

LA COMPACTION DES SOLS FORESTIERS DÉFINITION ET PRINCIPES DU PHÉNOMÈNE

MARIE-AMÉLIE DE PAUL – MICHEL BAILLY

Les caractéristiques d'un sol régissent le développement de la végétation d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Elles influent sur les espèces présentes mais également sur la productivité que l'on peut attendre d'un peuplement forestier. Il est dès lors essentiel d'appréhender les phénomènes qui peuvent conduire à une réduction de ses qualités. Tel est l'objet du présent article qui entend, au travers d'une revue bibliographique, s'attaquer à la définition et au processus de compaction des sols forestiers.

Le présent article est issu d'une recherche bibliographique préliminaire réalisée dans le contexte d'un travail plus large consacré aux impacts de l'exploitation forestière où la problématique des sols est abordée. Il se focalise sur un phénomène particulier à savoir la compression des sols. En effet, ce phénomène, insidieux car invisible, pourrait constituer un réel problème pour la productivité future de nos sols forestiers. Nous l'abordons ici

sous l'angle du phénomène physique proprement dit, sans débattre de ses origines. Les conséquences sur la productivité végétale sont, elles, développées au sein d'une autre revue bibliographique.¹

LA STRUCTURE DU SOL FORESTIER

Tout sol est constitué d'une fraction minérale et d'une autre, organique. Il se

forme à partir de l'altération d'une roche-mère et évolue sous l'action de différents processus chimiques, physiques et biologiques, sous l'influence de diverses composantes du milieu comme le climat, la végétation ou encore toute une variété d'organismes. Au cours du temps, il se différencie en strates superposées appelées horizons et, même si il reste en constante évolution, il atteint un certain état d'équilibre avec la végétation et le climat.

Outre sa composition chimique, le sol se caractérise par sa texture et sa structure :

- la texture rend compte de la répartition des constituants minéraux en fonction de leur importance granulométrique (argiles, limons ou sables) ;
- la structure renseigne le mode d'assemblage des constituants solides du sol. Elle influe directement, en association avec la texture, sur la porosité du sol et sa résistance à l'érosion.

Texture et structure sont donc d'une importance capitale pour la vitalité de tous les organismes que contient le sol car elles déterminent pour une bonne part la micro- et macroporosité du sol. Elles agissent ainsi quantitativement et qualitativement sur l'air et l'eau présents et disponibles dans le sol.

Il est important de préciser que la porosité totale du sol n'est pas, à elle seule, représentative de la disponibilité en air et en eau. Cela s'explique par le fait que seuls les pores d'une taille suffisante permettent le drainage et l'aération. Il est donc primordial de considérer l'influence du compactage sur la répartition des catégories de pores, et pas simplement sur la porosité totale. Chaque type de

pore remplit en effet une fonction spécifique² :

- la macroporosité assure la circulation de l'air et de l'eau gravitaire, ce sont des pores de transmission ;
- la microporosité assure le stockage de l'eau disponible pour les végétaux, ce sont des pores de réserve ;
- la porosité matricielle retient l'eau considérée comme non utilisable par les végétaux, ce sont des pores résiduels.

COMMENT ÉVALUER LES CARACTÈRES PHYSIQUES D'UN SOL

D'un point de vue pédologique, les caractères physiques d'un sol s'expriment par les proportions de chaque constituant granulométrique (texture) et par l'organisation spatiale des particules (structure grumeleuse fine ou très grossière, par exemple).

D'un point de vue forestier ou plus simplement biologique, ce qu'il faut évaluer au travers des caractères physiques d'un sol, c'est l'accueil qu'il réserve au développement racinaire. C'est-à-dire, sa disponibilité en eau et en oxygène, d'une part ; sa résistance physique que les racines doivent vaincre, d'autre part. Plus particulièrement encore, et dans le contexte de cette étude, la question est d'identifier les phénomènes qui peuvent induire une réduction de la capacité d'accueil du sol par la modification de sa structure.

Pour expliciter tout cela, nous avons retenu trois grandeurs : la densité apparente, la capacité de portance et la résistance à la pénétration. Chacune de ces notions est plus ou moins liée aux autres, car elles dépendent majoritairement des mêmes fac-

teurs. Elles apportent cependant chacune un éclairage particulier.

