradés par orniérage en hêtraie ( $B_{tg}/E_g = 5,3$ ) est proche de celui des véritables sols lessivés à pseudogley ( $B_{tg}/E_g = 5,6$ ) dont les stations naturelles sont très localisées en forêt de Soignes... et reconnues comme très défavorables à la sylviculture du Hêtre.

Des analyses des diverses formes de l'aluminium, il ressort que ni les teneurs en aluminium organo-complexé, ni la proportion de cette forme d'aluminium par rapport à l'aluminium libre ( $Al_{EDTA}/Al_{cid}$ ) ne sont influencées de façon significative par les processus hydromorphes, que ce soit dans les horizons  $E_g$  ou  $B_{tg}$ . Seule la chélation du fer est dans le cas présent stimulée par l'ambiance réductrice occasionnée par une forte réduction de la porosité à l'air. Cette divergence dans les comportements du fer et de l'aluminium est clairement mise en évidence par l'augmentation toujours très significative du rapport Fe/Al des complexes organiques dans les paires d'horizons homologues (E et  $E_g$  ;  $B_t$  et  $B_{tg}$  : tableau II, p. 131).

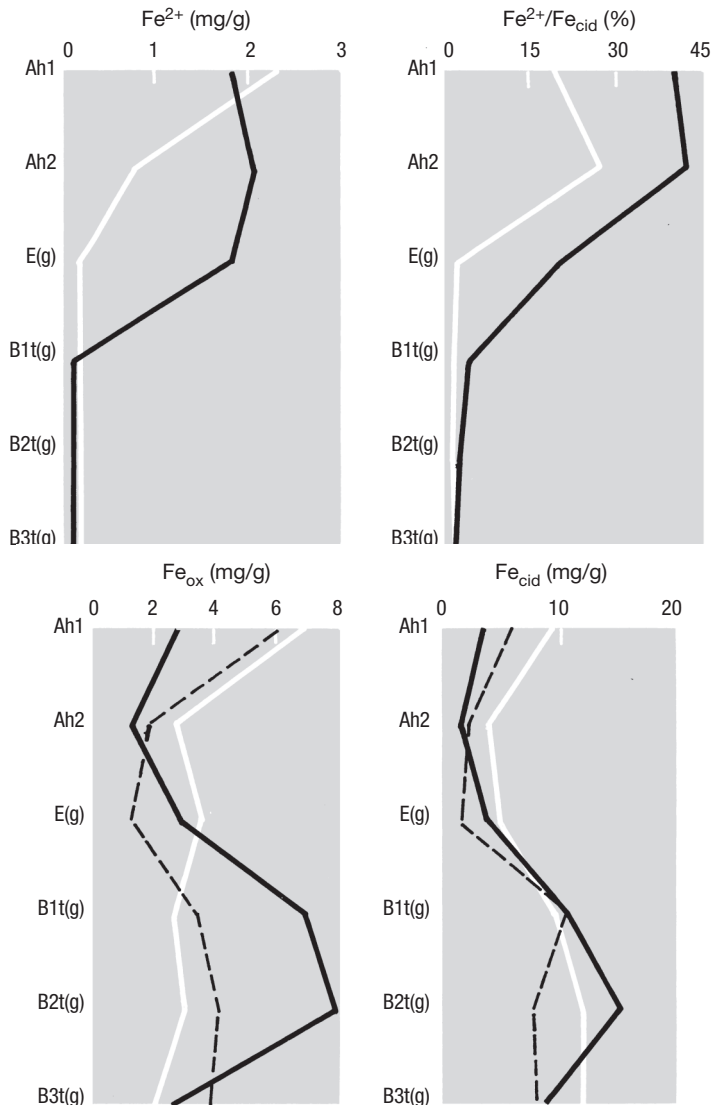


Figure 2  
**COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION VERTICALE DES FORMES DU FER au sein d'un profil témoin (trait blanc continu) et d'un profil influencé par orniérage (trait noir continu) dans un peuplement de Hêtre**  
 $Fe^{2+}$  = fer "échangeable" facilement réductible  
 $Fe_{cid}$  = fer "libre"  
 $Fe^{2+}/Fe_{cid}$  = indice de réduction du fer  
 $Fe_{ox}$  = fer amorphe  
 La distribution des formes libres et amorphes du fer dans un sol lessivé à pseudogley est donnée à titre de comparaison (trait noir tireté).



