

Guide de bonnes pratiques pour éviter la
compaction des sols forestiers wallons

La compaction des sols forestiers en Wallonie

SERVICE PUBLIC de WALLONIE

**DIRECTION GENERALE OPERATIONNELLE AGRI-
CULTURE, RESSOURCES NATURELLES ET
ENVIRONNEMENT**

**Direction de la Protection des Sols
Département de la Nature et des Forêts
Département de l'Etude du Milieu Naturel et
Agricole**

**UNIVERSITE DE LIEGE
(Gembloux Agro-Bio Tech)**



La compaction des sols forestiers en Wallonie

COMMANDITAIRE :

SERVICE PUBLIC de WALLONIE, DIRECTION GENERALE OPERATIONNELLE AGRICULTURE, RESSOURCES NATURELLES ET ENVIRONNEMENT

- Direction de la Protection des Sols
- Département de la Nature et des Forêts
- Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole

Avenue Prince de Liège, 15
B-5100 NAMUR

AUTEUR :

M.-F. Destain,
Département des Sciences et Technologies de l'Environnement,
ULg (Gembloux Agro-Bio Tech),
2 Passage des Déportés,
5030 Gembloux.

DATE:

Octobre 2013

REFERENCE:

ISBN:

AUTRE DOCUMENT DU MEME AUTEUR EDITE PAR LE COMMANDITAIRE :

La compaction des sols agricoles en Wallonie

Table des matières

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	6
2. LA COMPACTION DES SOLS : QU'EST-CE QUE C'EST ?	8
3. LA COMPACTION DES SOLS : UN PROBLÈME MULTIDISCIPLINAIRE.....	10
3.1. LES CARACTÉRISTIQUES DU SOL.....	10
3.1.1. <i>La texture du sol.....</i>	<i>10</i>
3.1.2. <i>La teneur en eau du sol.....</i>	<i>11</i>
3.1.3. <i>La structure du sol.....</i>	<i>12</i>
3.1.4. <i>La matière organique.....</i>	<i>13</i>
2. LE PASSAGE DE VÉHICULES	13
3.2.1. <i>Surface de contact, pression de gonflage, pression de contact moyenne.....</i>	<i>13</i>
3.2.2. <i>Charge sur la roue.....</i>	<i>15</i>
3.2.3. <i>Intensité du trafic, vitesse.....</i>	<i>16</i>
3. LES MODES D'EXPLOITATION FORESTIÈRE	17
3.3.1. <i>Le système d'exploitation (bois court ou long).....</i>	<i>17</i>
3.3.2. <i>La période d'intervention.....</i>	<i>21</i>
4. LES CONSÉQUENCES DE LA COMPACTION DES SOLS FORESTIERS	22
4.1. EFFETS SUR LES PROPRIÉTÉS DU SOL.....	22
4.2. EFFETS SUR L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE	23
4.3. EFFET SUR LES PEUPELEMENTS.....	23
4.4. PERSISTANCE DES PERTURBATIONS DUES À LA COMPACTION.....	24
5. LA MESURE DE LA COMPACTION	25
5.1. MASSE VOLUMIQUE, POROSITÉ TOTALE.....	26
5.2. CONTRAINTE DE PRÉCONSOLIDATION.....	27
5.3. MESURES INDIRECTES.....	29
6. LA SENSIBILITÉ À LA COMPACTION DES SOLS DE WALLONIE	31
6.1. MÉTHODOLOGIE	31
6.2. CARTES DE SENSIBILITÉ A LA COMPACTION DES SOLS DE WALLONIE	33
6.2.1. <i>Masse volumique apparente sèche.....</i>	<i>33</i>
6.2.2. <i>Contrainte de préconsolidation.....</i>	<i>35</i>
7. LES RISQUES DE COMPACTION DES SOLS FORESTIERS.....	38
8. LA PRÉVENTION DE LA COMPACTION EN SOLS FORESTIERS	47
8.1. RÉDUCTION DE LA CHARGE À L'ESSIEU.....	47
8.2. UTILISATION D'ÉLÉMENTS DE ROULEMENT AVEC UNE GRANDE SURFACE DE CONTACT AU SOL	48
8.3. TRAVAIL EN CONDITIONS D'HUMIDITÉ FAVORABLES	48
8.4. ADOPTION DE MÉTHODES D'EXPLOITATION FORESTIÈRE ADAPTÉES.....	49
9. GLOSSAIRE	50
10. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	52

1. Introduction générale

Dans nos pays industrialisés, l'exploitation forestière fait appel à des machines de plus en plus lourdes pour assurer la vidange des coupes et le débardage des grumes. Lorsque des charges élevées sont appliquées sur des sols sensibles, une compaction du sol peut se produire entraînant une réduction de porosité, avec des conséquences néfastes sur la vitalité des peuplements.

Au niveau environnemental, du fait de la compaction, l'infiltration de l'eau dans le sol est réduite, principalement dans l'horizon superficiel. Une accumulation de l'eau à la surface du sol avec un accroissement des écoulements latéraux et du ruissellement peut apparaître. Il en résulte une augmentation des risques d'inondation et de pollution de surface provenant de l'application d'intrants. Le risque d'érosion sur des sols en pente, même faible, est également accru.

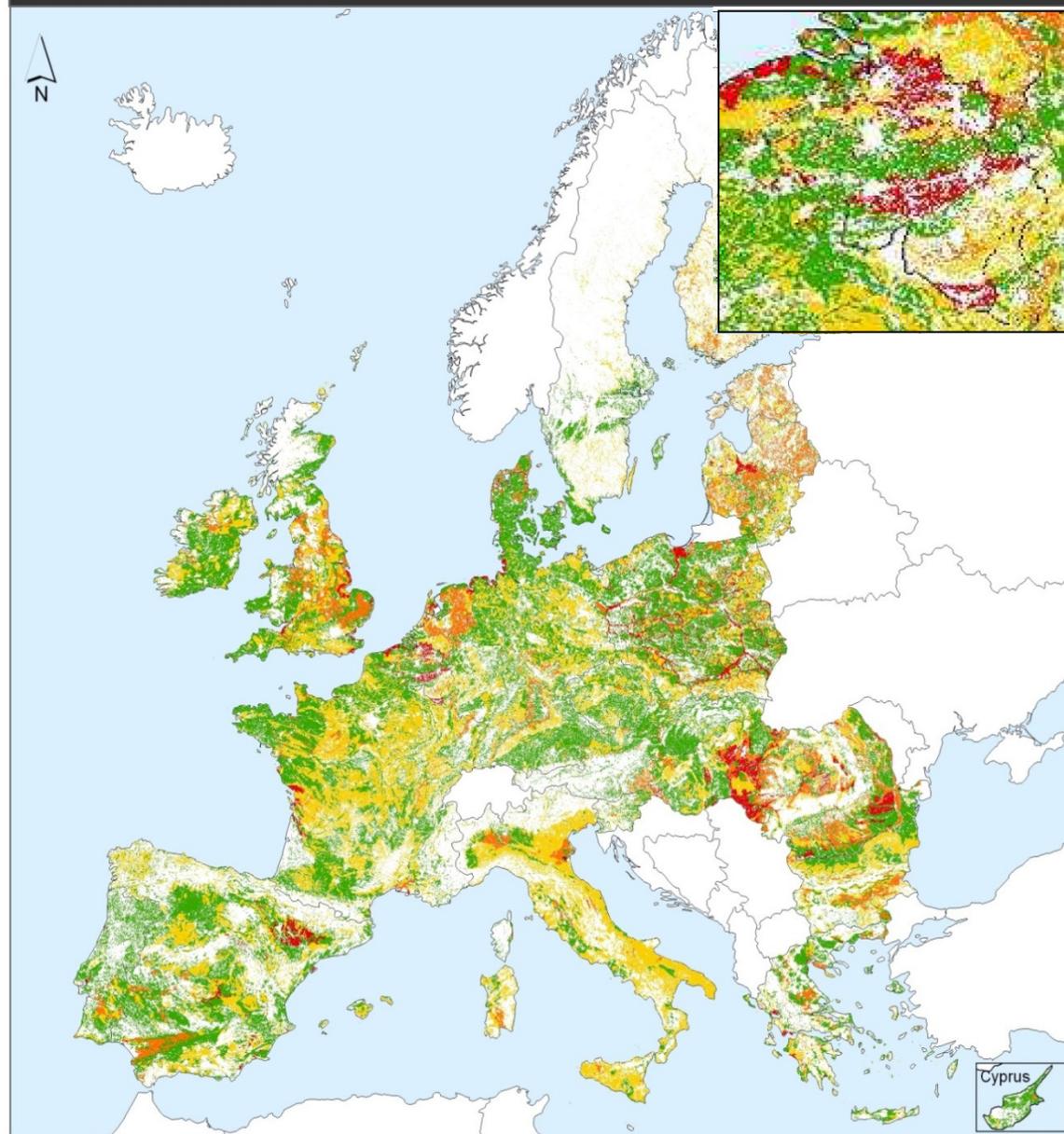
En Europe, on estime que 32 % des couches profondes de sol sont largement dégradées [1]. A l'inverse de l'érosion ou de la salinisation qui montrent des signes visibles de dégradation, les effets néfastes de la compaction ne sont pas immédiatement perceptibles. Du fait que la compaction des horizons profonds (au-delà de 30 cm) est un phénomène difficilement réversible par régénération naturelle et que les méthodes de restauration artificielles ne sont pas toujours couronnées de succès, l'Union Européenne considère la compaction comme l'un des facteurs majeurs de la dégradation physique des sols [2].

Le projet de Directive européenne COM(2006)232 amendé par la note 16157/07 du 14 décembre 2007 établit un cadre général pour la protection des sols. Ce projet prévoit notamment que les Etats membres, dont fait partie la Belgique, identifient sur leur territoire les zones susceptibles de présenter des processus de dégradation du sol (érosion, perte de matière organique, compaction, salinisation, contamination et perte de biodiversité). Une fois les zones à risque identifiées, les Etats membres doivent proposer des objectifs de réduction des risques ainsi que des mesures concrètes permettant de les atteindre. Ils sont libres de fixer leurs propres objectifs et de décider comment et quand les atteindre. Le projet SoCo [3] a établi une cartographie de la sensibilité des sols européens à la compaction (Fig. 1). Cependant, étant donné sa faible résolution, cette carte ne permet pas de se faire une idée précise de la situation en Wallonie.

Par ailleurs, le Code Forestier Wallon entré en vigueur le 13 septembre 2008 [4] prévoit explicitement l'interdiction d'occasionner des dégâts au sol qui pourraient avoir des conséquences à long terme sur la vitalité des peuplements.

Dans ce cadre, la Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement du SPW a décidé de mettre en œuvre une étude pour analyser de manière plus précise les risques de compaction des sols en Wallonie.

The natural susceptibility of soils to compaction



Natural susceptibility to compaction

- No soil
- Low
- Medium
- High
- Very high
- No evaluation

This map shows the natural susceptibility of agricultural soils to compaction if they were to be exposed to compaction. The evaluation of the soil's natural susceptibility is based on the creation of logical connections between relevant parameters (pedotransfer rules). The input parameters for these pedotransfer rules are taken from the attributes of the European soil database, e.g. soil properties: type, texture and water regime, depth to textural change and the limitation of the soil for agricultural use. Besides the main parameters auxiliary parameters have been used as impermeable layer, depth of an obstacle to roots, water management system, dominant and secondary land use. It was assumed that every soil, as a porous medium, could be compacted.

MAP INFORMATION

Spatial coverage: 27 Member States of the European Union where data available.
 Pixel size: 1km
 Projection: ETRS89 Lambert Azimuthal Equal Area
 Input data - source
 Soil data - European Soil Database v2
 Land Use - CORINE Land Cover 2000

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION

Author: Beata Houšková
 For more information:
 Beata Houšková, European Commission,
 Institute of Environment and Sustainability,
 Land Management and Natural Hazards Unit,
 Ispra, Italy.
 Email: beata.houskova@jrc.it
 Digital datasets can be downloaded from
<http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/>



© European Communities, 2008

Fig. 1. Sensibilité à la compaction des sols européens [3].

2. La compaction des sols : qu'est-ce que c'est ?

Sous l'effet de charges, telles que le passage de machines, se produit un réarrangement des constituants du sol, qui donne lieu à la formation de couches denses et à une modification de la géométrie des pores que l'on désigne sous le nom de compaction (Fig. 2).

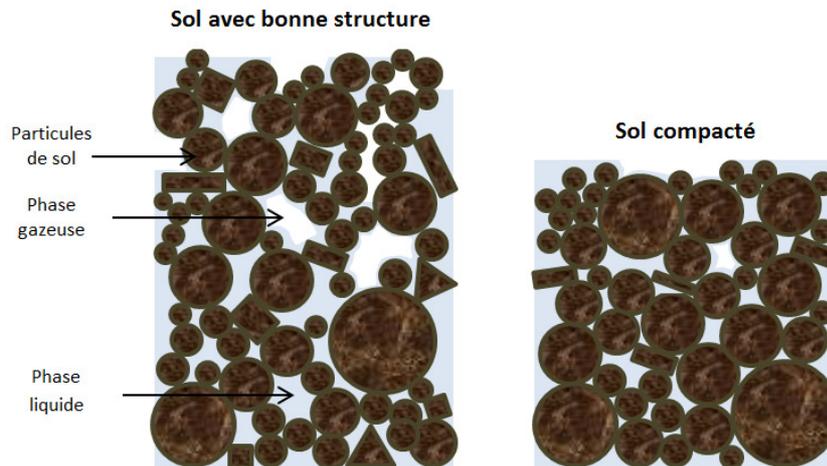


Fig. 2. A gauche : sol non compacté ; à droite : sol compacté.

Pour quantifier la compaction, on utilise le plus souvent des critères tels que l'augmentation de masse volumique apparente sèche γ_d , la réduction de porosité n et l'augmentation de contrainte de préconsolidation P_c .

γ_d est le rapport de la masse des grains m_s au volume de sol V . La porosité totale n est le volume des vides du sol exprimé en pourcentage du volume du sol. On distingue la microporosité de la macroporosité, la limite se situant à des tailles de pores de 6 à 10 μm . La macroporosité assure la circulation de l'air et de l'eau gravitaire. Dans la microporosité, l'eau est retenue dans le sol et il faut différencier d'une part les pores de taille inférieure à 0.2 μm (porosité matricielle) qui retiennent de l'eau non utilisable par les végétaux et d'autre part les pores compris entre 0.2 et 6 à 10 μm (micropores) qui représentent la réserve d'eau utile pour les plantes [5].

La contrainte de préconsolidation P_c caractérise la résistance mécanique du sol. Elle est définie à partir d'un essai de déformation uniaxiale. Dans celui-ci, l'indice des vides décroît avec le logarithme de la contrainte appliquée selon une droite A (Fig. 3), connue sous le nom de ligne vierge. Celle-ci correspond à une déformation plastique (irréversible). Si, à un moment donné, la contrainte diminue, la relation contrainte - déformation suit les courbes B et C qui traduisent un comportement élastique (réversible) du sol, même si une certaine hystérésis existe.

Les sols forestiers se trouvent dans un état de contrainte correspondant à une courbe du type B ou C. Tant que la contrainte appliquée est inférieure à σ_1 , le comportement du sol est élastique. Par contre, lorsque la contrainte devient supérieure à σ_1 , le chemin de contrainte suit la droite D de manière irréversible jusqu'à atteindre un nouvel état correspondant par exemple aux courbes B' et C' : c'est la compaction [6, 7].

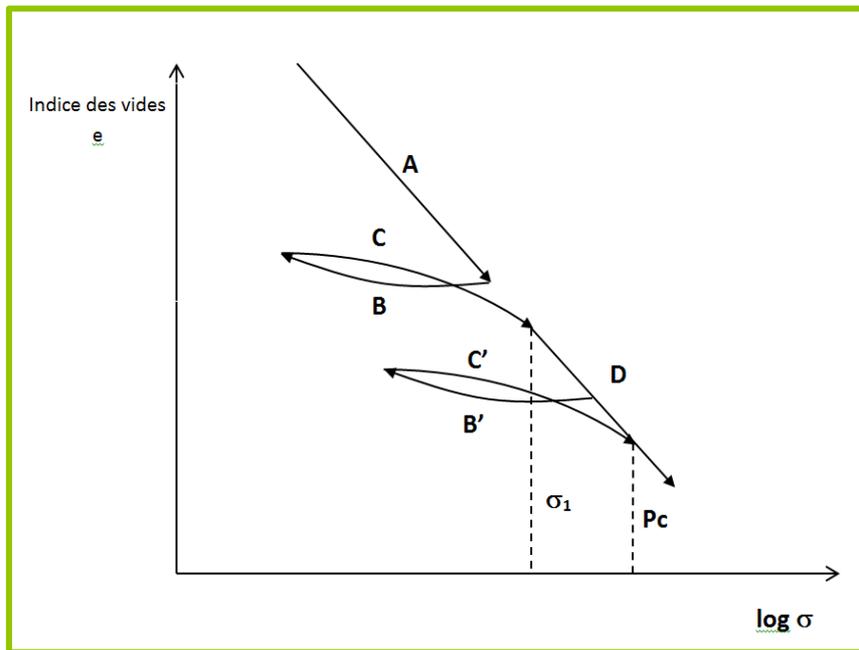


Fig. 3. Comportement d'un sol : indice des vides en fonction du logarithme de la contrainte appliquée, à une teneur en eau donnée.

La contrainte la plus élevée à laquelle un sol a été soumis dans le passé et dont il a gardé la mémoire est connue sous le nom de contrainte de préconsolidation ou contrainte de précompression.

Outre les phénomènes de compaction proprement dits, plusieurs phénomènes spécifiques liés au passage de machines peuvent intervenir en sols forestiers [8, 9] :

- **Le scalpage** : c'est l'arrachage et la destruction de la litière provoqué par le glissement des roues motrices ou le trainage des grumes sans parage. La cohésion entre les agrégats du sol augmente en raison de leur glissement les uns par rapport aux autres. Il peut en résulter une structure lamellaire horizontale (Fig. 4).
- **L'orniérage** : il s'agit du creusement du sol jusqu'à 30 cm de profondeur, suite au passage d'engins forestiers. Les monticules de terre formés de part et d'autres des traces de passage sont appelés « bourrelets ».
- **Le martelage** : c'est l'effet de tassement de surface dû aux passages répétés d'engins avec des charges lourdes sur un sol sec. Ce phénomène se traduit par une couche dure proche de la surface. Ce phénomène est réversible.