La densité apparente

Exprimée en g/cm^3 , la densité apparente est le rapport du poids de sol sec sur son volume total. En d'autres termes, elle représente la masse volumique du sol sec. Cette densité apparente, directement fonction de la texture et de la structure, influence la capacité de rétention du sol en eau et en air.

À elle seule cette valeur n'est que de peu d'utilité car une même densité apparente peut caractériser deux sols de structures distinctes si les textures sont elles-mêmes fort différentes. Par contre, à texture équivalente, la comparaison des densités reflète la porosité. Rien d'étonnant donc que cette valeur s'accroît corrélativement à l'augmentation du compactage.

La capacité de portance

Le sol est un corps élastique, c'est-à-dire qu'il peut, lorsqu'il est soumis à une contrainte externe, se déformer puis reprendre son volume initial dès que la contrainte est supprimée. Mais comme tout corps élastique, il est caractérisé par une valeur de contrainte au-delà de laquelle le point de rupture est dépassé³. Dans ce cas, le sol conserve, partiellement au moins, une trace de la pression qu'il a subie. La valeur de précompression ou de préconsolidation d'un sol est donc la pression maximale qu'il peut supporter sans conserver de déformation durable. Cette valeur est également appelée *capacité de portance*, expression plus parlante dans le cas de l'exposition du sol à des contraintes de roulage, par exemple.

S'il est relativement aisé de mesurer, en laboratoire, la capacité de portance d'un

sol, la prévoir est beaucoup plus compliqué. En effet, celle-ci est régie par de très nombreux facteurs. Certains sont relativement constants pour un sol donné (texture, structure, charge caillouteuse) mais d'autres sont extrêmement variables comme le taux d'humidité ou la quantité de tissus racinaire. En effet, en forêt, les nombreuses racines qui courent dans le sol contribuent à accroître sa capacité de portance. Celle-ci pourrait ainsi être augmentée dans certains cas de 50 à 70 % grâce à la présence des racines⁴. Mais cet effet est variable et décroissant avec l'augmentation du nombre de contrainte.

Enfin, d'autres facteurs peuvent intervenir pour modifier significativement la capacité de portance théorique d'un sol. Il s'agit des contraintes qui ont déjà pu être appliquées et qui ont été enregistrées par le sol. En effet, un sol qui a subi une compaction il y a quelques années aura, s'il est toujours compacté, une capacité de portance plus importante.

Dès lors, il s'avère extrêmement compliqué de trouver des valeurs de précompression précises et elles se situent plutôt dans

Tableau 1 – Exemples de valeurs de capacité de portance pour quelques types de sols.⁵

	Capacité de portance	
	(kPa)	(kg/cm ²)
Sable, sec	150-250	1,5-2,5
Sable, humide	300-500	3-5
Argile sèche	400-1200	4-12
Argile humide	200-300	2-3
Argile mouillée	50-150	0,5-1,5
Sol alluvial	500	5
Tourbière boisée	40-70	0,4-0,7
Tourbière ouverte	10-40	0,1-0,4

des fourchettes. Elles doivent, de plus, être prises avec beaucoup de prudence car nos différentes lectures montrent à quel point ces valeurs varient d'une référence à l'autre.

Le tableau 1 donne quelques valeurs de capacité de portance⁵. Elles s'expriment généralement en kg/cm² ou en kPa.

Ces valeurs constituent des pressions théoriques à ne pas dépasser si on ne souhaite pas augmenter la densité du sol par compaction. En effet, sous l'effet d'une contrainte, le sol va se compacter jusqu'à atteindre une valeur de capacité de portance égale à la pression qu'il subit. La compaction se manifeste alors en plusieurs étapes qui vont de la réduction de la macroporosité à la réorganisation des particules elles-mêmes (figure 1).⁶

La résistance à la pénétration ou indice de cône

La résistance à la pénétration reflète l'effort que doivent exercer les racines pour