◀ Photo 1 Hêtraie à *Deschampsia flexuosa*, *Dryopteris dilatata* et *Dryopteris carthusiana* : secteur témoin, au sol non compacté lors des opérations de débardage

▼ Photo 2 Secteur parcouru par un engin de débardage, dans le même peuplement. Zones d'orniérage envahies par des espèces indicatrices d'un engorgement temporaire des profils : à l'avant-plan, population de *Polygonum hydropiper* colonisant un orniérage récent ; au second plan, dans des secteurs orniérés plus anciens, dominance de *Carex remota* et de *Juncus effusus*



▼ Photo 3 Secteur orniéré et compacté en hêtraie, avec développement de *Polygonum hydropiper*, épousant les traces laissées par les engins de débardage ; le profil de sol illustré à la photo 4 y a été réalisé

Photo 4 Coupe verticale dans un sol compacté en hêtraie. Le profil est perpendiculaire à l'axe du layon de débardage ; on distingue nettement la zone grise superficielle déferrifiée (horizon E<sub>0</sub>) ainsi que les taches et concrétions ferro-manganiques qui se sont formées à la base de l'horizon éluvial et au sommet du B textural (horizon B<sub>tg</sub>), vers 30 cm de profondeur



Photos J. HERBAUTS

### CONSÉQUENCES DU COMPACTAGE SUR LA STABILITÉ DE LA PHASE ARGILEUSE

Dans les sols témoins, des tests de dispersion à l'eau ont permis de montrer que la dispersibilité de la phase argileuse est nulle dans les horizons illuviaux et très faible dans les horizons éluviaux, avec des taux de dispersion toujours inférieurs à 10 % (figure 3, ci-dessous). La mobilité actuelle des argiles dans les sols lessivés non perturbés par le passage d'engins d'exploitation forestière est donc quasi nulle. À l'opposé, dans les sols ornierés, la rupture du "pont" argile-fer, provoquée par la déferrification des horizons supérieurs, augmente de façon très importante les taux de dispersion des argiles dans les horizons éluviaux (figure 3).

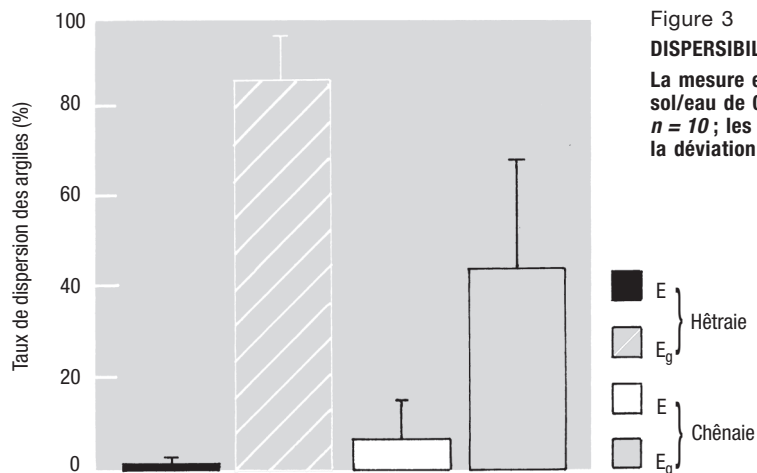


Figure 3  
**DISPERSIBILITÉ DES ARGILES DANS L'EAU**  
La mesure est effectuée pour un rapport sol/eau de 0,2 ;  
 $n = 10$  ; les barrettes représentent la déviation standard.

