



EFFETS DE LA COMPACTION DES SOLS FORESTIERS

MARIE-AMÉLIE DE PAUL – MICHEL BAILLY

La compaction du sol est un phénomène extrêmement complexe. Non seulement par les facteurs intervenant dans le processus mais également par les conséquences qu'elle peut avoir sur la végétation. Un tour d'horizon de ces impacts sur la croissance végétale et la productivité forestière est présenté ici au travers d'une revue bibliographique.

La compaction d'un sol apparaît lorsque, soumis à une contrainte supérieure à sa résistance interne, il subit une modification de sa structure. Cette modification sera, selon l'importance de la contrainte et des caractéristiques du sol, plus ou moins profonde et durable dans le temps. Les principales conséquences physiques, telles l'augmentation de la valeur de pré-compression ou de la résistance à la pénétration, ont été exposées dans un précédent article.¹

Le présent article a pour but de faire le point et d'analyser les impacts connus de cette compaction sur le développement de la végétation et plus particulièrement sur la productivité forestière. Pour ce faire, il importe d'appréhender de manière plus large ses conséquences.

Ainsi, le tassement du sol s'accompagne d'une augmentation de sa densité apparente qui se manifeste par une diminu-

tion de la porosité totale et surtout de la macroporosité. Cela conduit à toute une série de phénomènes qui nuisent au bon développement de la flore dont² :

- une augmentation de la résistance mécanique du sol à la croissance des racines ;
- une limitation du volume disponible pour l'eau et l'oxygène ainsi qu'une augmentation des contraintes à leur circulation. Cela peut aboutir à une disparition presque absolue de la teneur en air du sol et à une diminution du taux d'infiltration d'eau ;
- une modification de la conductivité thermique impliquant de plus grandes variabilités saisonnières.

Les conséquences biologiques de ces perturbations physiques sont :

- la réduction de la disponibilité racinaire en eau, en éléments nutritifs et en oxygène³ ;
- la réduction de l'activité racinaire et métabolique des radicelles et des microorganismes associés³ ;
- la perturbation de la mise en place ou du bon fonctionnement des mycorhizes.⁴

L'ensemble de ces facteurs va contribuer plus ou moins fortement à des problèmes de développement des végétaux. L'importance de ceux-ci dépendra du niveau de la compaction, du type de sol et de la sensibilité de l'espèce. Ces problèmes de développement pourront, d'une part, avoir un impact non négligeable sur la productivité du peuplement et, d'autre part, insidieusement affecter la diversité floristique, surtout des espèces herbacées forestières caractérisées par des exigences pointues et par une capacité de dispersion souvent réduite.

Ces deux points sont abordés ici successivement au travers d'une recherche bibliographique. Signalons au passage que si l'on compte énormément d'écrits de tous horizons à ce sujet, bien peu de données expérimentales existent pour nos régions. Bien qu'il n'y ait aucun doute sur l'existence de similitudes entre les observations relevées à l'étranger et les réalités de nos contrées, il est regrettable que l'on ne dispose que de peu de faits et de chiffres relatifs à nos essences, sur nos sols et avec nos conditions écologiques de croissance. Peut-être est-ce là l'origine du fait que la compaction des sols forestiers et son influence sur la productivité des peuplements ne constituent finalement qu'une préoccupation relativement marginale ou, à tout le moins, très peu documentée dans notre monde forestier wallon.

LA COMPACTION ET LES VÉGÉTAUX

Il persiste encore de nombreuses incognues quant à l'effet de la compaction sur la croissance et la productivité. Cela est dû au peu d'études effectuées sur le long terme, à la difficulté d'intégrer les effets des précédents sylvicoles, à la persistance variable du phénomène, mais également à la complexité des éventuels effets de compensation des nombreux facteurs écologiques qui entrent en jeu. Cependant les observations à court et moyen termes réalisées depuis de nombreuses années ne semblent pas laisser de place au doute : les impacts de la compaction sont bel et bien réels.