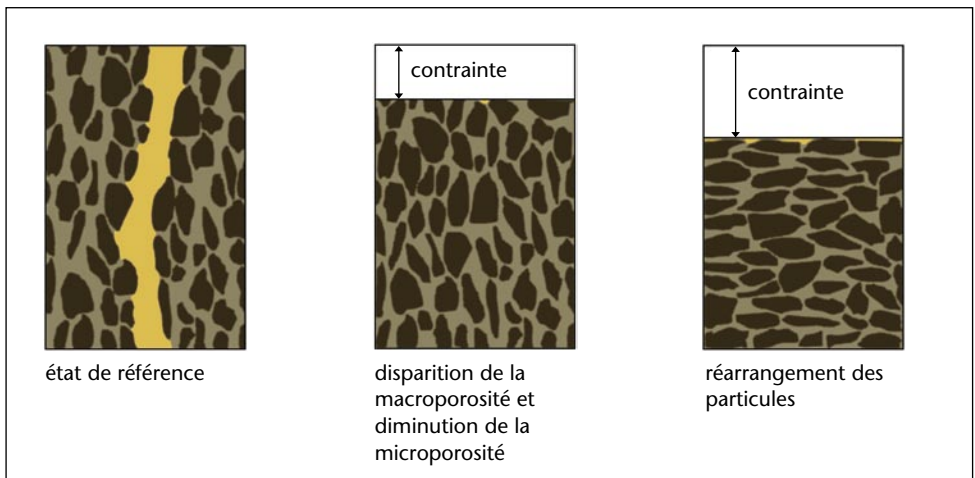
se développer dans le sol ; elle permet, par là même, d'évaluer la compacité d'un sol. Le pénétromètre est l'outil le plus utilisé pour la quantifier (figure 2). Cet appareil permet de mesurer la résistance d'un sol à la pénétration d'un cône de dimension standardisée. La poussée nécessaire à la pénétration du cône est exprimée sous la forme d'une pression, appelée couramment « indice de cône ». Cette valeur s'exprime généralement en kilopascal (kPa) ou en bar.

Quelle est l'influence de l'humidité ?

Si la capacité de portance et l'indice de cône sont deux paramètres qui dépendent de la texture et de la structure du sol, ils sont aussi très fortement influencés par son taux d'humidité. Ce dernier joue, en effet, un rôle majeur quant aux caractéristiques mécaniques du sol.

Il est d'ailleurs facilement concevable que la résistance à la pénétration diminue lorsque le taux d'humidité augmente, ce qui se vérifie sur le terrain.

Figure 1 – Effet de la contrainte sur la structure d'un sol.⁶



Par contre, concernant la sensibilité du sol à la compaction, celle-ci ne suit pas une loi aussi linéaire, mais se présente sous la forme d'une courbe en cloche (figure 3). Globalement, la capacité de portance diminue lorsque le taux d'humidité s'amplifie. Mais il apparaîtrait cependant qu'au-delà d'un certain taux d'humidité, l'eau rende le sol incompressible.⁷

En résumé, *résistance à la pénétration* et *capacité de portance* sont deux notions bien distinctes : la première exprime l'état d'un sol à un moment donné, reflétant d'une certaine manière la compaction telle que nous la percevons dans le sens commun, puisqu'elle exprime la résistance à l'enfoncement ; la seconde est une valeur de travail pour éviter la dégradation.

On ne peut affirmer que ces valeurs physiques sont substituables l'une à l'autre et, même s'il paraît évident qu'elles sont liées d'une certaine manière, beaucoup de modélisateurs se sont cassé les dents dans l'établissement d'équations.

Il est cependant clair que la compaction résultant d'un dépassement de la capacité de portance d'un sol aboutit à l'augmentation de la résistance à la pénétration. La mesure de cette résistance à la pénétration, avant et après l'exposition à la contrainte, constitue donc une des manières de mesurer l'impact.