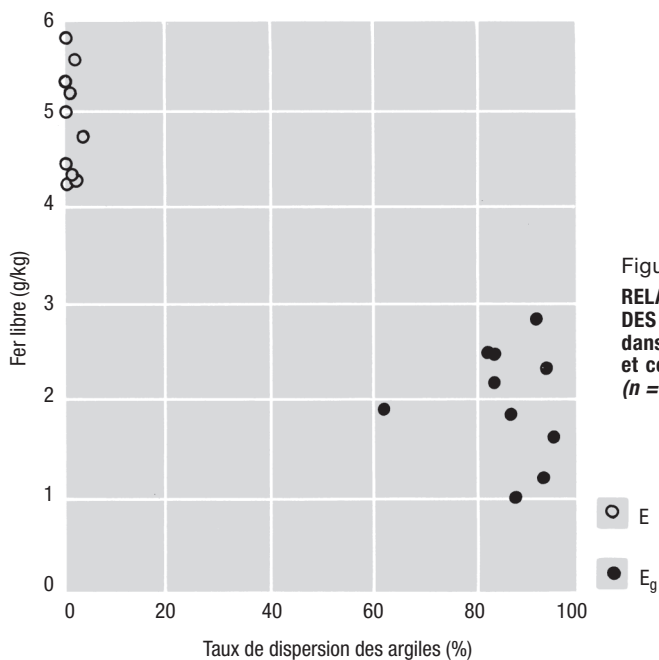


Figure 4  
**RELATION ENTRE TAUX DE DISPERSION DES ARGILES ET TENEUR EN FER "LIBRE"**  
dans les horizons éluviaux témoins (E) et compactés (E<sub>g</sub>) du sol de la hêtre (n = 20)

En chênaie, la dispersibilité à l'eau des argiles passe de 7 % dans le sol témoin à 44 % dans les horizons E<sub>g</sub> compactés ; en hêtraie, où l'hydromorphie a pu s'exercer pendant une période plus longue et assurer une déferrification plus intense (pour rappel, trois années séparent l'intervention sylvicole du prélèvement des sols), les taux de dispersion s'élèvent de 2 à 87 %. Comme le montre la figure 4 (p. 134), une relation significative lie les teneurs en fer "libre" aux taux de dispersion des argiles : quand les teneurs en fer dans les horizons éluviaux sont supérieures à 4 g/kg (horizons E des sols non compactés de la hêtraie), les taux de dispersion de l'argile sont systématiquement inférieurs à 5 % ; lorsque le fer des oxyhydroxydes a été partiellement éliminé par hydromorphie et que sa teneur chute en dessous de 3 g/kg, les taux de dispersion sont en très grande majorité supérieurs à 80 % (horizons E<sub>g</sub>). Ceci constitue une confirmation des travaux de De Coninck *et al.* (1976) et de Gury (1990) qui ont mis en évidence le rôle important joué par le processus de déferrification dans la mobilisation de la fraction argileuse des sols.

Le compactage des sols limoneux de la forêt de Soignes a donc clairement pour effet, *via* les processus hydromorphes qu'il engendre et la déferrification plus ou moins intense des horizons éluviaux qui en résulte, de déstabiliser leur fraction argileuse. Ce processus est dès lors susceptible d'accentuer la mobilité des particules argileuses dans les sols orniérés, c'est-à-dire d'y relancer un phénomène de lessivage. Un tel lessivage "secondaire" pourrait avoir des effets aggravants sur l'instabilité structurale des horizons éluviaux et en accentuer les caractères défavorables, tout en limitant sérieusement d'éventuelles possibilités de revalidation.

## CONCLUSIONS

Comme la majorité des sols à texture limoneuse, les sols lessivés acides développés au sein des lœss de la forêt de Soignes sont très sensibles à la dégradation physique. Soumis à des phénomènes de compactage importants dans les secteurs où ils sont parcourus par les engins de débarquement, ils y subissent rapidement les effets d'une hydromorphie superficielle très active dans les 30 cm supérieurs des profils. Celle-ci est la conséquence directe d'une perte de quelque 60 % des macropores qui y assurent la circulation de l'air et de l'eau. Dans les secteurs orniérés, la macroporosité tombe en dessous de 10 % du volume total du sol et, dans les secteurs les plus dégradés, en hêtraie, s'approche même du seuil de 5 %, considéré comme critique pour la survie des systèmes racinaires. C'est dans ces mêmes horizons éluviaux fortement compactés que des transferts de porosité se font aussi au détriment de la microporosité et au profit de la porosité matricielle, avec pour conséquence une perte de 22 % environ de la réserve en eau utile dans les 30 cm supérieurs de ces sols. Cette perturbation de l'économie en eau des profils, associée à la perte de vitalité des systèmes racinaires et probablement aussi à une réduction de leur volume efficace, ne peuvent qu'accroître l'impact des stress hydriques au cours des années climatiquement sèches.

Le caractère réducteur et acide de la nappe perchée, qui s'installe dans les sols dégradés par orniérage, déclenche en outre la mobilisation du fer, des horizons éluviaux vers les horizons illuviaux, avec pour conséquence un accroissement de la dispersibilité à l'eau de la phase argileuse dans les premiers et une augmentation de la cohésion par accumulation d'oxyhydroxydes de fer dans les seconds, tous effets défavorables au point de vue structural.