Fig. 4. Scalpage.

3. La compaction des sols : un problème multidisciplinaire

La compaction, et la modification des propriétés du sol qui y sont liées, résulte de l'application de forces généralement dues au passage d'engins. Certains sols sont plus sensibles que d'autres à la compaction, compte tenu de leur texture, de leur teneur en eau, de leur structure et de leur contenu en matière organique. L'exploitation forestière a une double influence. En fonction du calendrier des opérations et du mode d'exploitation, les propriétés initiales du sol peuvent varier. Par ailleurs, les caractéristiques des véhicules qui se déplacent en forêt dépendent du mode d'exploitation (débardage par porteur ou par débusqueur) (Fig. 5).

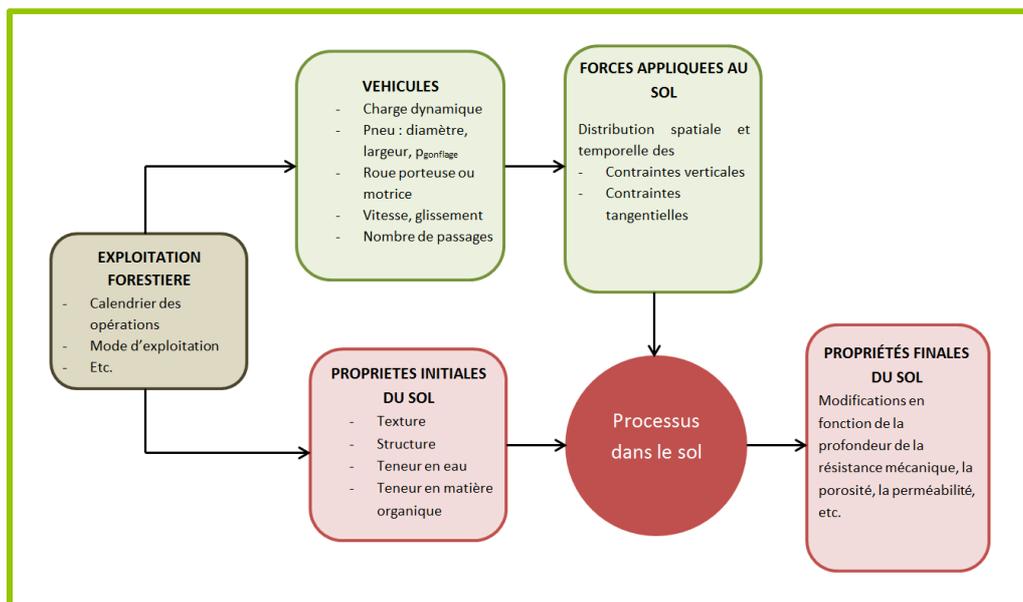


Fig. 5. Relations entre les propriétés finales du sol, les propriétés initiales et les forces appliquées.

3.1. Les caractéristiques du sol

Un sol est constitué d'éléments minéraux (sable, limon, argile) qui proviennent de l'altération de la roche mère et de composés organiques issus principalement de la décomposition des végétaux.

3.1.1. La texture du sol

La texture indique l'abondance relative, dans le sol, de particules de dimensions variées: argile (< 0.002 mm), limon (0.002 à 0.05 mm) et sable (0.05 à 2 mm). La Fig. 6 représente les classes texturales dans le diagramme triangulaire FAO/HYPRES.

La sensibilité des sols à la compaction dépend de la texture (Woods *et al.*, 1944, cité par [3]): elle augmente en partant du sable (le moins sensible) vers l'argile (la plus sensible), selon :

sable limoneux < limon sableux < limon < limon argileux < argile limoneuse < argile

La présence d'une charge caillouteuse diminue la sensibilité à la compaction. En effet, les éléments grossiers (graviers, cailloux, pierres, ...) supportent une partie de la charge exercée par les engins sur le sol, ce qui évite le tassement de la terre fine.

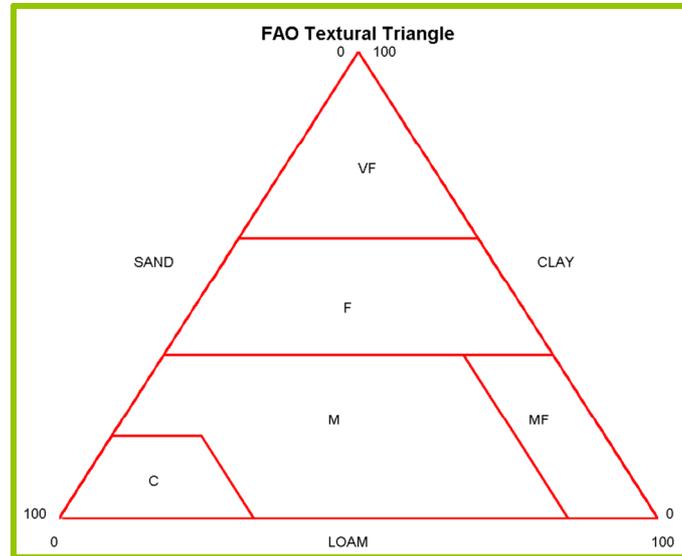


Fig. 6. Triangle textural FAO/HYPRES – Sand (sable), Loam (limon), Clay (argile)
 C = coarse (texture grossière), M (texture moyenne), MF (texture moyenne fine), F (texture fine), VF (texture très fine).

3.1.2. La teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol influence fortement la sensibilité à la compaction. En effet, le mouvement des particules de sol est d'autant plus limité que la succion est élevée, c'est-à-dire que le sol est sec. Il en résulte qu'un sol sec est plus difficilement compacté qu'un sol humide. Toutefois, si la teneur en eau augmente jusqu'à remplacer tout l'air occupant les pores, le sol ne peut plus être compacté car l'eau est quasiment incompressible et, dans les sols fins, s'écoule lentement. L'essai Proctor permet d'estimer la teneur en eau critique pour laquelle le tassement est maximal, à une énergie de compression donnée (Fig. 7).

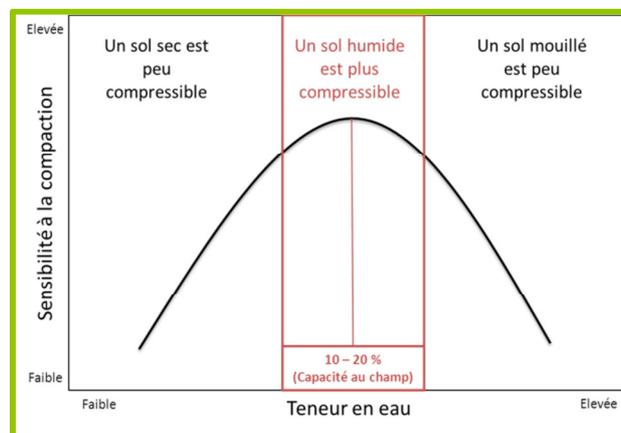


Fig. 7. Sensibilité du sol à la compaction en fonction de la teneur en eau.

Si la teneur en eau d'un échantillon de sol diminue, le sol passe successivement d'un état liquide (sa résistance au cisaillement est nulle) à un état plastique (le sol est stable mais est sujet à des déformations irréversibles), puis à un état solide (sous l'effet d'une force, les déformations sont faibles) (Fig. 8).

Les limites d'Atterberg traduisent conventionnellement ces différences de comportement du sol en fonction de la teneur en eau : la limite de liquidité w_l caractérise la transition entre l'état plastique et l'état liquide; la limite de plasticité w_p caractérise la transition entre l'état solide et l'état plastique. L'indice de plasticité $I_p = w_l - w_p$ mesure l'intervalle de teneurs en eau à l'intérieur duquel on doit s'attendre à un comportement plastique du matériau. L'indice de consistance est défini par $I_c = (w_l - w) / I_p$, w étant la teneur en eau pondérale. L'expérience des terrassements montre que, lorsque I_c est inférieur à 0.7, la trafficabilité devient problématique, tandis que pour I_c supérieur à environ 1.3, le sol est difficile à compacter. Transposée à la compaction des sols forestiers, cette notion indique que le sol est sensible à la compaction lorsque I_c est compris entre 0.7 et 1.3.

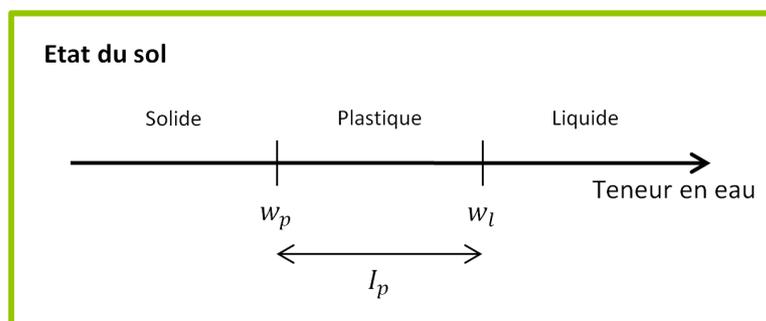


Fig. 8. Comportement du sol en fonction de la teneur en eau et limites d'Atterberg : limite de plasticité (w_p) et de liquidité (w_l), indice de plasticité (I_p).

3.1.3. La structure du sol

La structure décrit la manière dont les constituants du sol s'assemblent pour constituer des agrégats, autour desquels les racines peuvent se développer, et l'air et l'eau se déplacer.

La stabilité structurale des sols forestiers est liée à la nature et à l'abondance de l'argile et de l'humus



qui jouent le rôle de 'ciments' vis-à-vis des particules plus grossières, ainsi qu'à l'activité biologique [10]. Le maintien d'une bonne structure est essentiel pour assurer des propriétés physiques favorables, en permettant une perméabilité et une aération satisfaisantes et en assurant la formation de réserves d'eau emprisonnées par capillarité dans les pores. Une bonne structure prévient aussi toute évolution pédologique défavorable en limitant les phénomènes de lessivage ou de lixiviation.

Fig. 9. Analyse de la structure du sol.

3.1.4. La matière organique

Les matières organiques d'un sol proviennent essentiellement de la décomposition des végétaux. Lorsque les plantes meurent, elles se transforment en matière organique qui sera soit minéralisée, soit stockée sous forme d'humus.

Dans les sols forestiers, comme cela a été dit plus haut, l'humus joue un rôle important dans la stabilité de la structure. Pour une contrainte donnée, une teneur élevée en humus augmente l'élasticité du sol et réduit sa sensibilité à la compaction [11].

Par ailleurs, la présence de racines vivantes et, dans une moindre mesure de racines mortes, procure au sol une sorte de réseau filamenteux qui le rend moins compressible. La présence d'une épaisse couche de déchets ligneux sous la canopée peut jouer un rôle de protection durant le passage d'engins lourds.

2. Le passage de véhicules

Lorsqu'une roue se déplace sur le sol, elle engendre des contraintes qui provoquent une déformation du sol (Fig. 10). Cette déformation est particulièrement visible en surface, où apparaît une ornière dont la profondeur est fonction de l'état structural initial du sol. Les contraintes verticales se transmettent dans les couches profondes du sol. Les contraintes tangentielles qui équilibrent les efforts de traction s'exercent surtout dans l'horizon superficiel [12].

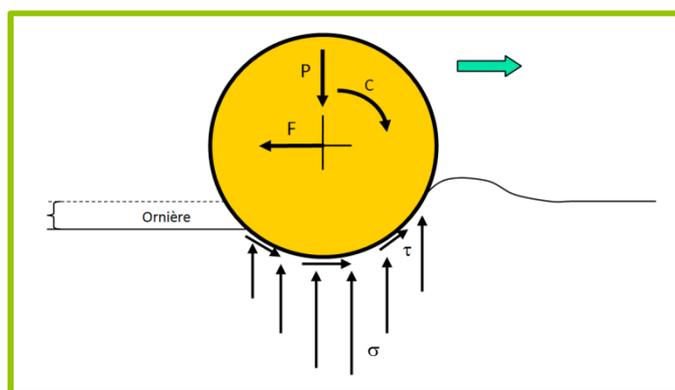


Fig. 10. Equilibre d'une roue motrice. C = couple, P = charge verticale, F = effort de traction, σ = contraintes verticales, τ = contraintes tangentielles.

L'interaction pneu-sol est un phénomène complexe et encore mal connu avec précision. Cette complexité est notamment liée au fait qu'un sol présente une succession d'horizons avec des lois de comportement différentes, qui varient en fonction de la teneur en eau.

3.2.1. Surface de contact, pression de gonflage, pression de contact moyenne

La pression de contact moyenne p_{cont} est égale au poids sur la roue divisé par l'aire de contact pneu - sol. C'est une estimation des contraintes verticales dans la zone de contact. En réalité, les contraintes

verticales sous un pneu n'ont pas une distribution uniforme, elles sont maximales sous les crampons ou sous les flancs du pneu, où elles peuvent atteindre 4 à 10 fois la pression moyenne [13, 14]. La Fig. 11 représente la distribution des contraintes verticales modélisée à l'interface pneu- sol [15]. Dans les deux cas, la charge est de 6000 kg et on voit clairement que les contraintes ne sont pas uniformes mais présentent des pics à l'appui des flancs sur le sol. A gauche, le pneu modélisé est un 650R38 supportant la charge à une pression de gonflage de 120 kPa (1.2 bar). A droite, le pneu utilisé est plus large, il s'agit d'un 800R38 dont la pression de gonflage est de 100 kPa (1 bar). Les contraintes verticales à l'interface atteignent 200 kPa avec le pneu 650R38, alors qu'elles ne dépassent pas 140 kPa avec le 800R38.

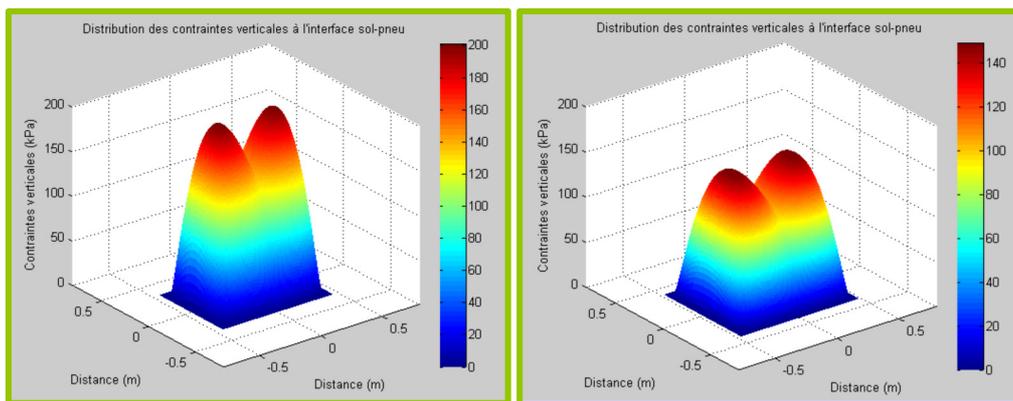


Fig. 11. Distribution des contraintes verticales à l'interface sol - pneu - Charge = 6000 kg. A gauche, pneu 650R38, pression de gonflage = 1.2 bar ; à droite, pneu 800R38, pression de gonflage = 1 bar.

A charge égale, il est donc intéressant d'augmenter l'aire de contact pour uniformiser les contraintes verticales **dans la zone de contact pneu-sol**, réduire la pression de contact moyenne et diminuer la déformation du sol. Cela peut se faire en utilisant des pneus larges qui permettent de supporter une charge donnée en diminuant la pression de gonflage, tout en respectant les prescriptions du manufacturier, comme le schématise la Fig. 12. L'utilisation de chenilles permet également de réduire les contraintes verticales à l'interface avec le sol.

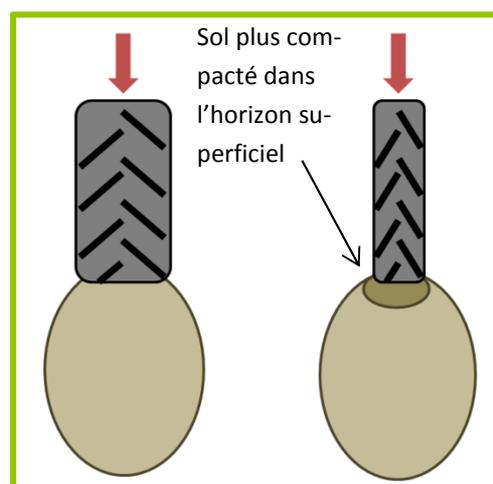


Fig. 12. A charges égales, une roue large permet d'uniformiser les contraintes verticales dans la zone de contact et de réduire la compaction dans l'horizon superficiel.

Remarque : La pression de contact moyenne p_{cont} est parfois évaluée à partir de la pression de gonflage p_g . Il s'agit d'une approximation assez grossière car la relation entre les deux pressions p_{cont} et p_g dépend de la raideur du pneu et des conditions de sol.

Par ailleurs, dans les horizons superficiels, le sol est d'autant plus sensible à la compaction qu'il est soumis à des contraintes tangentielles, résultant d'efforts de traction importants [12].

3.2.2. Charge sur la roue

Lorsque la charge sur un pneu augmente, la pression de gonflage doit être augmentée conformément aux prescriptions des fabricants. La Fig. 13 donne la modélisation des contraintes dans le sol créées par un pneu 650R38 supportant d'une part une charge de 5730 kg à 100 kPa (1 bar) et d'autre part 8030 kg à 240 kPa (2.4 bar). A 40 cm de profondeur, dans le premier cas, les contraintes verticales sont de l'ordre de 200 kPa. Dans le deuxième cas, elles atteignent des valeurs de 300 kPa.