Si l'on appréhende facilement que la résistance à la pénétration induit des effets négatifs, la capacité de portance peut, elle, « sonner » comme une qualité : « un sol bien porteur ». Cette affirmation est vraie au niveau de la praticabilité du sol c'est-à-dire de son aptitude à la circulation d'engins, par exemple. Par contre, d'un point

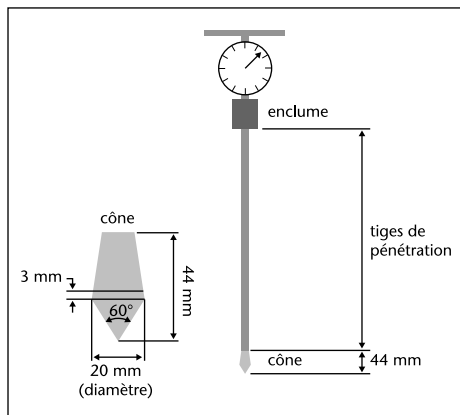


Figure 2 – Le pénétromètre est constitué d'un cône fixé à l'extrémité d'une tige en acier. L'effort pour enfoncer la tige est rapporté à la section de la base du cône.

de vue biologique, rappelons que l'augmentation de la portance d'un sol pour un taux d'humidité donné est l'expression d'une diminution de sa porosité.

Enfin, il y a peut-être lieu d'appréhender la capacité de portance d'un site d'un œil critique : s'agit-il de la capacité de portance « naturelle » du sol, ou de la résultante de la capacité initiale majorée des contraintes déjà enregistrées ? Car si tel est le cas, et si l'on souhaite que le sol récupère petit à petit sa structure initiale, il est impératif de se fixer comme valeur maximale de contrainte, celle correspondant à la capacité « naturelle » et non celle observée ; sous peine d'entretenir indéfiniment la capacité de portance à un seuil trop élevé.

PERSISTANCE DES DÉGÂTS

La compaction semble perdurer de nombreuses années. Des chiffres de plusieurs dizaines d'années sont avancés par la plupart des documents relatifs au sujet.

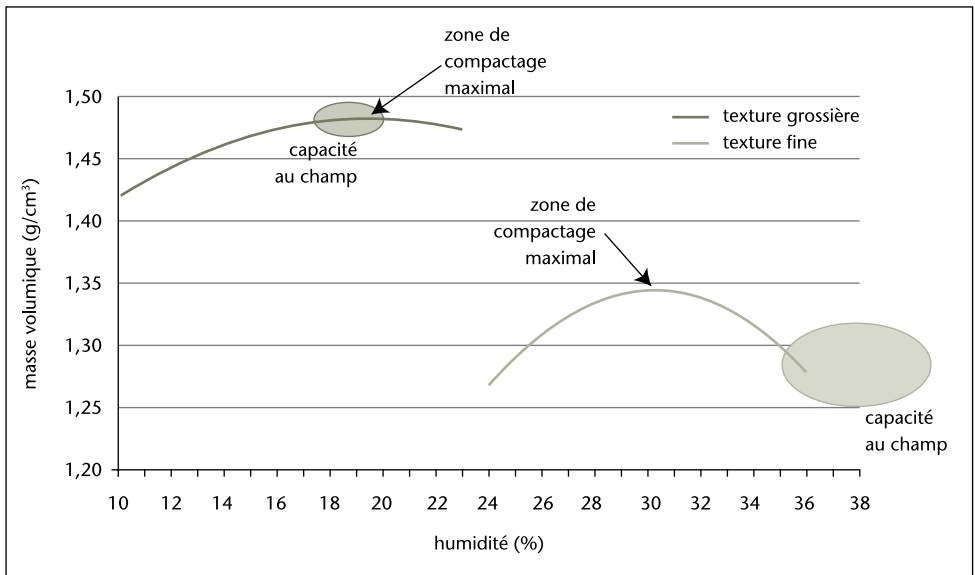


Figure 3 – Relation entre le degré de compactage (masse volumique) et l'humidité du sol suite à l'application d'une force donnée.⁷

Selon certains auteurs, il semblerait qu'en surface, celle-ci ne perdure qu'une dizaine d'années mais qu'en profondeur, elle se prolonge significativement. Une étude menée en Forêt de Soignes sur des sols ayant subi des contraintes lors d'une exploitation, montre qu'après sept années, seulement 15 % de la compression enregistrée dans la couche supérieure du sol est une conséquence de cette exploitation. Par contre, dans la couche se situant entre 30 et 60 cm de profondeur, 95 % de la compaction s'explique par l'exploitation.⁸