La compaction des sols influence le développement des végétaux en jouant sur la germination des graines, l'installation et

la survie de la régénération ainsi que la croissance en général. En réalité, le fonctionnement physiologique des végétaux est perturbé par le tassement du sol parce que le système racinaire se développe dans un milieu altéré. Or celui-ci conditionne directement le bon développement de l'ensemble de la plante. Mais le système racinaire est invisible et son importance trop souvent sous-estimée.

Approvisionnement en oxygène

La respiration des racines ne se fait pas à travers la partie aérienne de la plante mais bien par l'absorption directe de l'air contenu dans la porosité du sol. Toute diminution significative de la porosité et de l'accessibilité à l'oxygène se répercute donc sur le fonctionnement des racines : en dessous de 15 % d'oxygène, l'absorption minérale décroît, en dessous de 12 %, il n'y a plus de formation de nouvelles racines, en dessous de 5 %, il n'y a plus de croissance racinaire et en dessous de 1 %, les racines perdent du poids et meurent.⁵

Une expérimentation en conditions réelles (simulations d'exploitation avec différents engins) a donné lieu à des diminutions de perméabilité à l'air de 30 à 40 % et ce de manière similaire à 20 cm ou 40 cm de profondeur.⁶

Enfin, des taux d'oxygène limités conduisent à l'apparition de respiration anaérobie. Celle-ci est à l'origine d'une diminution de l'énergie et de la production d'éléments toxiques réduisant l'élongation et la croissance racinaire⁷. Nous pouvons d'ailleurs noter que la répartition verticale des racines est généralement influencée par le taux d'oxygène du sol.⁵

Pour avoir un bon développement racinaire, il apparaît donc primordial de maintenir une forte microporosité générale ainsi qu'une macroporosité verticale qui réapprovisionne les horizons profonds.

La disponibilité en eau et en éléments nutritifs

La réduction de la disponibilité en eau relevée au niveau des racines joue sur l'ensemble de la plante, de la racine aux feuilles.

La croissance racinaire ne se produira pas s'il y a un important déficit en eau. Le niveau critique à partir duquel les problèmes surviennent est le point de flétrissement. Si une grande partie du système racinaire est atteint, la quantité d'eau absorbée tombe sous un seuil qui ne permet plus à l'arbre de produire de la matière, celui-ci se limitant alors à survivre.⁷

L'élongation ne pourra se réaliser que si la turgescence des cellules de l'apex est suffisante pour surmonter la « force du sol ». Si tel n'est pas le cas, en cas de manque d'eau, la croissance s'arrête et une racine latérale se développera si elle peut trouver un sol plus meuble.⁷

Sans cependant disposer de données à ce sujet, on peut même imaginer que cela puisse jouer sur la stabilité des arbres au vent.

Un autre fait important est la diminution de la disponibilité des éléments nutritifs. Tout d'abord parce que ceux-ci sont puisés à partir de la solution du sol. Ensuite, parce que suite à un phénomène de compaction, ils sont souvent lessivés en profondeur avec pertes de composés gazeux ou solubles.⁸

L'indice de cône

On ne dispose que de peu de données au sujet de la croissance racinaire en fonction de la résistance à la pénétration d'un sol. On ne peut cependant ignorer que les racines doivent déployer une force supérieure à la celle de l'indice de cône pour progresser au sein de pores de diamètres inférieurs aux leurs. Dès lors, en cas de compaction et donc de réduction du nombre des macropores, la croissance racinaire est plus difficile et les racines plus courtes.

Une étude menée récemment en Forêt de Soignes met toutefois clairement en évidence la répartition des plantes herbacées en fonction de l'indice de cône : elle présente en graphiques le taux de recouvrement de chacune des espèces en fonction de la résistance à la pénétration. On remarque clairement que tous

les comportements sont observables : taux de recouvrement évoluant suivant des courbes exponentielles positives ou négatives ou des graphiques en cloche mais dont les optimums sont fort variables (figure 2).

LES ESSENCES FORESTIÈRES FACE À LA COMPACTION

Impact sur la croissance et la productivité

De nombreuses expériences ont démontré que la compaction des sols forestiers avait une retombée significative à très significative sur la productivité forestière. Son origine tient principalement à une réduction de l'activité racinaire qui se répercute sous différentes formes dans le développement de l'arbre, de la régénération à la croissance en passant par l'état sanitaire.