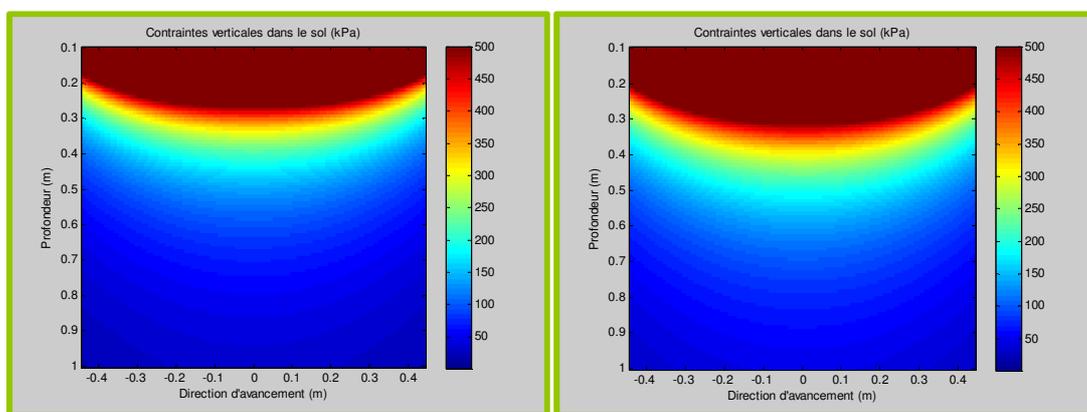


Fig. 13. Distribution des contraintes verticales dans le sol – Pneu 650R38
A gauche, charge = 5730 kg, pression de gonflage = 1 bar ;
à droite, charge = 8030 kg, pression de gonflage = 2.4 bar.

Ces résultats vont dans le même sens que des mesures effectuées par Lamandé et Schjønning (2011) dans un Luvisol, dans des conditions défavorables [16]. Lorsque le sol se trouve à la capacité au champ, on mesure encore, à une profondeur de 90 cm, des contraintes verticales de l'ordre de 30 kPa (0.30 bar) sous une charge de 3 t et des contraintes de 60 kPa (0.60 bar) sous une charge de 6 t.

L'intensité des contraintes verticales qui existent **en profondeur** est donc directement corrélée à la charge sur le pneumatique, ce qui est schématisé à la Fig. 14.

Remarque : Dans l'évaluation de la charge sur la roue, c'est la charge 'dynamique', au travail, qu'il faut prendre en compte. Elle tient compte des transferts de charge dus au fait qu'un outil est tiré ou porté et des éventuels effets de chocs liés au déplacement sur une surface inégale, sur des souches, ...

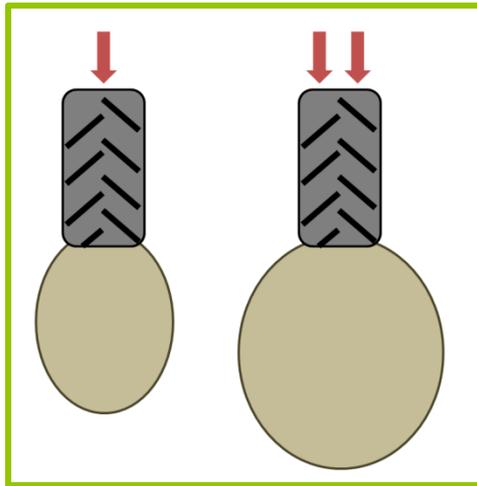


Fig. 14. Pour des pneus identiques, une augmentation de charge donne lieu à des contraintes verticales qui se transmettent à plus grande profondeur.

3.2.3. Intensité du trafic, vitesse

L'intensité du trafic joue un rôle important dans la compaction du sol. En effet, la déformation augmente avec le nombre de passages des engins même si les premiers passages sont responsables de la plus grande partie de la compaction. La compaction des horizons profonds induite par un trafic répété est particulièrement problématique parce qu'elle constitue un processus additif et induit des effets à longue durée, difficiles à corriger.

Exemple. Des mesures de masse volumique ont été effectuées en forêt d'Anlier à 15 cm de profondeur, pour analyser l'impact de débardeuses forestières [15]. La forêt de Rulles est une hêtraie, développée sur un limon caillouteux à charge schisto-phylleuse et à drainage naturel quasi exclusivement favorable.

Dans l'horizon superficiel, avant passage des machines, la masse volumique à proximité de la surface est proche de 1 Mg/m^3 . Selon l'USDA Services, cette valeur peut être considérée comme bonne pour la croissance des arbres [17]. Après 15 passages, la masse volumique a augmenté de manière significative, pour un débusqueur Timberjack TJ360C et un porteur Timberjack TJ810D (Fig. 15).

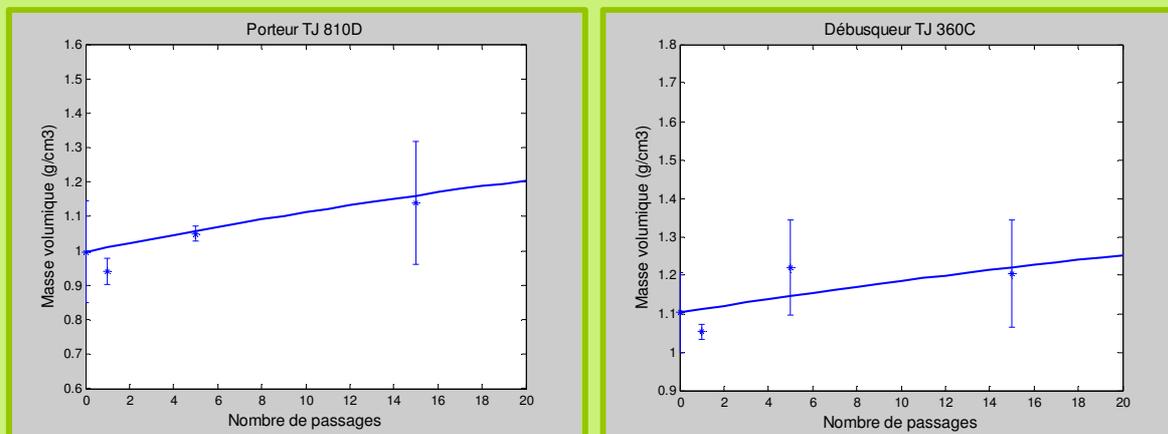


Fig. 15. Effet de passages multiples d'un porteur Timberjack 810D et d'un débusqueur TJ 360C sur la masse volumique, à 15 cm de profondeur (Forêt d'Anlier).

Par contre, l'effet de la vitesse est favorable, puisque quand la vitesse augmente, la propagation des contraintes dans le sol a moins de temps pour se produire et les contraintes exercées en profondeur diminuent. Il semble que l'effet positif de l'augmentation de vitesse soit plus important sur un sol lâche que sur un sol dense [18].

- *A charge constante, l'utilisation de pneus larges à basse pression permet de répartir les contraintes sur une plus grande surface dans l'horizon superficiel.*
- *Pour un pneu donné, une augmentation de charge donne lieu à des contraintes verticales qui se transmettent à une profondeur plus importante.*
- *Globalement, le risque de compaction des couches profondes est élevé lorsque des véhicules supportant des charges importantes se déplacent sur des sols humides.*

3. Les modes d'exploitation forestière

3.3.1. Le système d'exploitation (bois court ou long)

Une étude réalisée par le Fonds d'Etudes et de Recherches des Exploitations Forestières (FEREF) a permis d'identifier les principaux types de machines utilisées pour l'exploitation forestière en Wallonie à partir desquelles ont été établies des recommandations d'utilisation des machines en fonction des peuplements et de la station [19]. On trouve principalement des skidders (débardeuses-débusqueuses), des porteurs, des abatteuses, des pelles mécaniques ou des tracteurs agricoles transformés.

Les abatteuses sont utilisées dans les opérations de coupe, d'ébranchage et de tronçonnage des arbres et, plus particulièrement, des résineux (Fig. 16). Pour le débardage des arbres entiers, on trouve des débusqueurs à pince (Fig. 19) ou à câble (Fig. 17). Les porteurs sont utilisés pour le débardage de bois courts (Fig. 18).

- **Masse des engins**

Les engins d'exploitation forestière sont lourds, leur masse à vide varie de 10 à 20 tonnes. En cours de travail, les essieux des porteurs sont alourdis par la charge transportée. Par contre, pour les débusqueurs qui tirent une grume, l'essieu arrière est alourdi tandis que l'essieu avant est allégé du fait du mécanisme de transfert de charge (voir Exemples aux Tableaux 1 et 2).

- **Pression de contact moyenne, glissement**

Comme cela a été dit plus haut, dans les véhicules équipés de roues, il est intéressant de réduire la pression de contact pour diminuer la déformation du sol. En divisant la charge sur la roue par la surface moyenne de contact, on arrive, pour la plupart des engins modernes, à des pressions de contact moyennes qui dépassent 100 kPa pour l'un ou l'autre essieu. Certaines machines forestières sont équipées de chenilles afin de réduire la pression au sol.

Ici aussi, il faut différencier les porteurs des débusqueurs : les premiers exercent essentiellement des contraintes normales sur le sol, tandis que les seconds engendrent également des contraintes tangentielles d'autant plus importantes que le poids de la grume à tirer est élevé. Il peut en résulter un cisaillement des couches superficielles du sol. En outre, les débusqueurs trainent l'arbre entier sur le sol avec pour conséquence de balayer l'humus et la litière et d'exposer le sol minéral brut (phénomène de scalpage).

- **Châssis articulés**

La plupart des engins modernes utilisés en exploitation forestière ont un châssis articulé, ce qui permet d'améliorer l'adhérence en épousant au mieux le relief du sol.



Fig. 16. Abatteuse.



Fig. 17. Débusqueur à câble.

Exemple 1. Soit un porteur Timberjack TJ 810D. Il s'agit d'un véhicule dont la masse à vide est de 12.6 t répartie sur quatre essieux. Quand il est chargé par 15 stères de bois de 2 m de long, sa masse totale en charge est de 23.7 t, répartie sur 4 essieux (Tableau 1). La contrainte verticale moyenne au sol varie de 85 à 128 kPa [15].



Fig. 18. Porteur Timberjack TJ 810D.

Tableau 1. Répartition des charges sur un engin de débardage de type porteur.

Type de machine		Essieu 1	Essieu 2	Essieu 3	Essieu 4
Porteur Timberjack TJ 810D	Masse à vide (kg)	4470	4005	1935	2225
	Masse en charge (kg)	4760	4895	6910	7165
	Type de pneus	700/22.5	700/22.5	700/22.5	700/22.5
	Pression de gonflage (kPa)	400	400	400	400
	Contrainte normale moyenne à l'interface (kPa)	85	87	123	128

Exemple 2. Soit un débusqueur à pince Timberjack TJ 360C. Il s'agit d'un véhicule dont la masse à vide est de 13.4 t répartie sur 2 essieux, soit 6.4 t et 7.0 t. En charge, lorsqu'il tire une grume de hêtre de l'ordre de 5.5 m³, les masses mesurées sur l'essieu avant et sur l'essieu arrière sont respectivement de 5.6 t et 10.9 t, ce qui illustre le mécanisme de transfert de charge lié à la traction. La pression moyenne à l'interface pneu-sol est de 86 kPa à l'essieu avant et 168 kPa à l'essieu arrière (Tableau 2).



Fig. 19. Débusqueur à pince Timberjack TJ 360C.

Tableau 2. Répartition des charges sur un engin de débardage de type débusqueur.

Type de machine		Essieu avant	Essieu arrière
Débusqueur Timberjack TJ 360 C	Masse à vide (kg)	6405	7025
	Masse en charge (kg)	5570	10910
	Type de pneus	28.1/26	28.1/26
	Pression de gonflage (kPa)	200	200
	Contrainte normale moyenne à l'interface (kPa)	86	168

3.3.2. La période d'intervention

Dans beaucoup de cas, le débardage s'effectue dans de mauvaises conditions météorologiques ou, à tout le moins à l'issue d'une période pluvieuse ou pendant une période de dégel [20]. Dans ces conditions défavorables, la teneur en eau du sol est proche de l'optimum Proctor et le sol est dans un état où se développent des déformations plastiques.

La compaction dépend des caractéristiques du sol:

- La **texture** : la sensibilité à la compaction est plus importante pour des sols à texture fine que pour des sols à texture grossière.
- La **teneur en eau** : la sensibilité du sol est maximale à l'optimum Proctor ou quand l'indice de consistance est compris entre 0.7 et 1.3.
- La **structure** : des sols possédant une bonne stabilité structurale possèdent une résistance aux charges plus importante que les sols mal structurés.
- La **teneur en matière organique** : une teneur élevée en matière organique augmente l'élasticité du sol et réduit sa sensibilité du sol à la compaction.

La compaction dépend des caractéristiques des véhicules:

- Les risques de compaction des **horizons profonds** sont élevés lorsque des véhicules supportant des **charges importantes** se déplacent sur des **sols humides**.
- La compaction des horizons profonds induite par un **trafic répété** constitue un processus additif et induit des effets à longue durée, difficiles à corriger.
- Les débardeuses de type 'débusqueur' induisent des contraintes de cisaillement qui peuvent se traduire par un scalpage des horizons superficiels

4. Les conséquences de la compaction des sols forestiers

Les effets néfastes du passage de machines d'exploitation forestière sur les propriétés du sol et la vitalité des peuplements ont été soulignés par plusieurs auteurs [20-28]. Les dégâts se manifestent principalement dans les voies d'accès mais aussi à l'intérieur des parcelles. Dans certains cas, l'évolution défavorable est reflétée par la présence de végétation constituée de joncs (*Juncus effusus* L.), de balsamine à petites fleurs (*Impatiens parviflora* DC.), ... [40].

4.1. Effets sur les propriétés du sol

A l'état naturel, les sols forestiers se caractérisent par une faible masse volumique, une faible résistance mécanique et une haute perméabilité. Leur structure est stable en surface, en raison de la présence d'humus et de l'activité biologique.

L'accroissement de la masse des engins a pour conséquence de soumettre ces sols à des contraintes mécaniques élevées, entraînant une compaction des horizons de surface et des horizons profonds.

Dans les 30 à 40 premiers cm des profils, suite au passage des machines, on observe une augmentation significative de la masse volumique apparente sèche γ_d . La macroporosité, qui assure la diffusion de l'air et la circulation de l'eau, est réduite. Dans certains cas, le seuil critique pour la survie des systèmes racinaires, à savoir 5 % de macroporosité, est atteint. Dans les horizons sous-jacents, les variations de masse volumique et de porosité sont souvent limitées ou non significatives mais la distribution de la porosité peut évoluer : on observe souvent une réduction de la macro- et de la microporosité et une augmentation de la porosité matricielle. L'augmentation la plus élevée de γ_d est associée aux premiers passages sur le sol. Des dégâts spectaculaires, comme la création d'ornières profondes (Fig. 20), peuvent apparaître lorsque la couverture organique du sol est épaisse (dysmoder, hydromoder, tourbe, ...) ou constamment gorgée d'eau (hydromull, hydromoder, hydromor, anmoor, ...) [20].



Fig. 20. Ornière créée par le passage d'une débusqueuse à pince dans un sol hydromorphe.

Dans beaucoup de situations, la structure du sol est détruite et les agrégats naturels font place à l'apparition de plans horizontaux caractéristiques d'une structure lamellaire. Il en résulte que la perméabilité diminue, ce qui peut engendrer soit des écoulements superficiels susceptibles de générer de l'érosion, voire la stagnation d'eau en surface.

Lorsque les périodes pendant lesquelles le sol est saturé sont longues et fréquentes, des modifications à caractère pédologique et chimique peuvent appa-

raître. Par exemple, en forêt de Soignes, la compaction engendre la formation d'une nappe temporaire dans la partie supérieure des profils pendant environ quatre mois, de décembre à mars. Vu le caractère réducteur et acide de cette nappe, des phénomènes de lessivage du fer et de déstabilisation de la phase argileuse surviennent, ce qui diminue très sensiblement les potentialités sylvicoles [23].

La limitation des échanges gazeux du sol peut également aboutir à une augmentation de la percolation de cations nutritifs avec l'eau et, en conséquence, à la formation d'acide carbonique. Cela peut également conduire à la formation de microenvironnements anoxiques ainsi qu'à une dénitrification et à la réduction du manganèse, du fer et du sulfate. La dénitrification induit une production de N_2O , gaz à effet de serre dont l'augmentation dans l'atmosphère contribue significativement au réchauffement climatique.

La contrainte de préconsolidation P_c , qui caractérise la résistance mécanique du sol, est plus faible pour les sols forestiers que pour les sols agricoles. Des mesures effectuées en Forêt Noire indiquent que $(P_c)_{pF=1.8}$ varie de 20 à 50 kPa à une profondeur de 20 cm et de 25 à 60 kPa à une profondeur de 40 cm. La contrainte de préconsolidation augmente suite au passage de machines, à la fois en surface et en profondeur [15, 22]. Il en résulte une diminution des possibilités de régénération naturelle.

On observe également des phénomènes superficiels de scalpage, fraisage et laminage provoqués par un glissement excessif des roues motrices des engins et le frottement de grumes sur le sol.

4.2. Effets sur l'activité biologique

La faune du sol joue un rôle important dans le fonctionnement de l'écosystème comme la décomposition des végétaux, la libération d'éléments nutritifs et la formation d'une bonne structure. La modification de structure et de propriétés physiques liées à la compaction induit une réduction de l'activité de la macrofaune, ce qui peut ralentir des fonctions importantes pour le développement des arbres.

La relation est complexe entre la compaction et la croissance de la biomasse microbienne. Il semble que la structure de la communauté bactérienne soit plus sensible à la compaction que la quantité de biomasse microbienne elle-même. Un changement dans cette structure peut mener à des perturbations des processus biologiques du sol comme la transformation de la matière organique et la production de gaz à effet de serre [26].

4.3. Effet sur les peuplements

La relation entre la compaction et le développement des arbres n'est pas univoque et dépend du type de sol, du régime hydrique et des espèces [21]. Une augmentation de la masse volumique apparente sèche peut altérer les lits de germination, provoquant des difficultés de régénération. La croissance des racines est entravée, ce qui peut entraîner une diminution des prélèvements nutritifs et de l'eau. Une réduction de la hauteur des arbres, du diamètre et de la croissance en volume est souvent observée en présence de sols compactés. Par exemple, une réduction de 10 à 12 % de la hauteur d'arbres âgés de 4-5 ans est observée dans des sites où l'accroissement de masse volumique est de 8

à 10% [27]. En forêt de Soignes, selon Herbauts et al. [23], la compaction du sol est particulièrement préoccupante et pourrait compromettre l'avenir des peuplements, particulièrement des hêtraies qui sont sensibles vis-à-vis de l'hydromorphie.