Il est clair que l'ensemble de ces processus diminue très sensiblement les potentialités sylvicoles de ces sols limoneux et pourrait compromettre l'avenir des peuplements soniens, particulièrement des hêtraies dont on connaît la sensibilité vis-à-vis de l'hydromorphie (Le Tacon, 1981 ; Nageleisen, 1994).

Dans ces sols à faible activité biologique, une restauration structurale spontanée est en effet extrêmement lente, sinon illusoire, et les dégâts occasionnés par l'exploitation forestière mécanisée perdurent de très nombreuses années, provoquant même des effets négatifs cumulés. Il est dès lors quasi certain que les opérations de débardage augmentent annuellement la surface des secteurs affectés par une dégradation hydromorphe. Ils accroissent inéluctablement les zones défavorables au Hêtre, de telle sorte qu'on ne peut exclure que le compactage des sols soit, associé à des facteurs climatiques défavorables, une des causes majeures du dépérissement de cette essence en forêt de Soignes, entre autres dans des secteurs où le drainage des sols pouvait être à l'origine considéré comme favorable.

J. HERBAUTS - J. EL BAYAD - W. GRUBER  
Laboratoire de Génétique et d'Écologie végétales  
UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES  
Chaussée de Wavre 1850  
B-1160 BRUXELLES (BELGIQUE)

## BIBLIOGRAPHIE

- DE CONINCK (F.), FAVROT (J.-C.), TAVERNIER (R.), JAMAGNE (M.). — Dégradation des sols lessivés hydromorphes sur matériaux argilo-sableux. Exemple des sols de la nappe détritique bourbonnaise (France). — *Pédologie*, vol. 26, 1976, pp. 105-151.
- DELECOUR (F.). — Carte des sols et praticabilité des terrains forestiers en Belgique. — *Pédologie*, vol. 37, n° 3, 1987, pp. 299-320.
- DICKERSON (B.P.). — Soil compaction after tree-length skidding in Northern Mississippi. — *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 1976, pp. 965-966.
- DUCHAUFOUR (Ph.). — *Pédologie. Sol, végétation, environnement*. — 4<sup>e</sup> édition. — Paris : Masson, 1995. — 324 p.
- DUDAL (R.). — Étude morphologique et génétique d'une séquence de sols sur limons lœssiques. — *Agricoltura*, I, 2<sup>e</sup> série, 1953, pp. 119-163.
- DULIÈRE (J.-F.), MALAISSE (F.). — Le Point sur le dépérissement du Chêne. — *Forêt wallonne*, n° 22, 1995, pp. 17-19.
- DULIÈRE (J.-F.), TANGHE (M.), MALAISSE (F.). — Répertoire des groupes écologiques du fichier écologique des essences. — Ministère de la Région wallonne, Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, Division de la Nature et des Forêts, Division de l'Aménagement et du Génie forestier, 1995. — 319 p.
- EL BAYAD (J.). — Dégradation hydromorphe des sols limoneux acides sous monoculture de Hêtre en Forêt de Soignes. Contribution à l'étude des conséquences édaphiques du compactage des sols par l'exploitation forestière mécanisée. — Université libre de Bruxelles, 1996. — 191 p. (Thèse).
- FOTH (H.D.). — *Fundamentals of Soil Science*. — 8<sup>th</sup> Ed. — Wiley, 1990. — 360 p.
- FROELICH (H.A.). — Soil compaction from logging equipment : effects on growth of young Ponderosa pine. — *J. Soil Water Conserv.*, 34, 1990, pp. 276-277.
- GALOUX (A.). — Le Hêtre et la dégradation des sols forestiers lœssiques. — *Bulletin de la Société royale forestière de Belgique*, vol. 60, n° 5, 1953, pp. 225-235.
- GALOUX (A.). — Sylviculture en Forêt de Soignes. — *Les Naturalistes belges*, vol. 40, n° 2, 1959, pp. 25-35.
- GURY (M.). — Genèse et fonctionnement actuel des pseudogleys podzoliques sur terrasses alluviales dans l'Est de la France. — Université de Nancy I, 1990. — 331 p. (Thèse).
- HERBAUTS (J.), EL BAYAD (J.), GRUBER (W.). — Influence of logging traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soils developed on loessic loam in middle Belgium. — *Forest Ecology and Management*, 87, 1996, pp. 193-207.
- LANGOHR (R.), VERMEIRE (R.). — Well drained soils with a "degraded" Bt horizon in loess deposits in Belgium ; relationship with paleoperiglacial processes. — *Biuletyn Peryglacjalny*, 29, 1982, pp. 203-212.