Tableau 1 – Effets négatifs potentiels d'une compaction importante sur la croissance racinaire des arbres.⁷

Facteur	Effet potentiel sur les racines	Situation en sol compacté
Oxygène	Disponibilité plus faible.	Diminution voire arrêt total de la respiration aérobie ; respiration anaérobie à l'origine de produits toxiques.
Eau	Diminution de la quantité d'eau, de sa disponibilité.	Interruption des mécanismes d'alimentation, réduction de la croissance cellulaire, dessiccation des cellules.
Nutriments	Augmentation des lessivages ; réduction de la minéralisation des éléments organiques.	Réduction de la capacité d'alimentation, problèmes de régulation osmotique, carence en certains éléments.
Température	Accroissement des phénomènes de conductivité thermique et de diffusion conduisant à de plus larges amplitudes de variations.	Croissance racinaire affectée par les températures trop ou trop peu élevées.
Structure du sol	Résistance accrue ; porosité moindre.	Obstacle physique au développement racinaire ; perturbation de la disponibilité en eau, oxygène et nutriments.

La régénération

La germination des graines et la croissance des jeunes pousses peuvent être sérieusement affectées par la compaction du sol⁶. Entre autres, le manque d'oxygène et d'humidité peut limiter le développement des mycorhizes et donc l'efficacité des racines. L'importance de ces mycorhizes est tellement bien connue que de nombreux plants sont, aujourd'hui, artificiellement « mycorhizés ».

Les effets de la compaction sur la régénération se font ressentir par une mortalité plus importante ainsi que par une croissance réduite. Un document précise, par exemple, que sur un sol à texture fine ayant fait l'objet de passages d'engins, 15 % des arbres ayant été plantés directement dans la trace des roues sont morts au cours des deux premières années suivant la plantation. Comparativement, le taux de mortalité s'élevait à 8 % au centre du sentier et à 0 % dans les zones non perturbées.⁹

Une autre étude récente sur le douglas en Oregon¹⁰ détaille l'implication de la réduction de croissance. Celle des arbres situés sur les voies de circulation, où la densité du sol a augmenté de 14 % était, en moyenne, 24 % inférieure aux autres arbres après quatre ou cinq ans. Cette différence n'était plus que de 6 % après sept ans. Dix ans après la plantation, les arbres ayant poussé sur les sols compactés affichaient un retard de 10 % en hauteur et 29 % en volume.

La persistance de cette réduction de croissance n'est pas encore bien connue. Certains auteurs pensent qu'après une petite dizaine d'années, la croissance annuelle redevient comparable. D'autres

font remarquer que cette réduction de croissance pourrait se manifester plus significativement après cette première décennie lorsque les racines atteignent des sols compactés en profondeur. Visiblement, le recul semble manquer dans l'analyse des conséquences à long terme.

Certains auteurs ont, sur base de leurs expériences, dressés des relations entre la densité apparente et la réduction de croissance des jeunes plants : l'un d'entre eux enregistre 1,3 % de réduction de croissance en hauteur chez les jeunes douglas à chaque accroissement de 1 % de densité apparente.¹¹

En définitive, il semble évident que la régénération soit qualitativement et quantitativement dépendante de l'état de compaction du sol et que les effets négatifs induits soient directement visibles sur la survie ou le bon développement des plants durant leurs premières années.

Croissance et volume

D'innombrables études font état de la réduction de croissance et donc de la diminution de productivité forestière sur sol compacté. En 1982, un auteur présentait 142 études répertoriées entre 1970 et 1977 et étudiant ce phénomène : 82 % d'entre elles concluaient à des réductions de productivité.⁷⁻¹¹

Une étude menée en Nouvelle-Zélande, par exemple, fait état d'une perte de volume de près de 30 % pour des pins s'étant développés sur des sols compactés par rapport aux sols intacts. En prolongeant l'analyse, les auteurs concluent à une réduction économique de près de 65 %. C'est principalement la croissance

