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

La compaction des sols agricoles en Wallonie

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

UNIVERSITE DE LIEGE
(Gembloux Agro-Bio Tech)

La compaction des sols agricoles 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 forestiers en Wallonie

Table des matières

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE 7

2. LA COMPACTION DES SOLS : QU'EST-CE QUE C'EST ? 9

3. LA COMPACTION DES SOLS : UN PROBLÈME MULTIDISCIPLINAIRE 10

3.1. LES CARACTÉRISTIQUES DU SOL 11

3.1.1. La texture du sol 11

3.1.2. La teneur en eau du sol 12

3.1.3. La structure du sol 13

3.1.4. La matière organique 14

3.2. LE PASSAGE DE VÉHICULES ÉQUIPÉS DE PNEUMATIQUES 14

3.2.1. Surface de contact, pression de gonflage, pression de contact moyenne 14

3.2.2. Charge sur la roue 16

3.2.3. Intensité du trafic, vitesse 17

3.2.4. Pression de contact moyenne et opérations culturales 17

3.3. LES PRATIQUES AGRICOLES 18

3.3.1. Calendrier des opérations 18

3.3.2. Le travail du sol 19

4. LES CONSÉQUENCES DE LA COMPACTION DES SOLS AGRICOLES 21

4.1. EFFETS SUR LES PROPRIÉTÉS DU SOL 21

4.2. EFFETS SUR LA FERTILITÉ DU SOL 22

4.3. EFFETS SUR LES PLANTES ET LES RENDEMENTS 23

4.4. EFFETS SUR LA QUALITÉ DU TRAVAIL DU SOL 24

5. LA MESURE DE LA COMPACTION 25

5.1. MASSE VOLUMIQUE, POROSITÉ TOTALE 25

5.2. CONTRAINTE DE PRÉCONSOLIDATION 26

5.3. MESURES INDIRECTES 28

6. LA SENSIBILITÉ À LA COMPACTION DES SOLS DE WALLONIE 30

6.1. MÉTHODOLOGIE 30

6.2. CARTES DE SENSIBILITE A LA COMPACTION DES SOLS WALLONS 33

6.2.1. Masse volumique apparente sèche 33

6.2.2. Contrainte de préconsolidation 35

7. LES RISQUES DE COMPACTION 38

8. LA GESTION DE LA COMPACTION DES SOLS EN MILIEU AGRICOLE 43

8.1. POSSIBILITÉS TECHNIQUES 43

8.1.1. Le véhicule 43

8.1.2. La pression de contact pneu-sol 43

8.2. LIMITATION DES CHARGES 44

8.3. ADAPTATION DES MÉTHODES DE TRAVAIL 44

8.3.1. Planification des interventions 44

8.3.2. Labour hors raie 45

8.3.3. Opérations combinées 45
8.3.4. Controlled Traffic Farming et striptill 45
8.4. MAÎTRISE DE L'ÉTAT PHYSIQUE DES SOLS 46
8.4.1. Les techniques de travail du sol 46
8.4.2. Mise en place de cultures intermédiaires 47
9. GLOSSAIRE 48
10. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 50

1. Introduction générale

Dans nos pays industrialisés, l'agriculture fait appel à des machines de plus en plus lourdes. Lorsque des charges élevées sont appliquées sur des sols sensibles, une compaction du sol peut se produire conduisant à des diminutions de rendements suite aux difficultés que rencontrent les racines pour prélever l'eau et les nutriments et à la perturbation de l'activité de la pédofaune.