Par ailleurs, Heilman [28] n'a pas trouvé de différence significative dans la hauteur des plants de Douglas malgré l'augmentation de masse volumique bien que la pénétration verticale des racines soit gênée. Il explique ces observations par le fait que les jeunes arbres s'adaptent en développant leurs racines horizontalement au-dessus de la couche tassée. Cependant, ceci les rend plus vulnérables à la sécheresse, au déracinement et aux carences en éléments nutritifs.



Fig. 21. Présence de racines superficielle en hêtraie.

4.4. Persistance des perturbations dues à la compaction

Les perturbations dues à la compaction sont plus ou moins durables au niveau des sols forestiers [21, 25]. La régénération naturelle du sol résulte de l'action de la flore et la faune du sol, ainsi que de processus abiotiques comme la sécheresse et le gel. Cependant, l'efficacité de ces processus décroît rapidement avec la profondeur et le sol récupère plus difficilement ses propriétés entre 15-25 cm qu'entre 0 – 8 cm.

La vitesse avec laquelle les propriétés initiales sont récupérées est fonction du type de sol et du niveau de compaction. Suite à des processus de gonflement et retrait, les sols argileux peuvent récupérer, en partie du moins, leurs propriétés initiales via des processus d'humidification et de séchage. Pour les sols sableux, la récupération est plus problématique. Selon les cas, le sol retrouve ses caractéristiques initiales de masse volumique et de perméabilité au bout de 5 à 40 ans. Par exemple, dans une exploitation d'épicéas, la récupération de la masse volumique se produit après 5 – 7 ans en sols bien drainés et après 15 ans pour des sols hydromorphes.

La compaction : ses conséquences

- La compaction résultant du passage des engins **modifie les propriétés mécaniques** (masse volumique apparente sèche, résistance mécanique), **hydrauliques** (perméabilité), **pédologiques** (entraînement d'éléments) du sol.
- Elle affecte **l'activité biologique** de la faune et de la biomasse microbienne.
- **La relation entre la compaction et le développement des arbres dépend du type de sol, du régime hydrique et des espèces.**
- **La vitesse avec laquelle les propriétés initiales sont récupérées est fonction du type de sol et du niveau de compaction.** Selon les cas, le sol retrouve ses caractéristiques initiales de masse volumique et de perméabilité au bout de 5 à 40 ans, les situations les moins défavorables concernant les sols argileux et les sols bien drainés.

5. La mesure de la compaction

La masse volumique du sol γ_d , est souvent utilisée pour caractériser l'état de compaction du sol. Cependant, pour un sol donné, une même valeur de γ_d peut donner lieu à des géométries de pores et des connexions entre pores différentes.

5.1. Masse volumique, porosité totale

La masse volumique γ_d est définie comme le rapport de la masse des grains m_s au volume de sol V , selon l'expression (Fig. 22):

$$\gamma_d = \frac{m_s}{V}$$

La masse volumique apparente sèche γ_d est mesurée de façon conventionnelle par méthode gravimétrique en laboratoire (séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 h). L'exactitude de la mesure est de l'ordre de 1 %.

La porosité totale n , qui est égale au rapport du volume des vides d'un échantillon au volume total, est obtenue à partir de l'expression suivante dans laquelle γ_s est la masse volumique des grains:

$$n \approx 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = 1 - \frac{\gamma_d}{2.67}$$

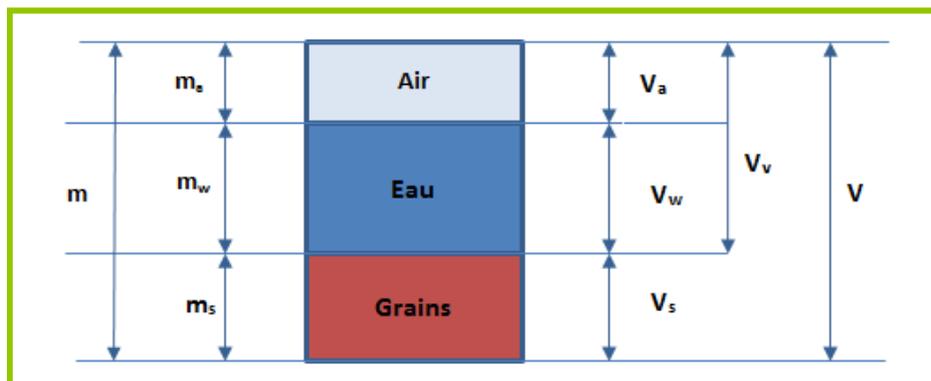


Fig. 22. Représentation schématique des différentes phases d'un sol.

Exemple : Modification de la porosité suite au passage d'engins de débardage en forêt d'Anlier [15]. La forêt d'Anlier est une hêtraie, sur un limon caillouteux à charge schisto-phylladeuse et à drainage naturel quasi exclusivement favorable.

Dans l'horizon superficiel, la masse volumique initiale se situe aux alentours de 1 Mg/m^3 , ce qui correspond à une porosité totale de l'ordre de 62 %. A la fin de l'exploitation, la porosité totale diminue en moyenne de 10 %. Cette diminution correspond en majeure partie à une diminution de la macroporosité, c'est-à-dire à une diminution du volume occupé par les pores qui assurent la circulation de l'air et de l'eau gravitaire. Cette diminution conduit à une réduction de la perméabilité du sol.

A 40 cm de profondeur, la masse volumique initiale est plus élevée, elle est de l'ordre de 1.45 Mg/m^3 . La porosité totale qui y correspond se situe aux alentours de 45 %. A la fin du chantier d'exploitation, la porosité totale diminue (Fig. 23). L'analyse de la distribution de la porosité montre que, d'une manière générale, la macroporosité et la microporosité diminuent, tandis que la porosité matricielle augmente (Fig. 24). Rappelons que la diminution de la microporosité correspond à la diminution de la réserve d'eau utile pour les plantes. Cette modification de la porosité du sol est défavorable, particulièrement en cas de sécheresse prolongée.

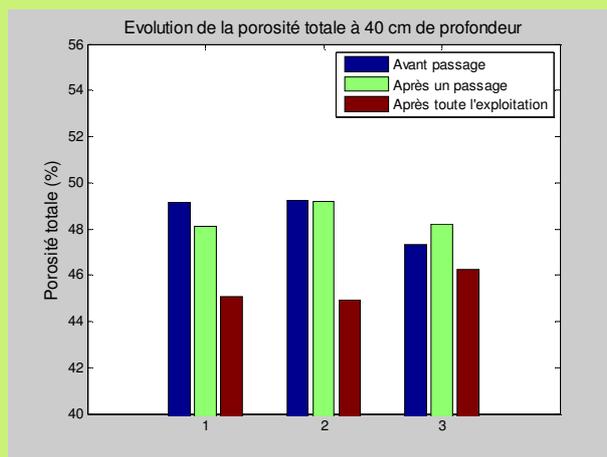


Fig. 23. Evolution de la porosité totale à 40 cm de profondeur suite au passage d'engins de débardage : porteur Timberjack TJ 810D (1), débusqueur à pince Timberjack TJ 360C (2), débusqueur à câble Timberjack TJ 240A (3).

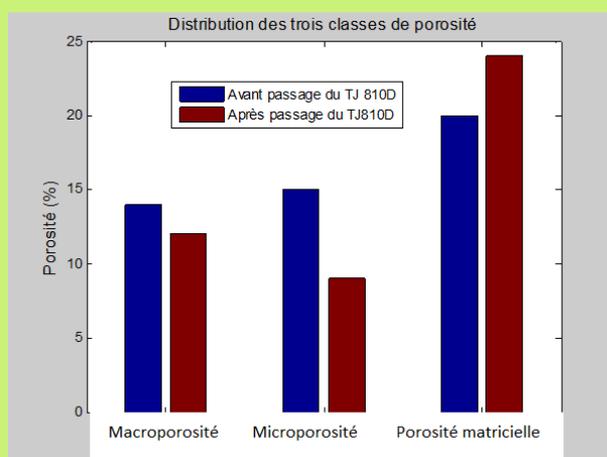


Fig. 24. Distribution de la porosité à 40 cm de profondeur suite au passage d'un porteur Timberjack TJ 810D.

5.2. Contrainte de préconsolidation

Le fait d'appliquer une charge sur le sol conduit à sa compaction si la contrainte de préconsolidation est dépassée [5]. Celle-ci est mesurée en laboratoire, en réalisant des essais de chargement unidirectionnels ou essais oedométriques (Fig. 25). Ils consistent à soumettre à des contraintes verticales un échantillon de sol non remanié, drainé et maintenu latéralement. La pression est exercée par paliers,

selon une progression géométrique. La courbe reliant les contraintes aux déformations est la courbe de compressibilité oedométrique (Fig. 26). Le point d'inflexion de cette courbe, qui sépare la partie élastique de la partie plastique est la contrainte de préconsolidation du sol (P_c).



Fig. 25. Oedomètres automatiques.

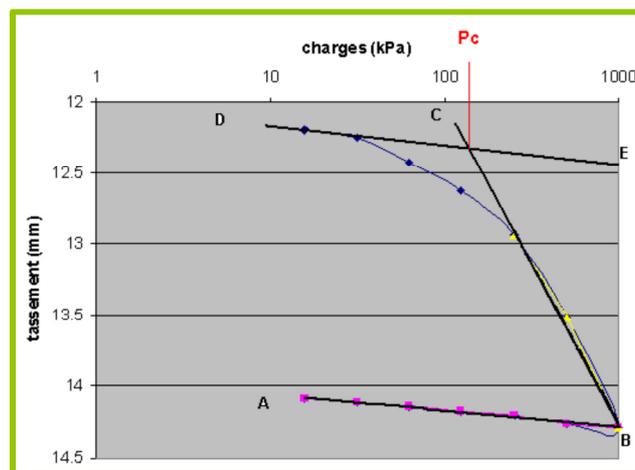


Fig. 26. Courbe oedométrique.

Cette contrainte étant dépendante de la teneur en eau, il convient de l'évaluer à une valeur de pF déterminée. On choisit généralement $pF = 1.8$ et 2.5 qui correspondent respectivement à la capacité au champ de sols sableux et limoneux. Il faut toutefois être conscient que la mesure de P_c en laboratoire ne correspond pas complètement aux conditions réelles de terrain, lorsqu'un véhicule se déplace sur le sol. En effet, dans le test de chargement unidimensionnel, aucun mouvement latéral du sol n'est possible et aucune contrainte de cisaillement n'est induite, ce qui n'est pas le cas sur le terrain. De ce fait, P_c doit être considéré comme une valeur seuil qui, par précaution, ne doit pas être dépassée par les contraintes exercées par le véhicule [21].

Exemple : Effet du passage d'un porteur (TJ 810D), d'un débusqueur à pince (TJ360C), d'un tracteur agricole avec remorque, avant et après l'exploitation sur les sites de Rulles et Fauvillers [15].

La contrainte de préconsolidation P_c est donnée à la Fig. 27 sous forme normalisée à pF1.8 (ce qui correspond à une teneur en eau de l'ordre de 35 à 38 %), à 40 cm de profondeur. Dans la majorité des cas, dans la situation initiale, elle est inférieure à 100 kPa. **Suite au passage des machines, P_c augmente systématiquement**, dans des proportions variables en fonction des sites et en fonction de la teneur en eau à laquelle s'est effectué le débardage. Ceci signifie que le sol se déforme de manière plastique sous l'effet des contraintes. Autrement dit, sa résistance mécanique augmente à 40 cm de profondeur, confirmant les résultats d'études antérieures [22].

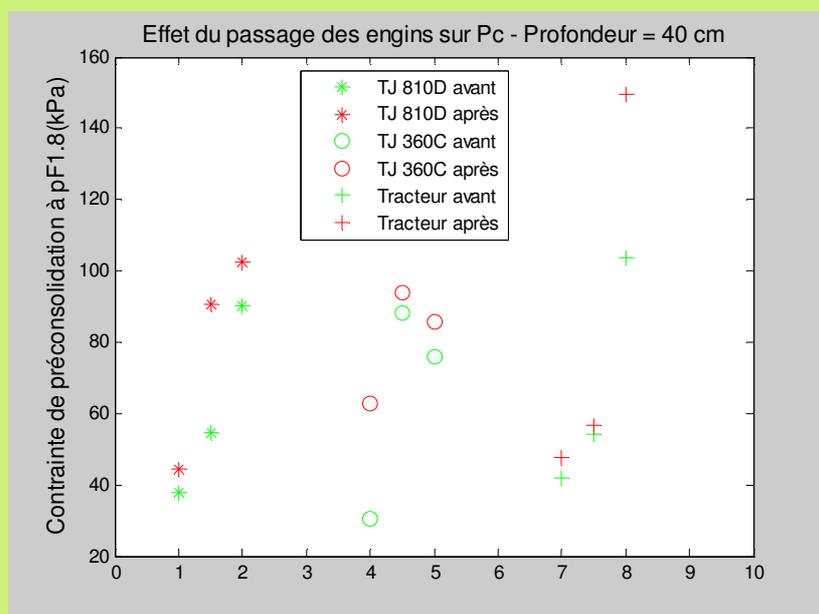


Fig. 27. Augmentation de contrainte de préconsolidation sous l'effet du passage d'un porteur Timberjack TJ 810D, d'un débusqueur Timberjack TJ 360C et d'un tracteur agricole avec remorque, à 40 cm de profondeur.

5.3. Mesures indirectes

D'autres propriétés indirectes sont également fréquemment mesurées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés en forêt, comme la distribution et la structure des pores, la diffusion de l'oxygène, ... [30-33].

Outre le fait que P_c soit dépassé, on peut qualifier un sol de sévèrement compacté si (1) la porosité à l'air est inférieure à 5 %, (2) la conductivité hydraulique à saturation est inférieure à 10 cm/jour et (3) des signes de dégradation morphologiques visuels apparaissent [21]. Des changements dans la microstructure du sol, comme une modification de forme des pores ou de leur connectivité, peut être mise en évidence de manière non destructive en analysant par CT (Computed Tomography) des images d'échantillons de sol.

Sur le terrain, on recourt souvent à un pénétromètre pour mesurer la résistance rencontrée pour enfoncer une pointe conique dans un sol (Fig. 28). Pour un sol donné, celle-ci est principalement fonction de la masse volumique et de l'humidité du sol. Des mesures effectuées sur la couche des 20 cm superficiels du sol, après enlèvement de la litière, permettent de mettre en évidence l'augmentation de la résistance du sol après passage de débusqueurs [20]. Dans certaines forêts, l'utilisation du pénétromètre est problématique en raison de la présence de cailloux.

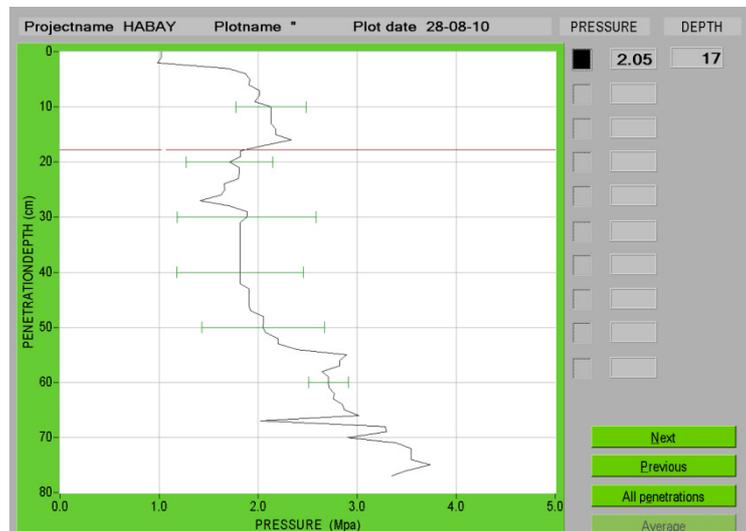


Fig. 28. Exemple de résistance à la pénétration mesurée en sol forestier [15].

La mesure de la compaction

- Pour quantifier la compaction d'un sol, on réalise des mesures directes comme la masse volumique apparente sèche γ_d , la porosité totale n , la contrainte de préconsolidation P_c ou des mesures indirectes telles que la résistance à la pénétration, la distribution de la taille des pores, la diffusion de l'oxygène, ...
- La mesure de γ_d est très précise et rapide, puisque dans de bonnes pratiques de laboratoire γ_d peut être évalué à 1 % près. Toutefois, la mesure de γ_d n'est pas toujours un indicateur suffisamment sensible de la compaction.
- La contrainte de préconsolidation est représentative de la limite entre l'état élastique et plastique du sol, son dépassement est un bon indicateur de la compaction d'un sol. Toutefois, sa mesure représente un long processus.
- La résistance à la pénétration est une technique de terrain rapide mais sensible au type de sol, à la masse volumique et à l'humidité du sol.

6. La sensibilité à la compaction des sols de Wallonie

6.1. Méthodologie

La méthode choisie pour élaborer des cartes de sensibilité consiste à calculer sur l'ensemble du territoire de Wallonie la contrainte de préconsolidation P_c selon la méthode de Horn et Fleige [29]. Il s'agit d'évaluer P_c à partir des fonctions de pédotransfert (FPT) données au Tableau 3. Celles-ci font intervenir diverses variables, comme la texture, la masse volumique, la teneur en eau disponible, non disponible, ... selon l'organigramme de la Fig. 29. Ces variables sont accessibles à partir de bases de données comme Aardewerk [34] ou à partir de fonctions de pédotransfert. Plus de détails sur le calcul de P_c sont donnés dans [15].