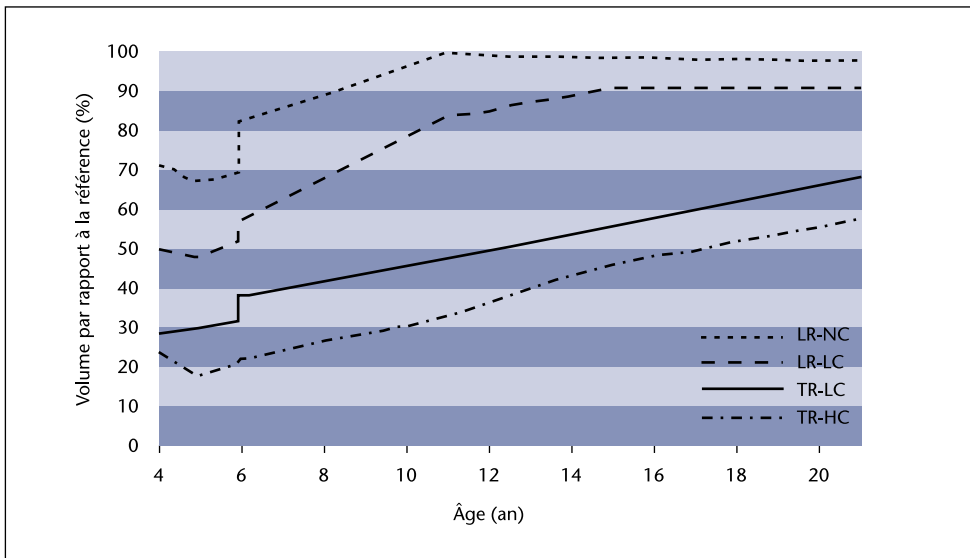


Figure 1 – Impact de la perturbation du sol sur la croissance en volume de *Pinus radiata* observé entre 6 et 21 ans par rapport à un peuplement témoin (100 %) sur sol non perturbé. TR-HC : couche superficielle du sol enlevée et forte compaction des couches inférieures ; TR-LC : couche superficielle du sol enlevée et faible compaction des couches inférieures ; LR-LC : litière retirée et forte compaction ; LR-NC : litière retirée sans compaction.¹²

Dans les deux options (enlèvement de la couche superficielle ou de la litière), on remarque que la compaction induit une chute plus importante encore de la croissance.

en diamètre qui est affectée puisqu'on relève une réduction en hauteur de 4 % par rapport aux arbres témoins mais de 16 % en diamètre¹². Pour reproduire au mieux l'état du sol suite aux passages d'engins, il y a lieu de préciser que le protocole d'expérimentation incluait l'enlèvement de la litière ou des premiers centimètres du sol ce qui, tout en posant un problème d'interprétation de l'effet de la compaction seul, ne s'éloigne pas d'une réalité de terrain.

C'est donc principalement le volume des arbres qui est affecté par la compaction du sol et l'effet se mesure également en surface terrière : des arbres dont 10 à 40 % du système racinaire s'est développé dans

un sol ayant une densité apparente augmentée de 10 % suite à un compactage ont présenté un accroissement en surface terrière diminué de 14 % en douze ans. Quand plus de 40 % de l'ensemble des racines était touché, l'accroissement de la surface terrière était alors être diminué de 30 %.⁷

État sanitaire

Comme explicité ci-dessus, l'état sanitaire d'un arbre est conditionné par l'état du sol puisque les racines répercutent leurs conditions de vie aux arbres. De manière générale, on peut supposer qu'un mauvais fonctionnement racinaire entraîne une aggravation des stress hydriques ou d'éventuelles déficiences en éléments nu-

tritifs, mais également qu'il contribue au phénomène de dépérissement, qu'il soit d'origine climatique ou nutritionnelle.³

Les quelques exemples concrets suivants illustrent l'impact du compactage sur le développement et la vitalité des peuplements :