La résilience de cet impact en profondeur est préoccupante puisqu'il semble que les contraintes puissent se transmettre profondément. Lors d'essais de contraintes avec plusieurs types de véhicules, l'impact de leur passage en terme de porosité était dans certaines situations équivalent à 20 et à 40 cm de profondeur⁹. Enfin, la pro-

fondeur des horizons tassés est souvent importante et des cas de tassement jusqu'à 70 cm et plus ont été relevés lors de certaines études.¹⁰

Outre par les interventions humaines, la disparition d'un compactage est théoriquement régie par des phénomènes comme le gel/dégel ou l'activité biologique mais il semble que concrètement, ce ne soit que peu efficace⁷⁻¹¹. Dans le cas de sols à faible activité biologique (très acides par exemple), on peut par ailleurs craindre que la restauration structurale spontanée prenne davantage d'années.¹⁰⁻¹²

Une notion également à prendre en compte est que plus l'étendue du compactage est grande, plus le temps nécessaire à la réhabilitation du sol sera long. En effet, le compactage localisé perdure moins longtemps car son entourage, n'ayant pas subi

de contrainte, va lui apporter les éléments chimiques et biologiques lui permettant de se restructurer.

CONCRÈTEMENT

Au vu de tout cela, il apparaît qu'un sol est caractérisé par une valeur de contrainte supportable au-delà de laquelle il subit une compaction et une dégradation sensible et durable. Cette valeur seuil, appelée capacité de portance, est fonction du type de sol mais également de sa teneur en eau, de son historique, etc. Cette diminution de la capacité d'accueil du sol se caractérise et se mesure par une augmentation de la densité apparente et de la résistance à la pénétration. Cela se reflète biologiquement par une réduction des échanges gazeux et hydriques ainsi que par la diminution de la pénétrabilité du sol par les racines.

Le compactage est à l'origine d'autres phénomènes directs ou indirects. La couche imperméable créée en surface s'oppose à la percolation de l'eau qui stagne alors en mares localisées dans les ornières. Tout échange gazeux avec les parties sous-jacentes est alors très largement réduit¹³. Parallèlement, la déstructuration du sol favorise l'érosion¹⁰, elle-même accélérée par l'absence de perméabilité du sol. Enfin, de nombreux phénomènes chimiques et biologiques sont enregistrés suite aux modifications induites par la diminution voire la disparition des échanges gazeux : pertes en éléments minéraux sous forme de lessivage et pertes de composés gazeux ou solubles. Cela entraîne des modifications d'équilibres qui se traduisent ultérieurement par la modification de la composition floristique et de la microfaune.¹³

CONCLUSION

Afin de conserver la productivité d'un sol forestier, il importe donc de connaître sa capacité de portance dans le but d'estimer sa sensibilité à la compaction. Dans le domaine agricole, caractérisé par une plus grande homogénéité des sols au sein d'une parcelle, des équations ont été élaborées et permettent de définir la sensibilité des sites. Malheureusement, dans le domaine forestier, l'hétérogénéité des facteurs est plus importante et rend ce genre d'approche plus complexe.

Une tentative intéressante de détermination de la praticabilité des sols forestiers sur base de la carte des sols a été réalisée par le pédologue Ferdinand Delecour¹⁴ mais cet essai s'est heurté principalement à la question de l'humidité puisque ce facteur est apparu comme fort influant dans la capacité de portance. Pour solutionner ce problème, l'auteur proposait que soient dressés pour les types de sols les plus fréquemment rencontrés, des liens entre capacité de portance et résistance à la pénétration. Ainsi, le forestier pourrait à tout moment estimer au moyen d'un pénétromètre portable, les caractéristiques du sol.