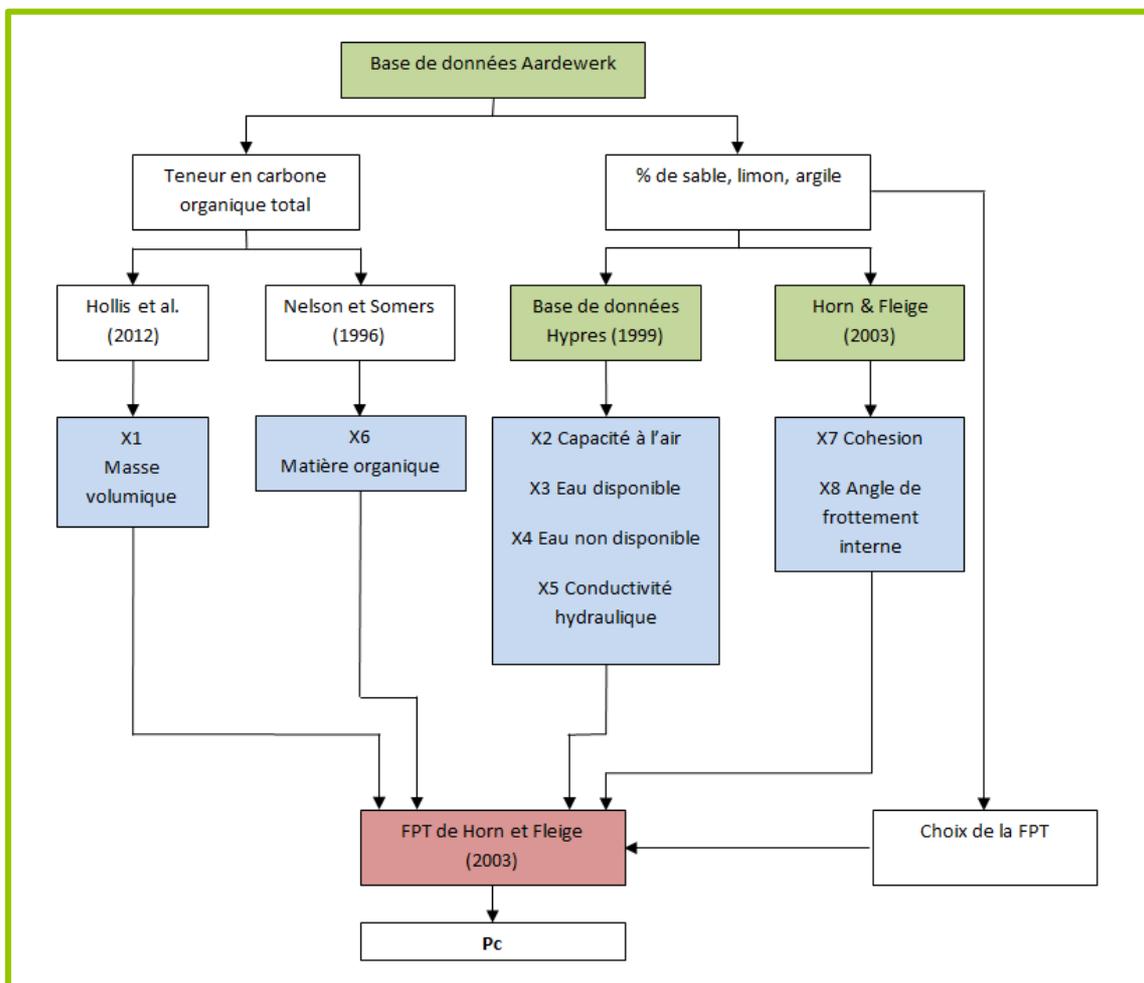


Fig. 29. Organigramme de calcul de la contrainte de préconsolidation P_c [15].

Tableau 3. Fonctions de pédotransfert pour le calcul de P_c [29].

	Classes texturales	Fonctions de pédotransfert	r^2
1	Sable	$P_{c_{1.8}} = 438.10 X_1 - 0.0008(X_{8_{1.8}})^3 - 3.14 X_4 - 0.11 (X_{3_{1.8}})^2 - 465.60$	0.778
		$P_{c_{2.5}} = 410.75 X_1 - 0.0007(X_{8_{2.5}})^3 - 3.41 X_4 - 0.35 (X_{3_{2.5}})^2 - 384.71$	0.710
2	Limon sableux	$P_{c_{1.8}} = 169.30 X_1 - 29.03 X_6^{0.5} + 6.45 X_5 + 32.18 \log(X_{7_{1.8}}) - 9.44 X_{8_{1.8}} + 27.25 \sin(X_4) + 119.74 \log(X_{3_{1.8}}) + 19.51$	0.828
		$P_{c_{2.5}} = 89.50 X_1 - 23.99 X_6^{0.5} - 2.89 X_5 + 125.76 \log(X_{7_{2.5}}) - 1.14 X_{8_{2.5}} + 26.90 \sin(X_4) - 51.46 \log(X_{3_{2.5}}) - 77.25$	0.874
3	Limon	$P_{c_{1.8}} = 374.15 X_1 - 4.10 X_6 + 3.38 X_{2_{1.8}} - 1.58 (X_5)^{-0.5} + 1.79 X_{7_{1.8}} + 1.09 X_4 - 6.37 (X_{8_{1.8}})^{0.67} + 0.088 (X_{3_{1.8}})^2 - 472.77$	0.765
		$P_{c_{2.5}} = 460.71 X_1 - 20.33 X_6 + 9.08 X_{2_{2.5}} - 2.38 (X_5)^{-0.5} + 2.86 X_{7_{2.5}} + 4.50 X_4 - 20.96 (X_{8_{2.5}})^{0.67} + 0.304 (X_{3_{2.5}})^2 - 610.62$	0.847
4	Argile (< 35 %) et limon argileux	$\log(P_{c_{1.8}}) = 0.843 X_1 - 0.544 (X_5)^{0.33} - 0.022 X_4 + 7.03 (X_{7_{1.8}})^{-1} + 0.024 X_{8_{1.8}} - 0.015 X_{3_{1.8}} + 0.725$	0.808
		$\log(P_{c_{2.5}}) = 0.844 X_1 - 0.456 (X_5)^{0.33} - 0.026 X_4 + 12.88 (X_{7_{2.5}})^{-1} - 0.003 X_{8_{2.5}} - 0.016 X_{3_{2.5}} + 1.419$	0.804
5	Argile ($\geq 35\%$) et limon argileux	$P_{c_{1.8}} = 4.59 X_1 - 1.02 X_6 - 16.43 (X_5)^{0.33} + 0.31 X_4 - 1.57 X_{3_{1.8}} + 3.55 X_{7_{1.8}} + 1.18 X_{8_{1.8}} - 18.03$	0.774
		$P_{c_{2.5}} = 70.65 X_1 - 0.55 X_6 - 7.01 (X_5)^{0.33} + 1.32 X_4 - 1.08 X_{3_{2.5}} + 1.72 X_{7_{2.5}} + 1.05 X_{8_{2.5}} - 100.94$	0.763

- $X_1 = \gamma_d$: la masse volumique apparente sèche (g/cm^3) ;
 $X_2 = c_a$: la capacité à l'air (v/v ; %) ;
 $X_3 = \theta_a$: la teneur en eau disponible pour les plantes (v/v ; %) ;
 $X_4 = \theta_{na}$: la teneur en eau non disponible pour les plantes (v/v ; %) ;
 $X_5 = K_s$: la conductivité hydraulique saturée (cm s^{-1}) 10^3 ;
 $X_6 = MO$: la teneur en matière organique (g/g ; %) ;
 $X_7 = c$: la cohésion (kPa) ;
 $X_8 = \phi$: l'angle de frottement interne (degrés) ;
 P_c : la contrainte de préconsolidation au pF de 1.8 ou 2.5 kPa (kPa).

Les FTP de Horn et Fleige [29] sont calculées à une profondeur de 40 cm pour des teneurs en eau correspondant à des pF de 1.8 et pF 2.5. On sait qu'un même pF correspond à une humidité variable suivant la texture du sol. Pour fixer les idées, les teneurs en eau correspondant aux pF de 1.8 et 2.5 et issues de la base de données HYPRES [35] sont données au [Tableau 4](#). Il s'agit de valeurs moyennes, qui peuvent fluctuer en fonction de la texture précise du sol.

Tableau 4. Texture et teneur en eau à pF 1.8 et 2.5 [35].

Classes texturales	Définition	Teneur en eau volumétrique moyenne pF 1.8 (%)	Teneur en eau volumétrique moyenne pF 2.5 (%)
Grossière	Argile < 18 % et sable > 65 %	24	14
Moyenne	18 % < argile < 35 % et 15 % < sable ou argile < 18 % et 15 % < sable < 65 %	35	29
Moyenne fine	argile < 35 % et sable < 15 %	38	32
Fine	35 % < argile < 60 %	46	42
Très fine	60 % < argile	54	50

Plus la contrainte de préconsolidation est grande, plus la sensibilité du sol à l'augmentation de compaction est faible et vice-versa. Le [Tableau 5](#) délimite 6 classes de sensibilité du sol allant de P_c inférieur à 30 kPa (sol extrêmement sensible à la compaction) jusqu'à P_c supérieur à 150 kPa (sol très faiblement sensible à la compaction)[29].

Tableau 5 : Sensibilité du sol à la compaction en fonction de P_c [29].

Classe de sensibilité	P_c (kPa)
Classe 1. Extrêmement élevée	< 30
Classe 2. Très élevée	30 – 60
Classe 3. Élevée	60 – 90
Classe 4. Moyenne	90 – 120
Classe 5. Faible	120 – 150
Classe 6. Très faible	> 150

La manière détaillée de cartographier P_c , de déterminer la classe de sensibilité à laquelle appartiennent les sols de Wallonie et d'évaluer les incertitudes qui y sont liées est donnée dans Ephesia [36]. Les principaux résultats sont indiqués ci-dessous.

6.2. Cartes de sensibilité à la compaction des sols de Wallonie

6.2.1. Masse volumique apparente sèche

La masse volumique apparente sèche γ_d est une variable importante qui intervient dans le calcul de P_c . Elle est ici calculée à partir des FPT de Hollis et al. [37] et est représentée sous forme cartographique à la Fig. 30. On voit qu'à une profondeur de 40 cm, les valeurs de γ_d s'échelonnent de 0.83 à

1.84 Mg/m³, avec 95 % des valeurs comprises entre 1.35 et 1.62 Mg/m³. Une analyse plus fine montre que l'on distingue les horizons des sols cultivés avec des valeurs de γ_d se situant autour de 1.55 Mg/m³ des horizons minéraux avec des valeurs de l'ordre de 1.35 Mg/m³.

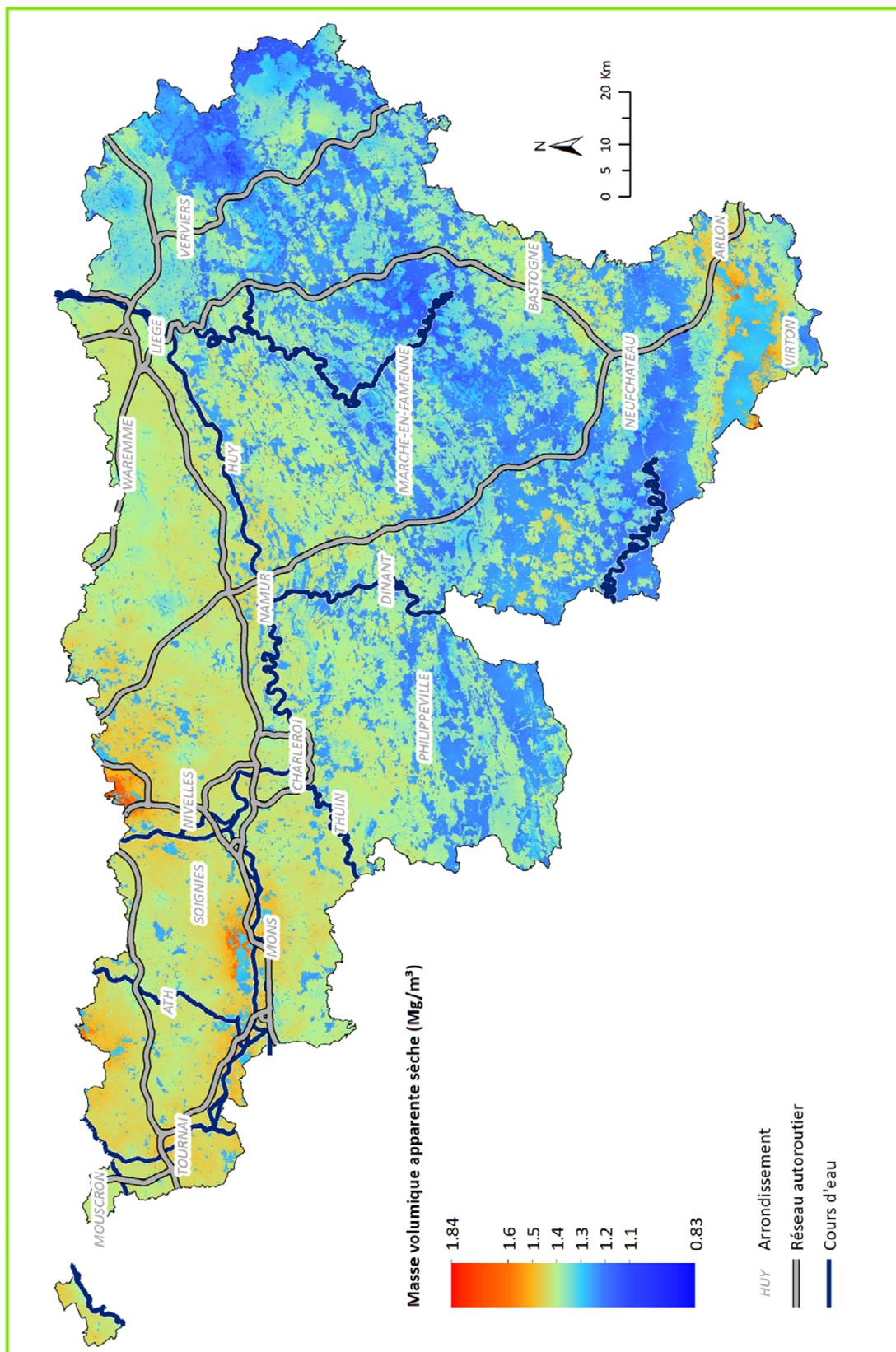


Fig. 30. Cartographie de la masse volumique apparente sèche à 40 cm de profondeur [36].

6.2.2. Contrainte de préconsolidation

Pour calculer la contrainte de préconsolidation et l'incertitude qui l'affecte, deux éléments ont été pris en compte. Premièrement, la variabilité spatiale des variables qui interviennent dans le calcul des FPT n'est pas complètement aléatoire mais est structurée en fonction de la distance qui sépare deux points donnés. Cette corrélation spatiale a été intégrée via l'utilisation de géostatistiques. Deuxièmement, dans certains cas, on dispose uniquement d'une information sur la moyenne des variables et leur incertitude par type de sol. Dans ce cas, il est fait appel à des méthodes statistiques de Monte Carlo.

Le résultat des calculs est donné aux Fig. 31, pour les pF 1.8 et 2.5.

Globalement, les zones les plus sensibles sont constituées par les sols limoneux peu caillouteux (5 à 15 % de charge caillouteuse) de la partie centrale de l'Ardenne, la partie Nord de l'Ardenne du Nord-Est (à l'Est de Verviers) et la partie Sud de la Région limoneuse hennuyère. Ce résultat rejoint les conclusions de Delecour [20]. La sensibilité à la compaction apparaît plus marquée pour la partie centrale de l'Ardenne et la région à l'Est de Verviers à pF 2.5. Dans son ensemble, la région limoneuse située au Nord de l'axe Sambre-Meuse possède des valeurs de P_c élevée et les sols se situent dans les classes 5 et 6 à pF 2.5.

Les zones où l'incertitude liée au calcul de P_c est la plus importante sont la région limoneuse, le Condroz et la Gaume, ainsi que la partie ardennaise sur sol de classe G (limons caillouteux).

D'une manière générale, la variabilité spatiale est importante, ce qui signifie que, sur le terrain, on peut observer des situations qui ne correspondent pas à la tendance générale d'une région.

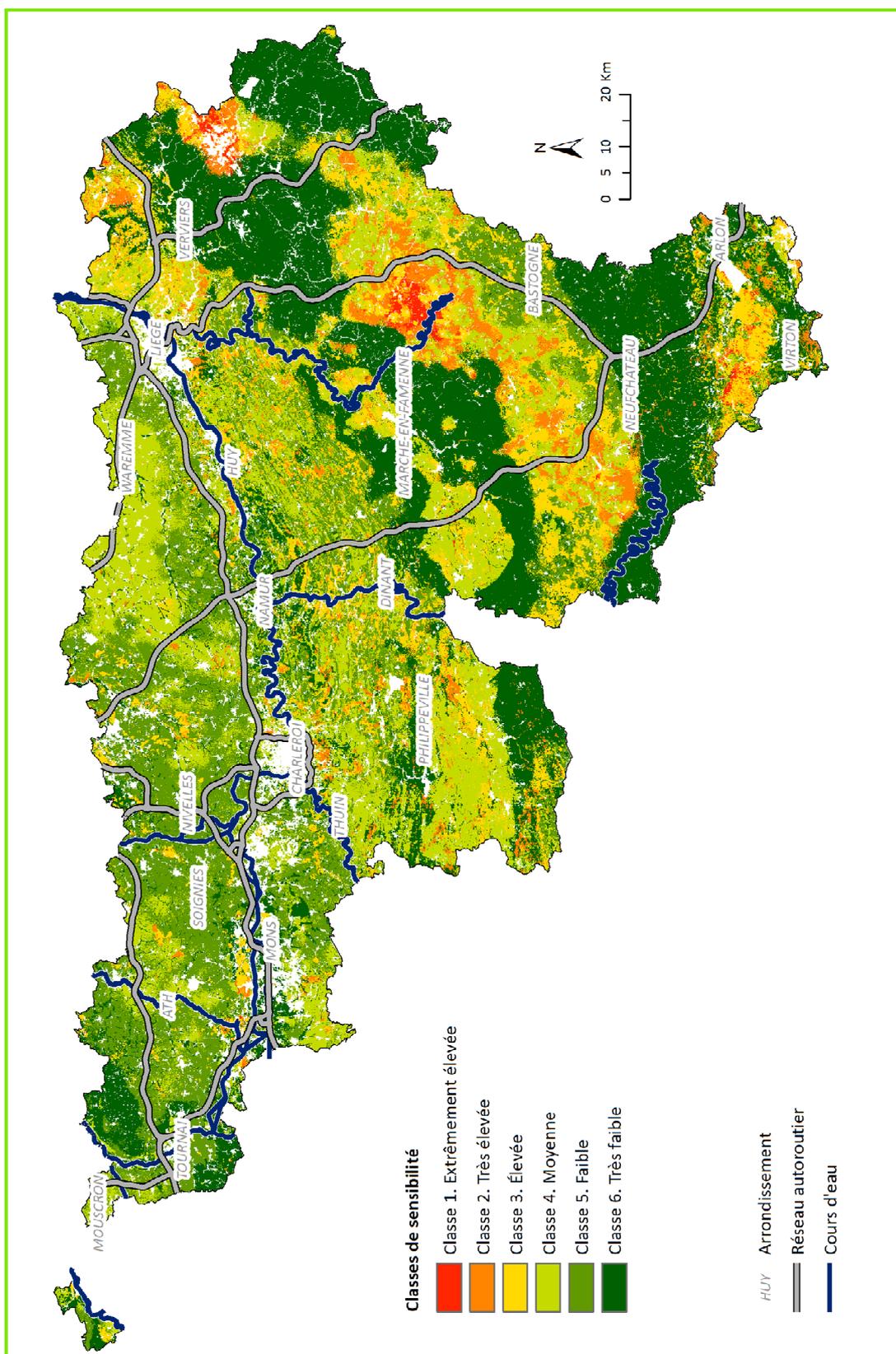


Fig. 31a. Cartographie des classes de contrainte de préconsolidation moyenne à 40 cm de profondeur à pF 1.8 [36].