- une étude fait apparaître que le tassement du sol résultant du passage d'engins lourds favorise la maladie de l'encre du châtaignier, causée par le champignon *Phytophthora cinnamomi*. Ainsi, dans les sols tassés qui limitent la croissance des racines et qui les rendent plus vulnérables, la probabilité qu'un arbre présente cette maladie est très fortement liée à la compaction. Et ceci, quand tous les autres facteurs restent égaux¹⁴ ;
- un autre article fait état qu'en France la recrudescence des attaques d'insectes sous-corticaux sur les essences feuillues suite à la sécheresse de l'année 2003 ne s'est pas systématiquement produite là où les symptômes de la canicule (rougissement et chute de feuilles précoce) étaient les plus marqués. Les attaques se sont plutôt cantonnées aux zones qui présentaient en plus un tassement de sol suite au débardage des chablis lors des tempêtes de 1999.¹⁵

Ces deux exemples montrent bien que l'état sanitaire des peuplements est conditionné par le sol et sa compaction. L'influence du tassement de sol suite aux exploitations a d'ailleurs pu être mise en évidence dans certains cas de dépérissements forestiers.¹⁶

Sensibilité des essences

Il est connu que la densité apparente peut, à partir d'un certain niveau, consti-

tuer un obstacle physique à la croissance racinaire. Il semble qu'il y ait en fait une densité apparente optimale pour chaque espèce et que plus on s'écarte de celle-ci, plus on observe une décroissance en productivité. Dans certains cas, de légères compactations peuvent même s'avérer favorables. En effet, puisque chaque espèce à un optimum pour la densité du sol, il est facilement concevable qu'une augmentation de densité soit quelquefois favorable.

Certaines recherches ont permis de déterminer des densités de sols au-delà desquelles la croissance des arbres était limitée : ainsi une densité de 1,74 à 1,83 g/cm³ semble suffisante pour empêcher la pénétration des racines de douglas et la densité limite pour *Pinus taeda* sur sol limoneux serait de 1,4 g/cm³. La croissance des racines de *Pinus radiata* serait inhibée, elle, au-delà d'un indice de cône supérieur à 3 000 kPa en sol sablonneux...¹¹

D'après le fichier écologique des essences, certains arbres sont plus sensibles que d'autres au compactage du sol mais, ici encore, les valeurs chiffrées manquent.

Chaque essence réagit donc différemment à la compaction et l'épicéa semble, par exemple, plus sensible que le pin sylvestre. Une étude menée en 1983 a révélé à ce sujet que, pour un épicéa de 45 ans situé à 30 cm d'une ornière, la perte de croissance annuelle est de 28 % dans les cinq années suivant l'application de la contrainte. Pour un pin sylvestre, dans les mêmes conditions, la perte de croissance n'a été estimée qu'à 12 %. À noter par ailleurs qu'à 3 mètres de l'ornière, pour un arbre de 45 ans, l'influence du compactage à quasiment disparue.¹⁷

Certaines études, enfin, font état de réduction de croissance individuelle de près de 40 % suite à des compressions lors d'une éclaircie.¹³