- LE TACON (F.). — Écologie du Hêtre et de la hêtraie. Caractérisation édaphique. *In* : Le Hêtre / E. Teissier du Cros (Coord.). — Versailles : INRA, 1981. — pp. 77-84.
- LIENARD (U.G.). — Livre blanc sur la gestion de la Forêt domaniale de Soignes. — *Bulletin trimestriel de l'asbl "Ligue des amis de la Forêt de Soignes"*, n° spécial, 1975, 80 p. (580, bld Smet de Naeyer, 1020 Bruxelles).
- LOUIS (A.). — Carte des Sols de la Belgique. Texte explicatif de la planchette d'Uccle 102W. — IRSIA, 1959. — 90 p.
- MATHIEU (L.), VAN PRAAG (H.J.), WEISSEN (F.), DELECOUR (F.), SOUGNEZ (N.). — Étude intégrée de sols à pseudogley sous végétation naturelle du plateau des Hautes-Fagnes (Belgique). Partie I - Le milieu de pédogenèse, la morphologie et le fonctionnement actuel des profils. — *Catena*, 8, 1981, pp. 299-323.
- NAGELEISEN (L.M.). — 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, 1993. — pp. 23-26.
- NAGELEISEN (L.M.). — Le Dépérissement actuel de feuillus divers : Hêtre, Merisier, Alisier torminal, Érable sycomore, Peuplier, Châtaignier, Charme, Aulne glutineux. — *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 5, 1994, pp. 554-562.
- ROTARU (C.). — Les Phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. — *Revue forestière française*, vol. XXXVII, n° 5, 1985, pp. 359-370.
- SOANE (B.D.). — Soil degradation attributable to compaction under wheels and its control. *In* : Soil Degradation / D. Boels, D.B. Davies, A.E. Johnston Ed. . — Proc. Land Use Seminar on Soil Degradation, Balkema, A.A., Wageningen, 1980. — pp. 27-45.
- VASIC (M.), HERBAUTS (J.), TANGHE (M.). — Soil-available potassium and magnesium and oak dieback in acid soils from Middle Belgium. *In* : Proc. Symp. Biological Indicators of Global Change / J.J. Symoens, P. Devos, J. Rammeloo, Ch. Verstraeten Ed. . — Brussels, 1993. — pp. 179-184.
- WÅSTERLUND (I.). — Environmental aspects of machine traffic. — *J. Terramech.*, 31, 1994, pp. 265-277.
- WINGATE-HILL (R.). — Compaction of soil by pneumatic tyres in agriculture and forestry. A bibliography. — *Soil Tillage Res.*, 1982, pp. 3-99.
- WINGATE-HILL (R.), JAKOBSEN (B.F.). — Increased mechanisation and soil damage in forests. A review. — *New Zealand Journal of Forest Science*, 12, 1982, pp. 380-393.

---

**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) (Résumé)**

L'influence de l'exploitation forestière mécanisée sur les propriétés physiques de sols forestiers acides et limoneux a été étudiée dans une hêtraie et une chênaie de Moyenne Belgique. Les conséquences édaphiques de la formation de nappes perchées temporaires, résultant de la compaction des sols dans les secteurs dégradés par orniérage, ont également été abordées. Les résultats montrent que les opérations de débardage, par la diminution importante de macroporosité qu'elles occasionnent dans les 30 cm supérieurs des profils, déclenchent une dégradation hydromorphe très active de ces sols limoneux, avec translocation du fer réduit des horizons éluviaux vers les horizons illuviaux sous-jacents. La chute de la porosité à l'air à une valeur proche ou inférieure à 10 % du volume total du sol, considérée comme un seuil critique pour la survie des systèmes racinaires, permet de penser que le compactage des sols pourrait constituer un facteur aggravant du "dépérissement" forestier.