Une alternative intéressante pour définir la praticabilité des sols, pourrait être d'étudier la végétation du sous-étage parallèlement aux caractéristiques texturales et structurales. En effet, quelques plantes sont indicatrices de l'état du sol : certaines apparaissent sur des sols compactés car elles apprécient l'eau stagnante comme *Carex remota* (laïche espacée), *Juncus effusus* (jonc épars), *Impatiens parviflora* (balsamine à petites fleurs), *Polygonum hydropiper* (poivre d'eau) ; d'autres, par

contre, voient leurs effectifs diminuer au fur et à mesure que le taux de compactage du sol augmente : *Epilobium montanum* (épilobe des montagnes), *Milium effusum* (millet diffus), *Mycelis muralis* (laitue des murailles).¹⁵

Grâce aux informations données par la carte pédologique associées à un relevé de la végétation, il serait déjà plus aisé de définir les caractéristiques d'un sol et donc ses sensibilités aux contraintes.

Mais une approche préliminaire essentielle serait peut-être l'affinement, à l'échelle régionale, des valeurs de capacité de portance des sols forestiers selon différentes conditions d'humidité. Cela nous permettrait de mieux cerner les ordres de grandeurs dans lesquels se trouvent nos sols

mais également d'évaluer les intervalles de variabilité au sein d'un même type de sol et suivant les conditions d'humidité. En effet, s'il s'avérait que l'on navigue dans des valeurs largement supérieures aux contraintes résultant de l'exploitation, il serait superflu de pousser plus loin l'analyse, si ce n'est pour des sols que l'on sait particulièrement sensibles (sols tourbeux, hydromorphes...). Dans le cas contraire, il importerait de prendre rapidement des mesures de protection... ■

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).

La perturbation des horizons superficiels ou le scalpage constituent des manifestations spectaculaires d'une exploitation inadéquate. Pourtant, il s'agit bien souvent de la partie émergée de l'iceberg à laquelle il convient d'ajouter le phénomène de compactage en profondeur. Le lissage du sol illustre la perte de porosité et donc la disparition des phénomènes d'infiltration de l'eau et de l'oxygène.



BIBLIOGRAPHIE

- ¹ DE PAUL M.-A., BAILLY M. [2005]. Effets de la compaction des sols forestiers. *Forêt Wallonne* 76 : 48-57.
- ² 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* 2 : 124-137.
- ³ GYSI M. [2001]. *Compactage du sol : préconsolidation à titre de mesure de stabilité*. Rapports de la FAT, n° 566, 8 p.
- ⁴ COFIE P., KOOLEN A.J., PERDOK U.D. [2000]. Measurement of stress-strain relationship of beech roots and calculation of the reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems. *Soil & Tillage Research* 57 : 1-12.
- ⁵ HORN R., ALBRECHTS C. [2002]. *Stress strain dependent changes of soil structure in arable and forest soils : consequences for the environment*. Institute of Plant Nutrition and Soil Science, 9 p.
- ⁶ SAARILAHTI M. [2002]. *Soil Interaction Model. Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD)*. 85 p.
- ⁷ 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.
- ⁸ ROHAND K., AL KALB A., HERBAUTS J., VERBRUGGE J.-C. [2004]. Changes in some mechanical properties of a loamy soil under the influence of mechanized forest exploitation in a beech forest of central Belgium. *Journal of Terramechanics* 40 : 235-253.
- ⁹ HORN R., VOSSBRINK J., BECKER S. [2004]. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil & Tillage Research* 79 : 207-219.
- ¹⁰ CACOT E. [2001]. Exploitation forestière et débardage : pourquoi et comment réduire les impacts ? AFOCEL, *Fiche Informations-Forêt* 637, 6 p.
- ¹¹ 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 a New Zealand forest. *Silva Fennica* 38(3) : 279-289.
- ¹² HERBAUTS J., ROHAND K., VAN MOLLE M., VERBRUGGE J.-C. [2000]. Effets du débardage sur les propriétés physiques et mécaniques d'un sol lessivé sur loess en Forêt de Soignes. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 4(3) : 181-189.
- ¹³ ABEELS P.F.J. [1995]. *Les engins en forêt et l'environnement*. UCL, Faculté des Sciences Agronomiques, Unité de Génie Rural. 9 p.
- ¹⁴ DELECOUR F. [1987]. Carte des sols et praticabilité des terrains forestiers en Belgique. *Pédologie* 37(3) : 299-320.
- ¹⁵ GODEFROID S., KOEDAM N. [2003]. Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. *Biological conservation* 119 : 207-217.

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