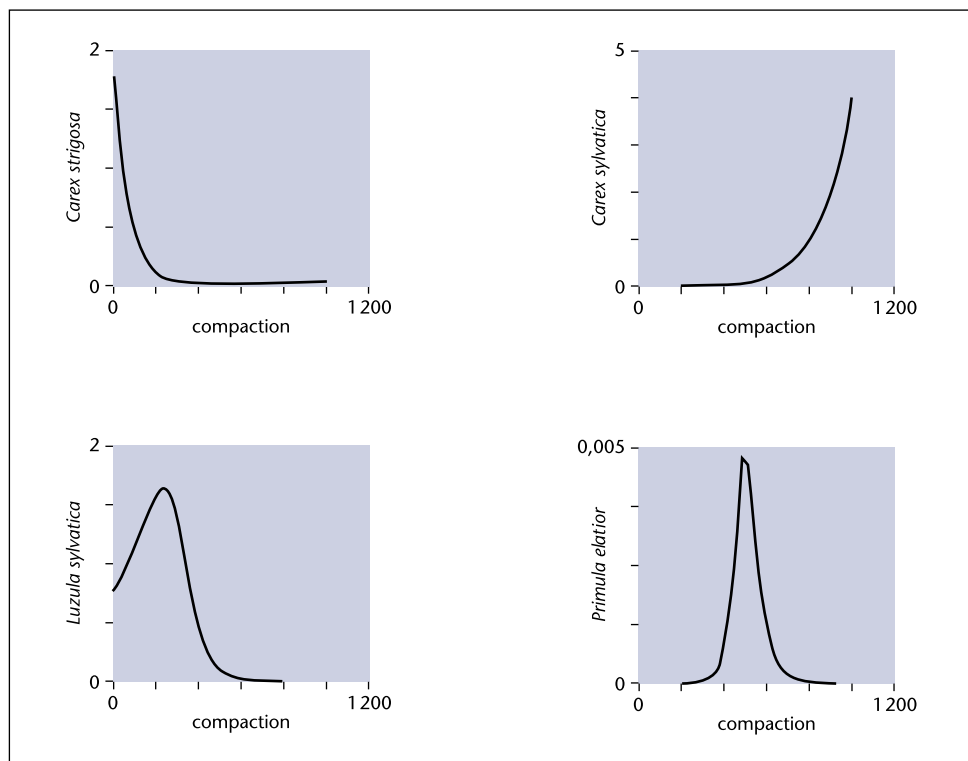
COMPACTION ET BIODIVERSITÉ VÉGÉTALE

La compaction du sol a des répercussions spécifiques sur la flore. De façon générale, le tassement se traduit par une forte diminution de la couverture herbacée et cela est sans doute une répercussion de la diminution de sa porosité et donc de sa te-

neur en oxygène qui engendre un déficit pour les racines.¹⁸

Mais, d'après une étude réalisée en Forêt de Soignes⁴, le compactage aurait également un effet inégal sur les différentes espèces en modifiant le taux de recouvrement ou en conditionnant la présence même de certaines d'entre elles. Ainsi, sur les 41 espèces forestières étudiées, 24 sont très fortement pénalisées par une augmentation du taux de compaction du sol. D'autres espèces, souvent non-forestières, supportent mieux, voire profitent de l'augmentation de la compaction.

Figure 2 – Évolution du taux de recouvrement de certaines plantes herbacées en fonction de l'indice de cône (Forêt de Soignes).⁴



La compaction des sols pourrait donc être à l'origine d'un changement à plus ou moins long terme de la composition floristique du sous-étage forestier. Mais à nouveau, pour évaluer l'ampleur et la persistance des changements, il faut prendre en compte le type de sol, l'importance du compactage et la composition floristique initiale.

CONCLUSIONS

La compaction des sols forestiers et son impact sur la productivité et la biodiversité forestière n'est pas un sujet facile à appréhender. Cependant son évidente complexité ne doit pas pour autant nous amener à nier son existence : de nombreuses études et évidences biologiques démontrent que la compaction a un impact quelques fois fort significatif.

Si ce phénomène peut s'observer facilement au niveau de la régénération par des mortalités plus importantes ou des réductions de croissance localisées, qu'en est-il de la diminution de la productivité sur l'ensemble d'un peuplement et au cours de toute sa vie ? Dans les peuplements bien souvent entièrement parcourus lors des exploitations, il est difficile de mettre en évidence des différences de productivité individuelle. D'autant que d'autres facteurs écologiques viennent complexifier l'analyse et la relation de cause à effet.

D'un point de vue sanitaire, également, il est fort difficile de mettre en évidence la part éventuelle d'une dégradation du sol sur la réaction d'un arbre. Des études citées ici en ont pourtant fait la preuve. Et qu'en est-il de la résistance au vent que

certaines verraient diminuée du fait d'une croissance racinaire réduite ?

Pour clôturer, pointons également l'impact possible sur la biodiversité forestière qui se manifeste par la pénalisation de certaines espèces plus sensibles au phénomène de compaction. En Forêt de Soignes, massif périurbain caractérisé par un sol sensible, des exploitations lourdes et un piétinement intense, l'indice de cône moyen mesuré est de 3 650 kPa⁴. Cette valeur est sensiblement supérieure aux valeurs plus fréquemment rencontrées dans les autres sols forestiers mais, de plus, elle est supérieure à la valeur optimale de la plupart des plantes herbacées forestières rencontrées dans ce massif. Cela signifie que bon nombre d'entre elles évoluent dans des conditions sub-optimales et sont donc perpétuellement en concurrence difficile avec d'autres espèces moins sensibles et généralement non forestières⁴. On pourrait dès lors assister à une érosion lente mais significative de la diversité floristique et de sa spécificité forestière. ■

Cet article est réalisé dans le cadre de la convention « État des lieux des connaissances en matière d'exploitation forestière et opportunités de développement de techniques "douces" » financée par la Division de la Nature et des Forêts (DGRNE, MRW).