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

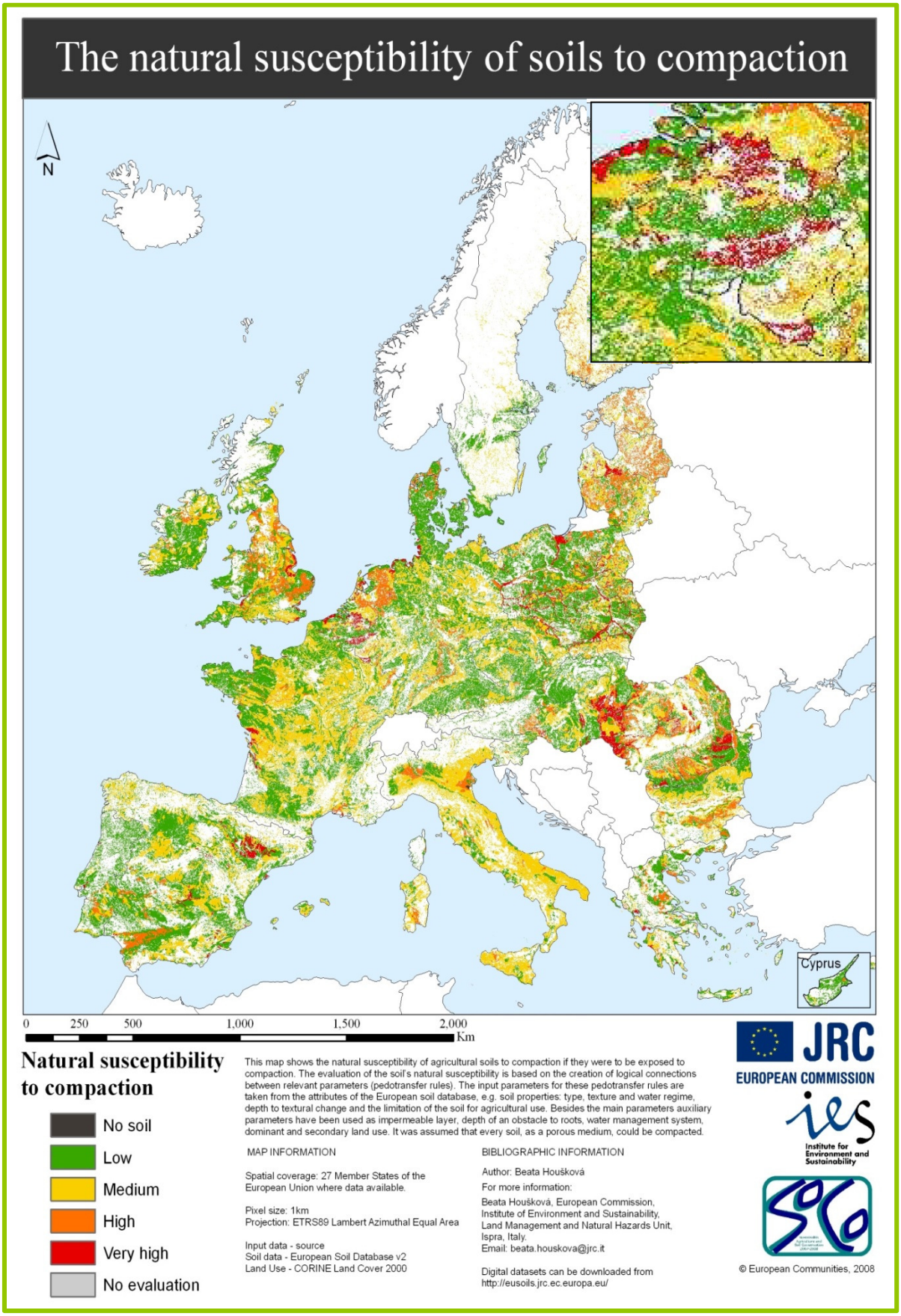

Fig. 1. Sensibilité à la compaction des sols européens [3].

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).

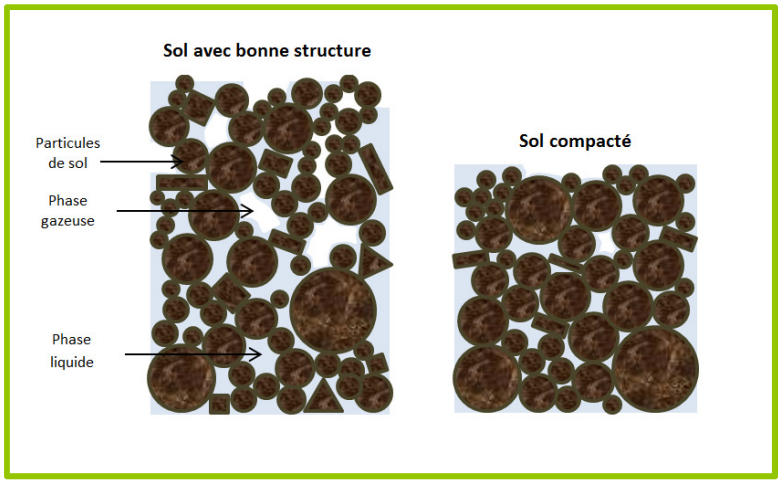

Fig. 2. A gauche : sol non compacté ; à droite : sol compacté.