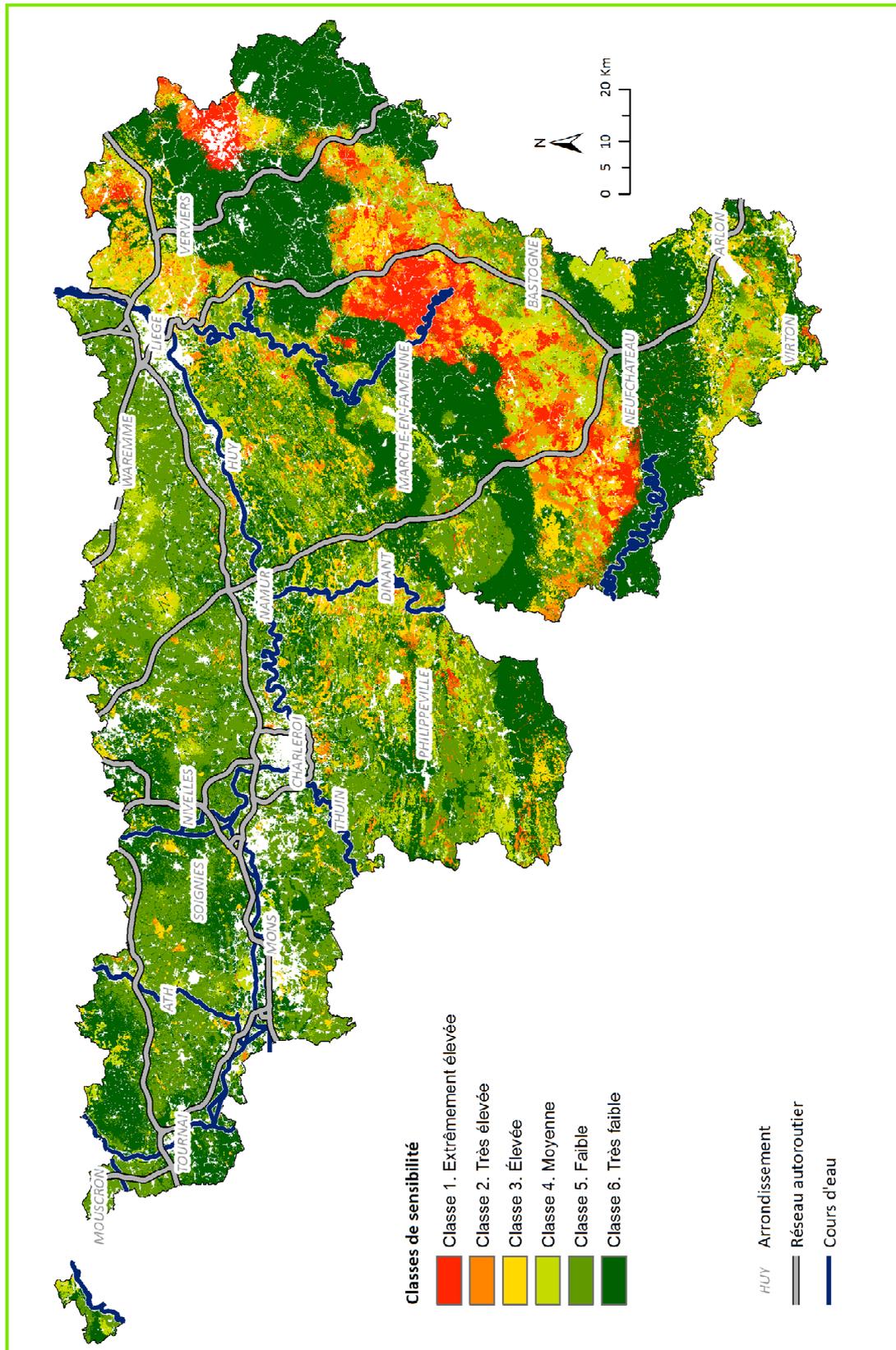


Fig. 31b. Cartographie des classes de contrainte de préconsolidation moyenne à 40 cm de profondeur à pF 2.5 [36].

7. Les risques de compaction des sols forestiers

La compaction du sol au-delà de 40 cm de profondeur étant la plus problématique, il est intéressant d'évaluer les risques existant à cette profondeur. Etant donné d'une part la grande diversité de machines forestières et d'autre part les teneurs en eau très différentes dans lesquelles ont lieu les opérations d'exploitation forestière, il n'est pas possible d'estimer la compaction dans chaque situation particulière. A titre d'exemple, la compaction qui pourrait résulter du passage d'un pneumatique donné est donc estimée.

Le principe de calcul est le suivant : la répartition des contraintes verticales σ créées par le pneumatique dans le sol est estimée et comparée à P_c . Si σ dépasse P_c , il y a risque de compaction.

La méthode d'estimation de la répartition des contraintes verticales créées par le pneumatique dans le sol et les hypothèses qui l'accompagnent est donnée dans [15]. Elle comporte trois étapes. La première étape consiste à modéliser la surface de l'empreinte du pneu sur le sol. La seconde détermine la répartition des contraintes verticales à l'interface sol-pneu, tandis que la dernière étape évalue la propagation des contraintes dans le sol en fonction de la profondeur selon les équations de Boussinesq (1885) et Frölich (1934), reprises par Söhne (1957) et Keller (2007) [38]. Cette dernière étape fait intervenir le facteur de concentration ν qui dépend des caractéristiques du sol. Cette estimation est l'objet de nombreuses études actuelles [39]. Dans cette étude, la valeur de $\nu = 5$ proposée dans [38] est utilisée.

En sol forestier, les scénarios sont basés sur des pneus utilisés sur des débusqueurs à pince :

- Scénario 1 : Pneu 28/26 supportant une charge de 9200 kg à une pression de 400 kPa (max à 10 km/h)
- Scénario 2 : Pneu 30.5/32 supportant une charge de 10000 kg à une pression de 310 kPa (max à 10 km/h) ;

et des porteurs :

- Scénario 3 : Pneu 710/22.5 supportant une charge de 4625 kg à une pression de 400 kPa (max à 10 km/h)
- Scénario 4 : Pneu 600/22.5 supportant une charge de 5450 kg à une pression de 550 kPa (max à 10 km/h).

Les résultats sont donnés aux Fig. 32 à 35. En vert, apparaissent les zones où le risque de compaction est inférieur à 10%. En rouge, celles où le risque est supérieur à 90%. En bleu, les zones où le niveau de risque est intermédiaire.

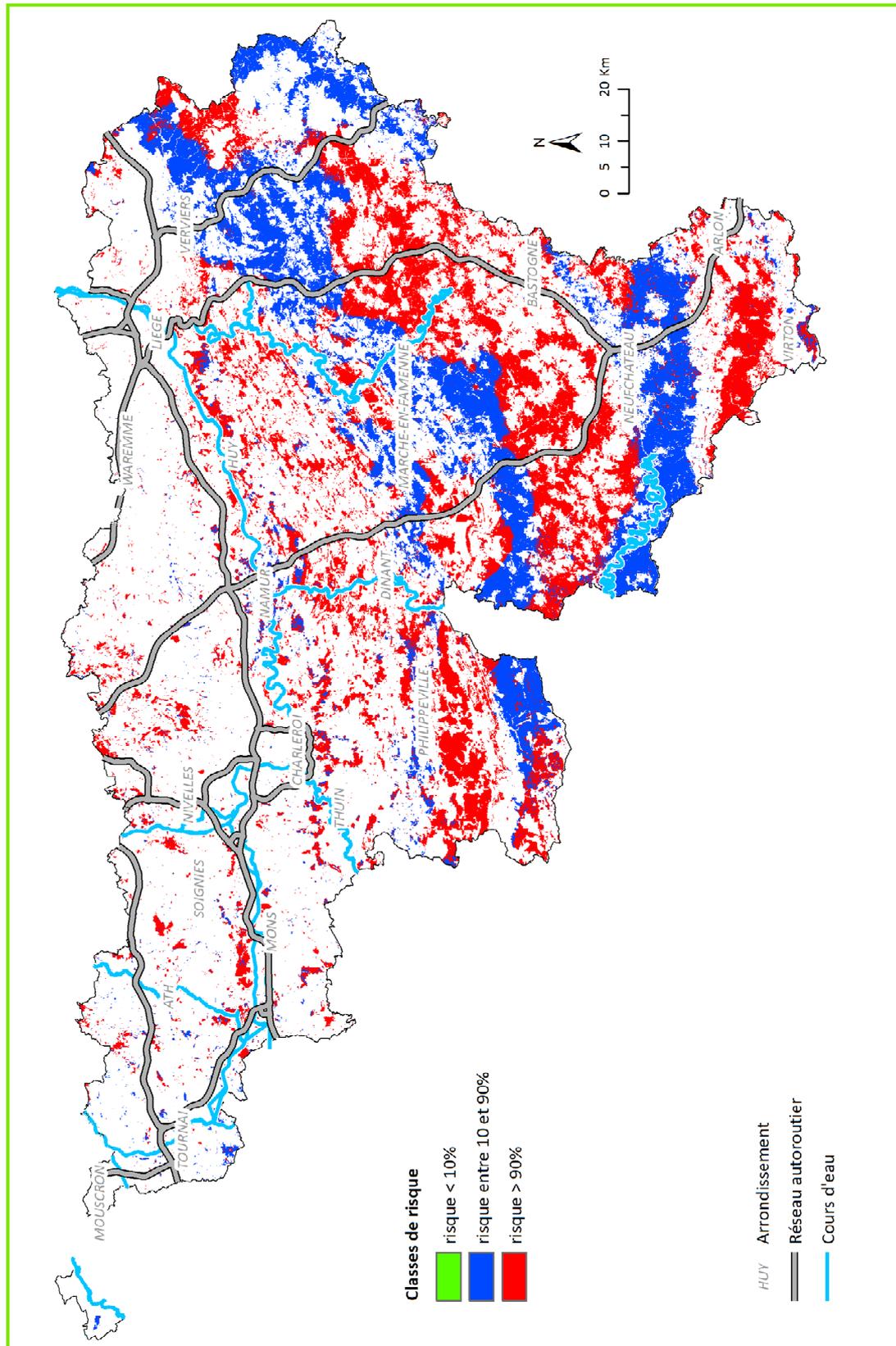


Fig. 32a. Cartes des classes de niveau de risque à 40 cm de profondeur pour pF 1.8 pour le scénario 1 : pneu équipant des débuseurs à pince avec une charge de 9200 kg et 4 bars [36].

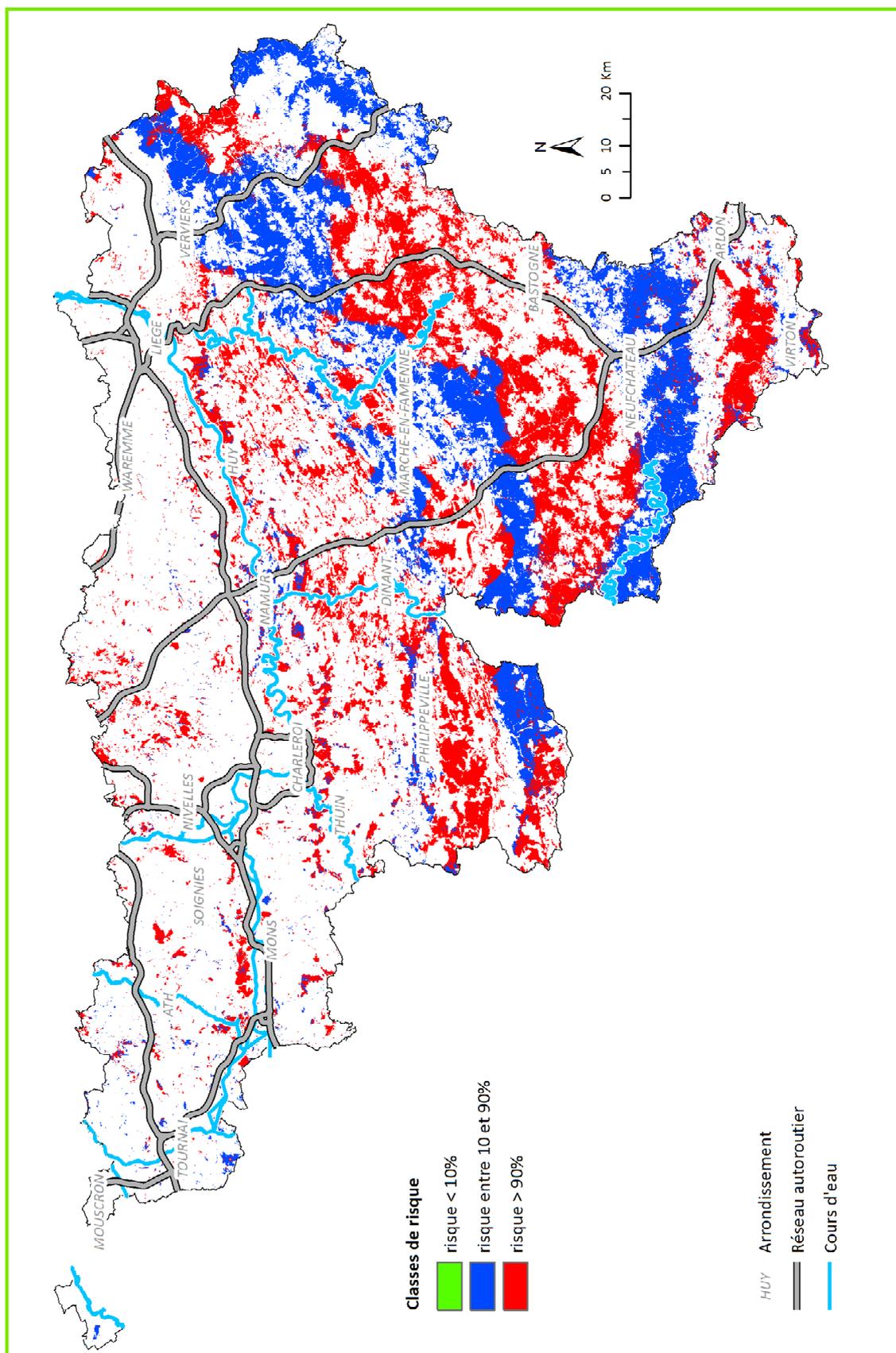


Fig. 32b. Cartes des classes de niveau de risque à 40 cm de profondeur pour pF 2.5 pour le scénario 1 : pneu équipant des débusqueurs à pince avec une charge de 9200 kg et 4 bars [36].

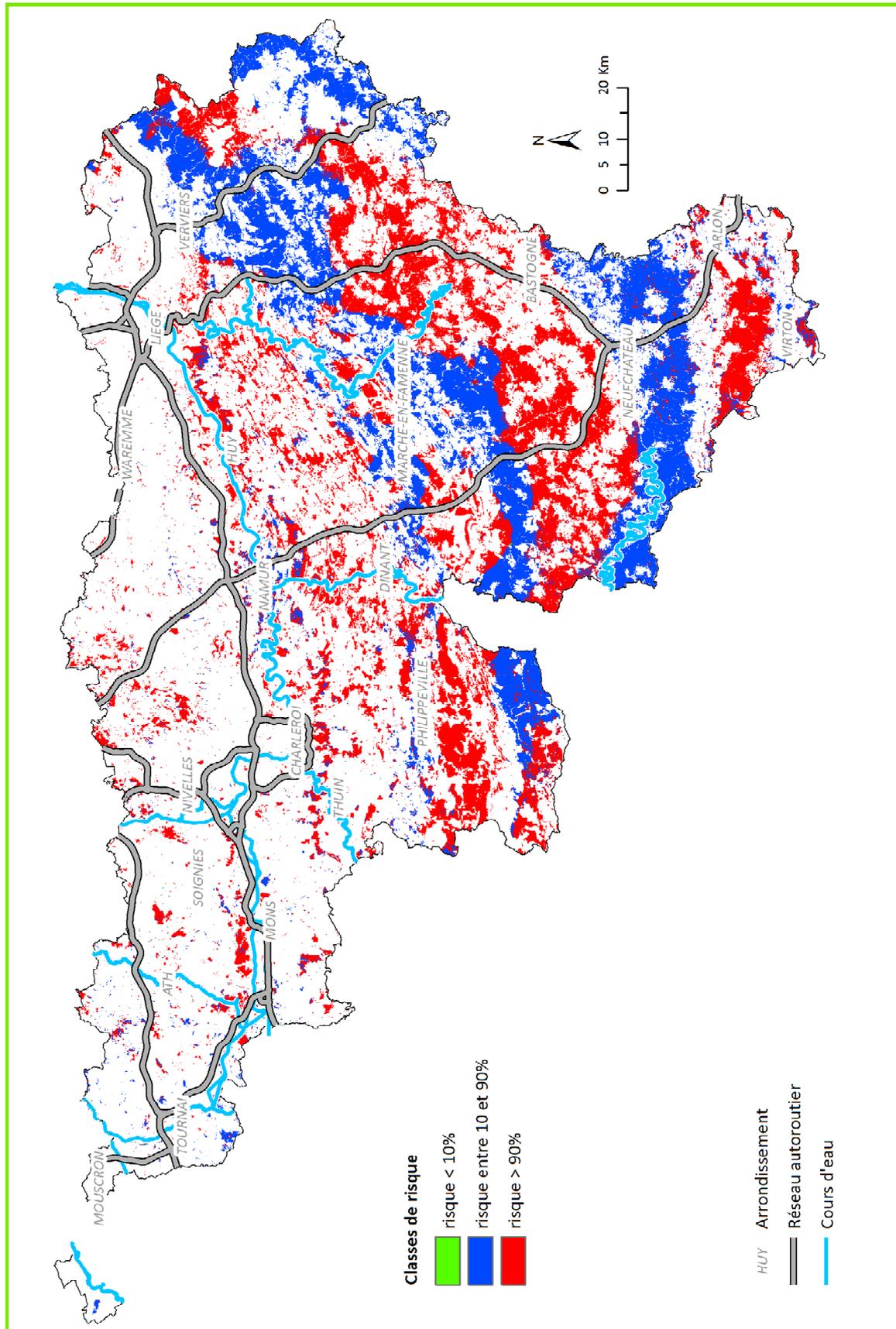


Fig. 33a. Cartes des classes de niveau de risque à 40 cm de profondeur pour pF 1.8 pour le scénario 2 : pneu équipant des débusqueurs à pince avec une charge de 10000 kg et 3.1 bars [36].