**THE IMPACT OF MECHANIZED FORESTRY TECHNIQUES ON THE PHYSICAL DETERIORATION OF SOILS - THE CASE OF ACID, SILTY SOILS IN THE SOIGNES FOREST (BELGIUM) (Abstract)**

Modifications of soil physical parameters induced by compaction in wheel-rutted areas due to mechanized forest management were studied in acidic and silty soils developed under beech and oak stands of Central Belgium. The consequences of surface waterlogging on soil processes were also investigated. Main results show that soil macroporosity is severely reduced in the upper layers (0-30 cm) of the rutted areas, lowering the transmission pore volume near to or less than 10 % of the total soil volume, which is the current threshold value for the viability of roots. Temporary waterlogging induces the downward translocation of reduced iron towards underlying B horizons, where iron oxides accumulate. These results provide evidence that on loessic materials logging operations lead to rapid soil degradation through active hydro-morphic processes. It is therefore suggested that soil compaction could be an important aggravating factor in forest "decline".

---

## INFORMATION

La *Revue Forestière Française* dispose encore, pour la vente, d'un certain nombre de **numéros spéciaux et numéros dits "thématiques"**.

En voici la liste :

	Nombre de pages	Prix
1969 - Progrès techniques en sylviculture . . . . .	120	46 F
1972 - Le Fonds forestier national . . . . .	256	58 F
1973 - 7 <sup>e</sup> congrès forestier mondial - Argentine . . . . .	81	38 F
1974/1975 - Les incendies de forêts (2 tomes) (hors-texte couleurs) . . . . .	552	130 F
1976 - Ressources et besoins en bois de la France . . . . .	224	80 F
1977 - Eléments d'histoire forestière . . . . .	168	68 F
1978 - Vers la forêt du XXI <sup>e</sup> siècle - Rapport B. de Jouvenel . . . . .	152	68 F
1979 - La forêt au Québec (hors-texte couleurs) . . . . .	248	124 F
1980 - Société et forêts . . . . .	376	124 F
1981 - Sylvicultures en futaies feuillues . . . . .	160	80 F
1982 - Propositions pour une politique globale forêt-bois . . . . . Rapport de R. Duroure	116	62 F
Restauration des terrains en montagne (n° 5) . . . . .	240	102 F
1983 - Forêt et bois au Japon . . . . .	160	80 F
1984 - Dialogue forestier par-dessus le Rhin . . . . . Évolution et traitement des plantations d'Épicéa commun et de Douglas (n° 4) . . . . .	104	68 F
1985 - Regards sur la santé de nos forêts . . . . .	148	90 F
Un défi d'aujourd'hui : la filière-bois de demain (n° 3) . . . . .	84	57 F
1986 - Production des plants forestiers et plantations (n° 3) . . . . . Amélioration génétique des arbres forestiers . . . . .	148	73 F
. . . . .	288	102 F
1987 - Le Fonds forestier national a 40 ans . . . . .	176	86 F
Les chablis (n° 4) . . . . .	148	75 F
1988 - Diagnostics en forêt . . . . .	160	80 F
1989 - L'arbre en ville . . . . .	192	107 F
1990 - Chêne sessile, Chêne pédonculé et Chêne rouge d'Amérique en forêt française (n° 2) . . . . .	176	80 F
Espaces forestiers et incendies . . . . .	380	200 F
1991 - Patrimoines naturels forestiers . . . . .	224	110 F
1992 - Les feuillus précieux : Frêne, Merisier et Grands Érables . . . . .	188	110 F
1993 - L'Alisier torminal et autres Sorbus (n° 3) . . . . . Informatique et foresterie . . . . .	200	110 F
. . . . .	256	180 F
1994 - Les dépérissements des arbres forestiers : causes connues et inconnues (n° 5) . . . . .	208	110 F
Agroforesterie en zone tempérée . . . . .	188	120 F
1995 - Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois . . . . .	204	130 F
1996 - La gestion durable des forêts tempérées . . . . .	252	180 F
1997 - Champignons et mycorhizes en forêt . . . . .	256	180 F

Les commandes, accompagnées du paiement libellé au nom du Régisseur de l'ENGREF, sont à adresser à :

REVUE FORESTIÈRE FRANÇAISE  
14, Rue Girardet - CS 4216  
F - 54042 NANCY CEDEX  
Tél. : 03.83.39.68.00

Les prix ci-dessus s'entendent franco de port

Télécopie : 03.83.32.73.81 ou 03.83.30.22.54

Tarifs valables jusqu'au 31/12/1998