BIBLIOGRAPHIE

- ¹ DE PAUL M.-A., BAILLY M. [2005]. La compaction des sols forestiers, définition et principes du phénomène. *Forêt Wallonne* 76 : 39-47.
- ² LEFÈVRE Y., LÉVY G. [2001]. *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF : 157-158.

- ³ 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). *Revue Forestière Française* 50(2) : 124-137.
- ⁴ GODEFROID S., KOEDAM N. [2003]. Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. *Biological conservation* 119 : 207-217
- ⁵ RAIMBAULT P. [2003]. *La physiologie et l'architecture des racines*. 9^{ème} Congrès de l'APEVC, Igualada : 22-29.
- ⁶ HORN R., VOSSBRINK J., BECKER S. [2004]. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 79 : 207-219.
- ⁷ ARNUP R.W. [1999]. *The Effects and Management of Forestry-related Soil Disturbance, with Reference to Implications for the Clay Belt : A Literature Review*. Boreal Science, Ontario, 25 p.
- ⁸ ABEELS P.F.J. [1995]. *Les engins en forêts et l'environnement*. Faculté des Sciences Agronomiques, UCL, Unité de Génie Rural, 9 p.
- ⁹ BRAIS S. [2005]. *Étendue et sévérité du compactage sur les dépôts à texture fine et les dépôts à texture grossière de l'Abitibi*. Chaire Industrielle CRSNG, UQAT, UQAM, 4 p.
- ¹⁰ HENINGER R., SCOTT W., DOBKOWSKI A., MILLER R., ANDERSON H., DUKE S. [2002]. Soil disturbance and 10-year growth response of coast Douglas-fir on nontilled and tilled skid trails in the Oregon Cascades (Abstract). *Revue Canadienne de Recherche Forestière* 32(2) : 233-246.
- ¹¹ FROESE K. [2004]. *Bulk density, soil strength, and soil disturbance impacts from a cut-to-length harvest operation in North Central Idaho*. Thesis, University of Idaho, 72 p.
- ¹² MURPHY G., FIRTH J.G., SKINNER M.F. [2004]. Long-term impacts of forest harvesting related soil disturbance on log product yields and economic potential in New Zealand. *Silva Fennica* 38(3) : 279-289.
- ¹³ ADAMS P.W. [1998]. *Soil Compaction on Woodland Properties*. The woodland workbook, 7p.
- ¹⁴ FONSECA T.F., ABREU C.G., PARRÉSOL B.R. [2004]. Soil compaction and chestnut ink disease. *For. Path.* 34 : 273-283.
- ¹⁵ NAGELEISEN L.-M. [2004]. *Recrudescence des insectes sous corticaux à la suite des extrêmes climatiques de 2003*. Bilan de la santé des forêts en 2003, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et de la ruralité, 5 p.
- ¹⁶ CACOT E. [2001]. Exploitation forestière et débardage : pourquoi et comment réduire les impacts ? AFOCEL, *Fiche Informations-Forêt* 637, 6 p.
- ¹⁷ CONSTANTIN E. [1997]. *Évaluations des impacts des Opérations de Récolte sur les Sols Forestiers*. Pré Etude, CTBA, 19 p.
- ¹⁸ GOSSELIN M., LAROUSSINIE O. [2004]. *Biodiversité et gestion forestière : connaître pour préserver*. Synthèse bibliographique, Cemagref : 257-270.

MARIE-AMÉLIE DE PAUL

m.depaul@foretwallonne.be

MICHEL BAILLY

m.bailly@foretwallonne.be

Forêt Wallonne asbl

Croix du Sud, 2 bte 9

B-1348 Louvain-la-Neuve