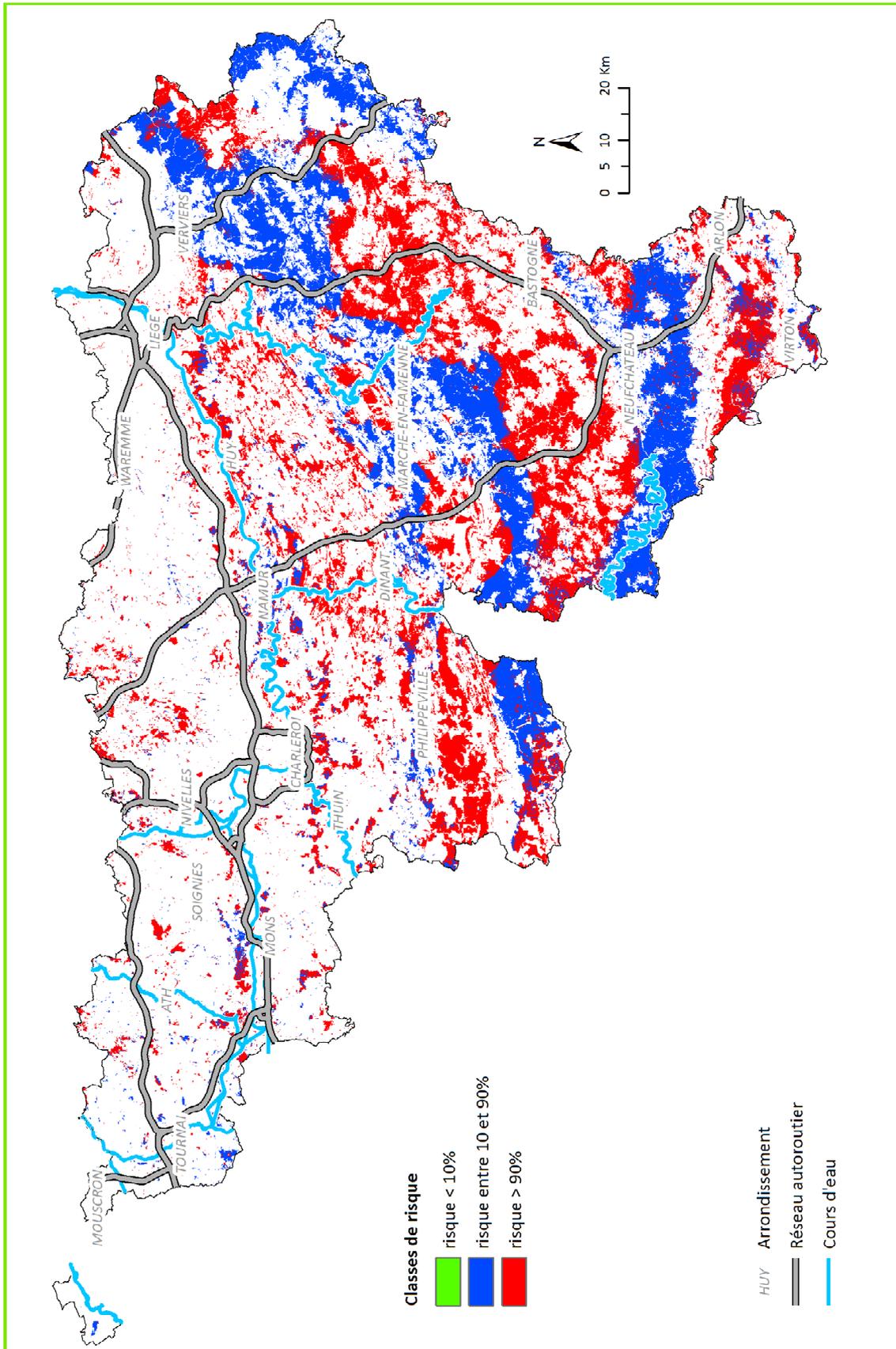


Fig. 33b. Cartes des classes de niveau de risque à 40 cm de profondeur pour pF 2.5 pour le scénario 2 : pneu équipant des débusqueurs à pince avec une charge de 10000 kg et 3.1 bars [36].

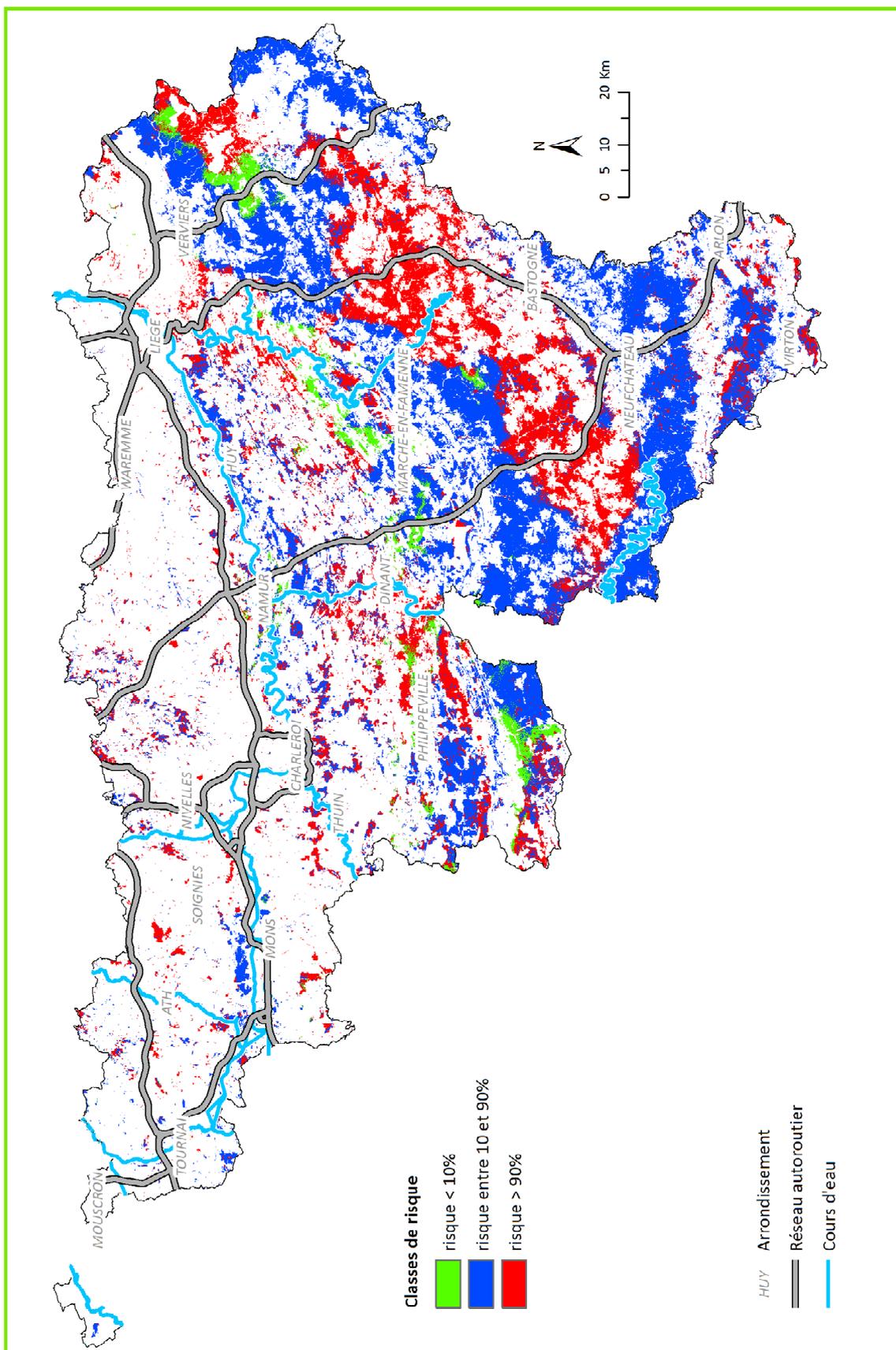


Fig. 34a. Cartes des classes de niveau de risque à 40 cm de profondeur pour pF 1.8 pour le scénario 3 : pneu équipant des porteurs avec une charge de 4625 kg (max à 10 km/h) et 4 bars [36].

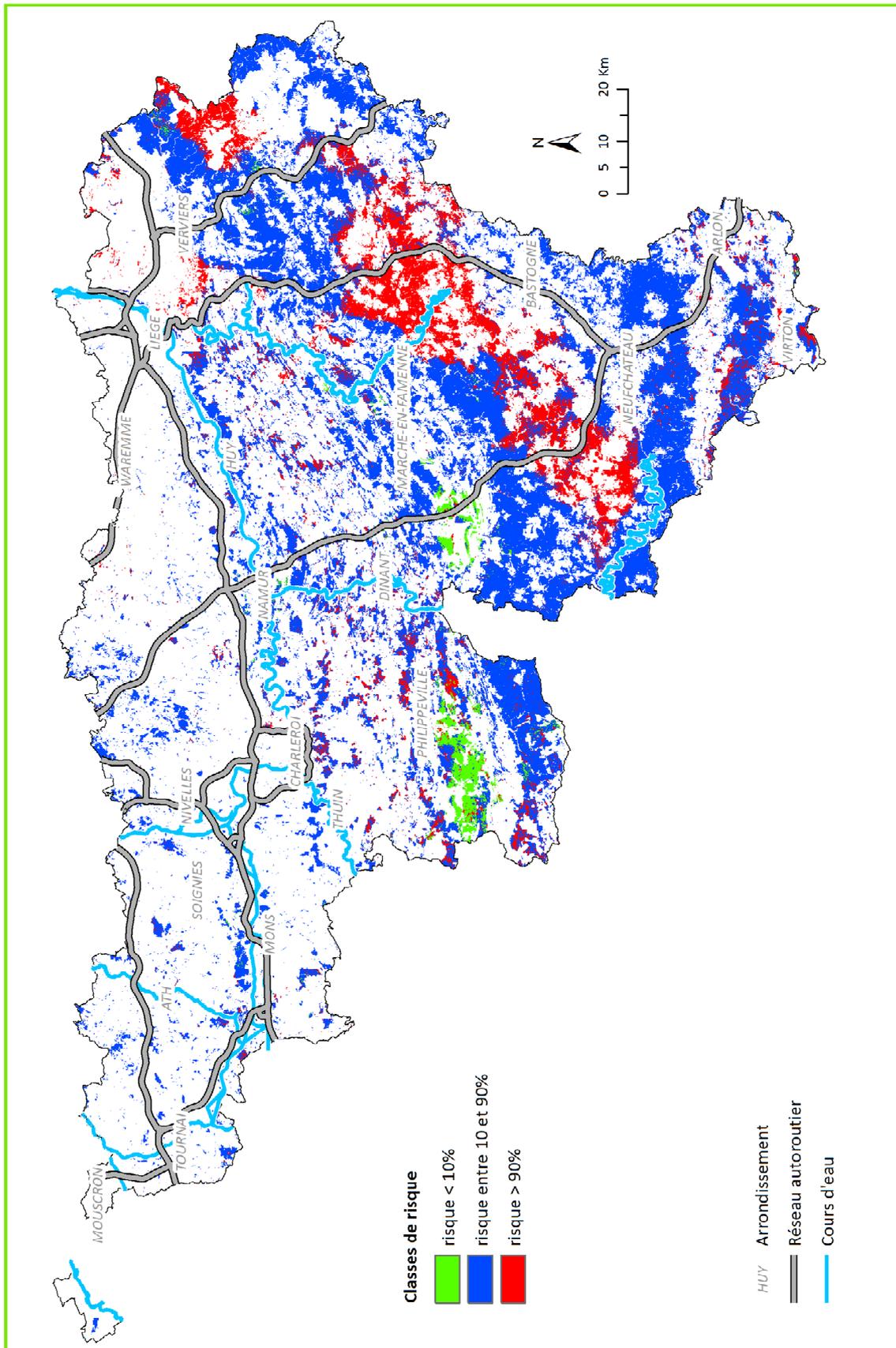


Fig. 34b. Cartes des classes de niveau de risque à 40 cm de profondeur pour pF 2.5 pour le scénario 3 : pneu équipant des porteurs avec une charge de 4625 kg (max à 10 km/h) et 4 bars [36].

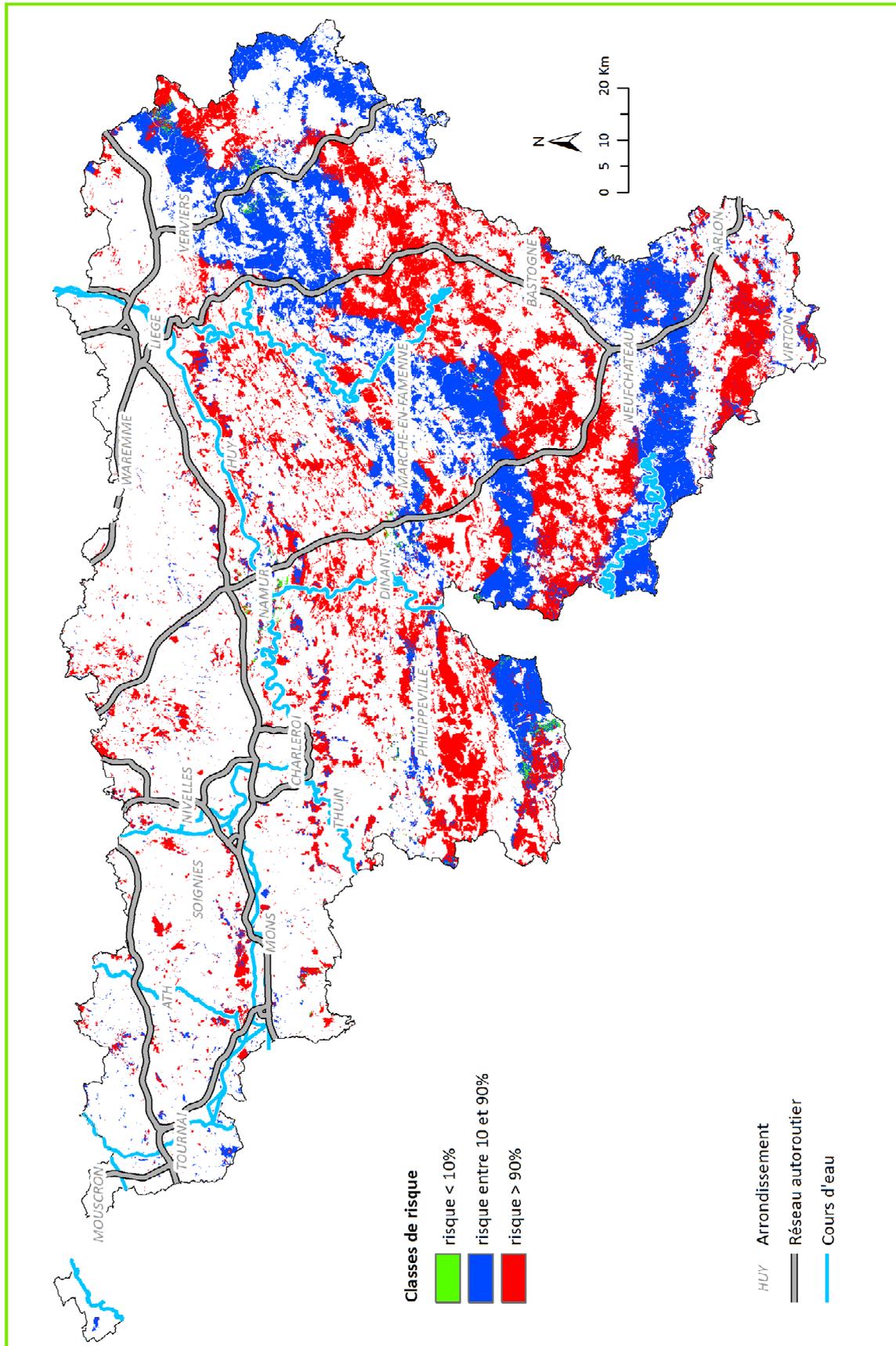


Fig. 35a. Cartes des classes de niveau de risque à 40 cm de profondeur pour pF 1.8 pour le scénario 4 : pneu équipant des porteurs avec une charge de 5450 kg à une pression de 5.5 bars [36].

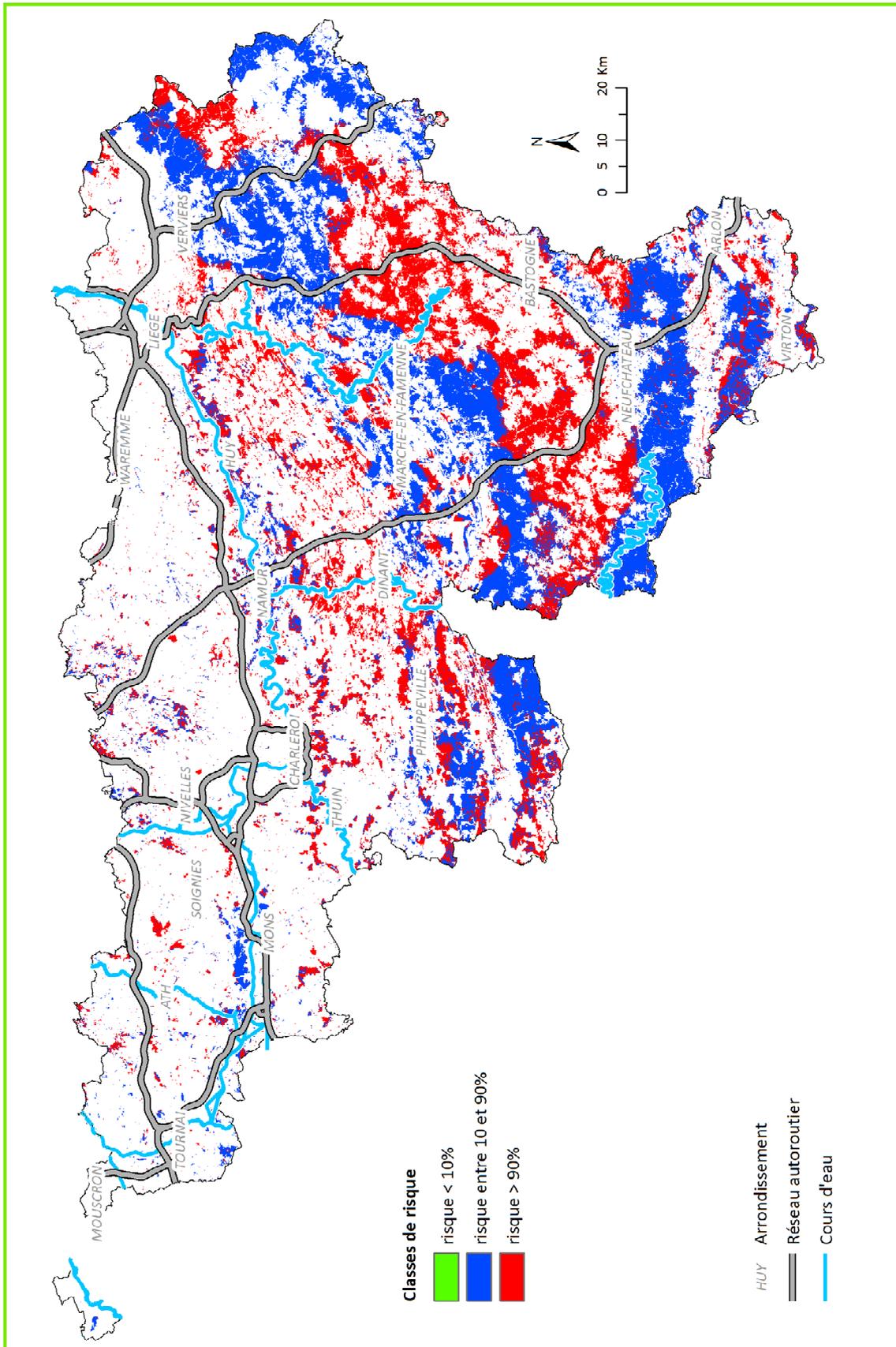


Fig. 35b. Cartes des classes de niveau de risque à 40 cm de profondeur pour pF 2.5 pour le scénario 4 : pneu équipant des porteurs avec une charge de 5450 kg à une pression de 5.5 bars [36].

8. La prévention de la compaction en sols forestiers

Les sols forestiers sont vulnérables, du fait de leur faible résistance mécanique. A l'état naturel, leur masse volumique est faible et avoisine 1 Mg/m^3 dans l'horizon superficiel. Les mesures effectuées en forêt d'Anlier à 40 cm de profondeur montrent que la contrainte de préconsolidation à pF 1.8 $(P_c)_{1.8}$ est inférieure à 100 kPa [15]. Le calcul de $(P_c)_{1.8}$ par les fonctions de pédotransfert de Horn et Fleige [22] indique que, dans la zone centrale de l'Ardenne et la partie Nord de l'Ardenne du Nord-Est (à l'Est de Verviers), $(P_c)_{1.8}$ est inférieur à 60 kPa, ce qui en fait des zones particulièrement sensibles.

Par ailleurs, la régénération naturelle des sols forestiers est un processus lent, basé sur l'action du gel et du dégel, des mécanismes de gonflement-retrait liés à la présence d'argile et à l'activité biologique des racines et de la faune du sol.

Ceci plaide pour adopter des actions préventives plutôt que curatives, afin de maintenir en bon état la structure des sols forestiers. Ces actions consistent à réduire la charge à l'essieu, utiliser des éléments de roulement avec une grande surface de contact avec le sol, travailler à chaque fois que cela est possible en conditions d'humidité favorables du sol, maîtriser l'état physique des sols et adopter des méthodes d'exploitation forestières adaptées.

8.1. Réduction de la charge à l'essieu

La charge appliquée sur une roue donnée est déterminante pour la transmission des contraintes en profondeur mais son impact précis sur la compaction du sol dépend de la texture, de l'humidité, de la teneur en matière organique, ... Le poids statique sur les roues est facile à déterminer, il peut s'obtenir en faisant passer le véhicule sur un pont bascule ou sur des plaques dynamométriques (Fig. 36). Mais c'est la charge dynamique, au travail, qui doit être prise en compte. En particulier, dans le cas de débusqueurs, il faut évaluer les reports de charge provenant de l'effort de traction exercé : une partie du poids de la grume tractée se reporte sur l'essieu arrière de l'engin, tandis que l'essieu avant est allégé.



Fig. 36. Mesure de la charge sous l'essieu par plaques dynamométriques [15].

8.2. Utilisation d'éléments de roulement avec une grande surface de contact au sol

Comme indiqué en 3.2.1, une diminution de la pression de contact est favorable, puisqu'elle permet de réduire les contraintes verticales dans l'horizon superficiel.

Pour réduire la pression de contact, diverses configurations conduisant à l'augmentation de la surface de contact peuvent être utilisées : pneus de grande taille, pneus basse pression, chenilles (Fig. 37). Celles-ci sont à recommander particulièrement en présence de zones à faible résistance mécanique, comme les tourbières ou les sols hydromorphes.



Fig. 37. Porteur équipé de chenilles.

8.3. Travail en conditions d'humidité favorables

Comme montré en 3.1.2, il existe des conditions d'humidité pour lesquelles le sol est sensible à la compaction (Fig. 38). Si elles sont liées au climat, la période d'intervention doit être adaptée, dans la mesure du possible. En présence de sols hydromorphes, il faut recourir à des solutions techniques adaptées.



Fig. 38. Mesure de la teneur en eau volumétrique à l'aide d'une sonde Thétaprobe [15].

8.4. Adoption de méthodes d'exploitation forestière adaptées

Les cloisonnements représentent un réseau de voies de circulation au sein du peuplement. Leur intérêt est de limiter la compaction à une petite portion de la superficie forestière.

Ils sont parfois utilisés dans les éclaircies. Par exemple, lorsque la coupe est réalisée par une abatteuse, il est possible d'ébrancher les grumes et de réaliser des billons dans les cloisonnements, afin que les machines circulent sur un tapis de branchages. Dans les mises à blanc, l'implantation de cloisonnements se généralise peu à peu dans les peuplements résineux mais ils sont encore peu utilisés au sein des peuplements de feuillus [40, 41].

Un argument qui plaide en faveur des cloisonnements est le fait que la masse volumique augmente de manière logarithmique avec le nombre de passage [42], les impacts les plus importants se produisant dans les premiers passages.

La compaction : pour l'éviter

- Limiter les charges sur les roues en prenant en compte celles qui sont liées au report de charge, réduire les efforts de traction pour diminuer le glissement des roues motrices.
- Utiliser des éléments de roulement avec une grande surface au sol : pneus de grande taille, pneus larges, chenilles.
- Travailler en conditions d'humidité favorables.
- Adapter les méthodes d'exploitation forestières adaptées, notamment en utilisant les cloisonnements.

9. Glossaire

Anoxique (milieu) : milieu dépourvu d'oxygène

Capacité au champ = capacité de rétention : volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir. Il s'agit d'un état d'équilibre pendant lequel la microporosité est remplie d'eau alors que la macroporosité est laissée vide pour l'air. Elle dépend de la texture du sol.

Capacité d'infiltration d'un sol : quantité d'eau maximale que le sol est capable d'absorber à travers sa surface.

Cloisonnement d'exploitation : formation d'un réseau de voies de circulation au sein du peuplement pour éviter la compaction de la zone exploitée.

Conductivité hydraulique à saturation : vitesse d'infiltration de l'eau de gravité dans le sol ; valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène.

Contraintes : effort par unité de surface dans un solide qui permettent à la matière de résister aux sollicitations :

- **normales** : contrainte appliquée de manière perpendiculaire à une face d'un solide ;
- **tangentes (ou de cisaillement)** : contrainte appliquée de manière parallèle ou tangentielle à une face d'un matériau.

Contrainte de préconsolidation P_c : contrainte la plus élevée à laquelle un sol a été soumis. Il s'agit de la valeur à ne pas dépasser pour éviter la compaction du sol.

Degré de saturation du sol S_r : rapport, exprimé en pourcents, entre le volume occupé par l'eau dans un sol au volume des vides :

Dénitrification : réduction des ions nitrate (NO_3^-) en ammonium (NH_4^+) ou en azote gazeux (N_2) par l'action de microorganismes. La réaction inverse est appelée **nitrification** (transformation de l'ammonium en nitrate).

Essai oedométrique ou chargement unidimensionnels : principe de mesure de la contrainte de préconsolidation. L'essai consiste à soumettre un échantillon de sol non remanié à des pressions exercées par paliers. La courbe reliant les contraintes aux déformations est la **courbe de compressibilité oedométrique**. Le point d'inflexion de cette courbe, qui sépare la partie initiale ou élastique de la partie finale ou plastique est la contrainte de préconsolidation du sol (P_c).

Indice des vides e : rapport entre le volume des vides et le volume des grains
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Limites d'Atterberg : indicateurs conventionnels désignant la plasticité du sol (état naturellement stable). Ces indicateurs sont généralement :

- **La limite de plasticité** : définit la transition entre un état solide et un état plastique. Cette limite indique la teneur en eau maximale (en %) pour travailler un sol et éviter la compaction.

- **La limite de liquidité** : caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide. C'est le pourcentage de la teneur en eau maximale au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids.

Luvisol : « sol lessivé ». Il est caractérisé par un horizon de surface humifère de forêt ou cultivé et appauvri en argile ainsi que par un horizon de profondeur enrichi en argile.

Masse volumique apparente sèche γ_d : rapport de la masse des grains m_s au volume de sol V , selon l'expression :

$$\gamma_d = \frac{m_s}{V} \quad [Mg / m^3]$$

pF (ou potentiel capillaire): logarithme décimal de la succion de l'eau par le sol, exprimée en cm de colonne d'eau (C.E.).

Pores : espace du sol non occupé par des éléments solides.

Porosité n : rapport du volume de pores au volume total du sol

$$n = \frac{V_v}{V} = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \approx 1 - \frac{\gamma_d}{2.67}$$

Sol ressuyé : sol dont l'humidité est égale à la capacité de rétention.

Succion : La force de succion de l'eau par le sol est provoquée par les phénomènes de capillarité et d'absorption-adsorption de l'eau sur les particules du sol. Plus le sol est humide, moins la succion est élevée, donc moins l'eau est retenue par le sol. Plus le sol se dessèche, plus la force de succion augmente. La succion s'exprime en unités de pression (cm de colonne d'eau, bars, pascals). On l'exprime plus couramment par son logarithme décimal, qui est le pF.

Subsoil : partie inférieure du sol (à partir de 30 cm sous la surface).

Topsoil : partie supérieure du sol (jusque 30 cm en dessous de la surface).

Teneur en eau pondérale du sol w :

$$w = \frac{m_w}{m_s} 100 \quad [\%]$$

Teneur en eau volumétrique du sol θ

$$\theta = \frac{V_w}{V} 100 = w \gamma_d \quad [\%]$$

10. Références bibliographiques

1. Fraters, B. 1996. Generalized Soil Map of Europe. Agregation of the FAO-Unesco soil units based on the characteristics determining the vulnerability to degradation processes. RIVM Report no. 481505006, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, The Netherlands, 60 p.
2. Akker, J., Canarache, A. 2001. Two European concerted actions on subsoil compaction. *Landnutzung und Landentwicklung* 42(1): 15-22.
3. Louwagie, G., Gay, S.H., Burrell, A. 2009. Addressing soil degradation in EU agriculture : relevant processes, practices and policies. In: Addressing soil degradation in EU agriculture : relevant processes, practices and policies. Report on the project 'Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo)'
4. Décret relatif au Code forestier wallon, Moniteur Belge du 12.09.2008.
5. Soltner, D. 2003. Les bases de la production végétale. Tome I. Le sol et son amélioration. Collection Sciences et Techniques agricoles, 472 p.
6. Dexter, A. 1998. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research* 11: 199-238.
7. Horn, R., Taubner, H., Wuttke, M., Baumgartl, T. 1994. Soil Physical-Properties Related to Soil-Structure. *Soil and Tillage Research* 30: 187-216.
8. Rotaru, C. 1985, Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. *Revue Forestière Française*, 1985. 37(5): 359-370.
9. Ranger, J., Lamandé, M., Lefèvre, Y. 2005. Perturbations au sol liées à l'exploitation forestière et conséquences pour l'écosystème. In : Rendez-vous techniques 2005, Office National des Forêts: Fontainebleau : 27-35.
10. Duchaufour, P. 1953. La dégradation de la structure des sols forestiers. *Revue forestière française*, 657-665.
11. Soane, B. D. 1990. The Role of Organic-Matter in Soil Compactibility - a Review of Some Practical Aspects. *Soil and Tillage Research* 16: 179-201.
12. Davies, D.B., Finney, J.B., Richardson, S.J. 1973. Relative effects of tractor weight and wheel slip in causing soil compaction. *Soil Science* 24: 399-409.
13. Smith, D.L.O., 1985. Compaction by wheels: a numerical model for agricultural soils. *J. Soil Sci.* 36: 621-632.
14. Burt, E., Wood, R., Bailey, A., 1992. Some comparison of average to peak soil-tire contact pressures. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 35: 401-404.
15. Destain, M.-F., Barbieux, S., Rosière, C. 2013. Rapport final de la convention 'Evaluation des risques de compaction des sols en Wallonie' financée par le SPW (D GARNE), ULg, 110 p.
16. Lamandé, M., Schjønning, P., 2011. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil and Tillage Research* 114(2): 71-77.
17. Seixas, F., Mc Donald, T. 1997. Soil compaction effects of forwarding and its relationship with 6- and 8-wheel drive machines. *Forest Products Journal* 47 (11-12): 46-52.
18. Servadio, P., A. Marsili, M. Pagliali, S. Pellegrini, Vignozzi, N. 2001. Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. *Soil and Tillage Research* 61: 143-155.
19. Jeandrain, S. 2005. Inventaire du parc d'engins d'exploitation forestière et proposition de recommandations pour l'utilisation des engins d'exploitation forestière. Etude du FEREF.
20. Delecour, F. 1987. Carte des sols et praticabilité des terrains forestiers en Belgique. *Pédologie* XXXVII-3 : 299-316.
21. Geacen, E.L., Sands, R. 1980. Compaction of Forest Soils. A Review. *Aust. J. Soil Res.* 18: 163-189.
22. Horn, R., Vossbrink, J., Peth, S., Becker, S. 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management* 248: 56-63.

23. 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. *Revue Forestière Française* 2 : 124-136.
24. Goutal, N. 2012. Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation. *In* Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l' Environnement. AgroParisTech: Paris. p. 223.
25. Lacey, S., Ryan, P. 2000. Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management* 138: 321-333.
26. Frey, B., Kremer J., Rüdts A., Sciacca S., Matthies D. Lüscher, P. 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology* 45: 312-320.
27. Froehlich, H., Miles, D., Robbins, R. 1985. Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. *Soil Science Society of America Journal* 49: 1015- 1017.
28. Heilman, P. 1981. Root penetration of Douglas-fir Seedlings into Compacted Soil. *Forest Science* 27: 660-666.
29. Horn, R., Fleige, H. 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil and Tillage Research* 73: 89-99.
30. Schäffer, B, Stauber M., Mueller T.L., Müller, R., Schulín, R. 2008a. Soil and macro-pores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. *Geoderma* 146: 183-191.
31. Schäffer, B, Mueller T.L., Stauber M., , Müller, R., Keller,M., Schulín, R. 2008b. Soil and macro-pores under uniaxial compression. II. Morphometric analysis of macropore stability in undisturbed and repacked soil. *Geoderma* 146: 175-182.
32. Kulli, B., Flühler, H. 2003. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. *Soil and Tillage Research* 70: 29-40.
33. Jarvis, N.J. 2007. A review of non equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science* 58: 523-546.
34. Van Orshoven, J., Maes, J., Vereecken, H., Feyen, J., Dudal, R. 1988. A structural database of Belgian soil profile data. *Pédologie (Gent)* 38: 191-206.
35. Wösten, J., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90: 169-185.
36. Ephesia 2013. Convention 'Evaluation des risques de compaction des sols en Région Wallonne, Appui à la cartographie de la contrainte de préconsolidation'. Rapport final. 103 p.
37. Hollis, J., Hannam, J., Bellamy, P. 2012. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European Journal of Soil Science* 63: 96-109.
38. Keller, T., Defosse, P., Weisskopf, P., Arvidsson, J., Richard G. 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research* 93: 391-411.
39. Keller, T. Stettler, M., Arvidsson, J., Lamandé, M., Schjonning P., Berli M., Rydberg T. (2009). Stress propagation in arable soil: Determination and Estimation of the Concentration Factor. *In* ISTRO 18th Conference Proceedings, June 15-19, Izmir (Turkey).
40. De Paul, M.A., Bailly, M., Heyninck, C. 2009. Le cloisonnement d'exploitation pour préserver les sols forestiers. *Forêt wallonne* 101: 141.
41. Jandrain, S. 2012. Etude technico-économique de la récolte de bois feuillus par la méthode du cloisonnement. Rapport final, Convention financée par la Région Wallonne.
42. Brais, S., Camiré, C. 1998. Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). *Can. J. Soil Sci.* 78: 197-206.