Pour quantifier la compaction, on utilise 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 Pc.

γ_d est le rapport de la masse des grains m_s au volume de sol V. La porosité totale 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. Dans la macroporosité, la circulation de l'eau est aisée dans le sol. 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) desquels les plantes ne parviennent pas à extraire l'eau 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 [4].

La contrainte de préconsolidation Pc caractérise la résistance mécanique du sol. Elle est habituellement définie à partir d'un essai de déformation uniaxiale. Dans celui-ci, l'indice des vides (c'est-à-dire le rapport entre le volume des vides et le volume des grains) décroît avec le logarithme de la contrainte appliquée selon une droite A connue sous le nom de ligne vierge (Fig. 3). 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 cultivés 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 ma-

nière irréversible jusqu'à atteindre un nouvel état correspondant par exemple aux courbes B' et C' : c'est la compaction [5, 6].

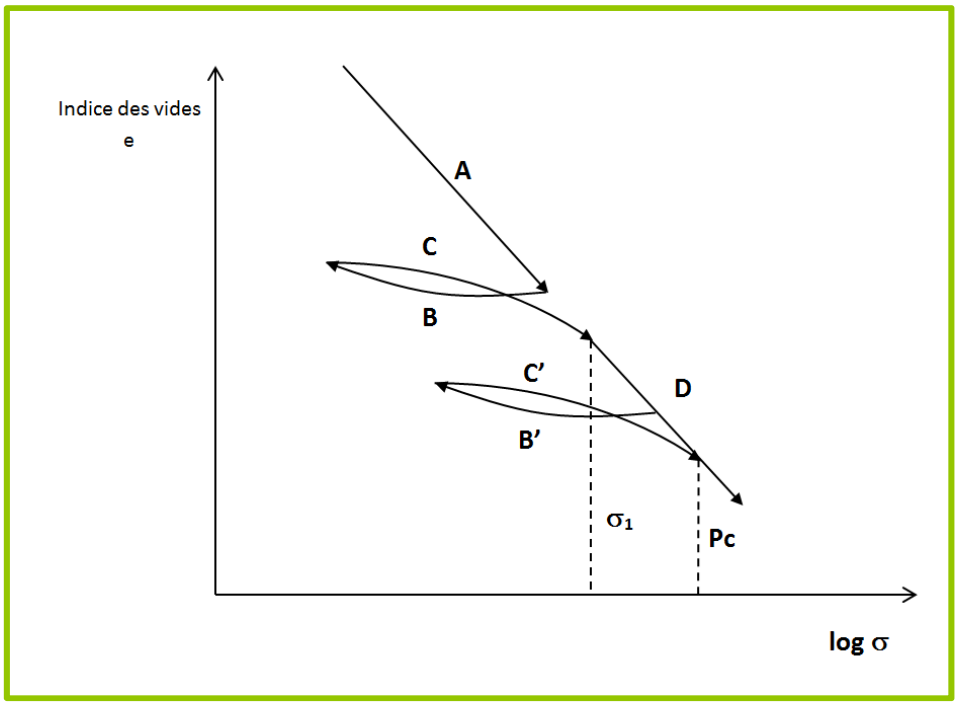

Fig. 3. Comportement d'un sol : indice des vides en fonction du logarithme de la contrainte appliquée, à une teneur en eau donnée.

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.

La compaction concerne les couches superficielles du sol, comprises entre 0 et 30 cm ('topsoil') et les couches plus profondes ('subsoil'). Dans les sols cultivés, la compaction des couches de surface est réversible sous l'action du travail du sol et des cycles gel-dégel. Par contre, la compaction des couches plus profondes situées au-delà de 30 cm est plus difficilement réversible.

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, de leur contenu en matière organique. Les pratiques agricoles ont une double influence : elles peuvent modifier les propriétés initiales du sol et avoir un impact sur les caractéristiques des véhicules qui se déplacent au champ (Fig. 4).

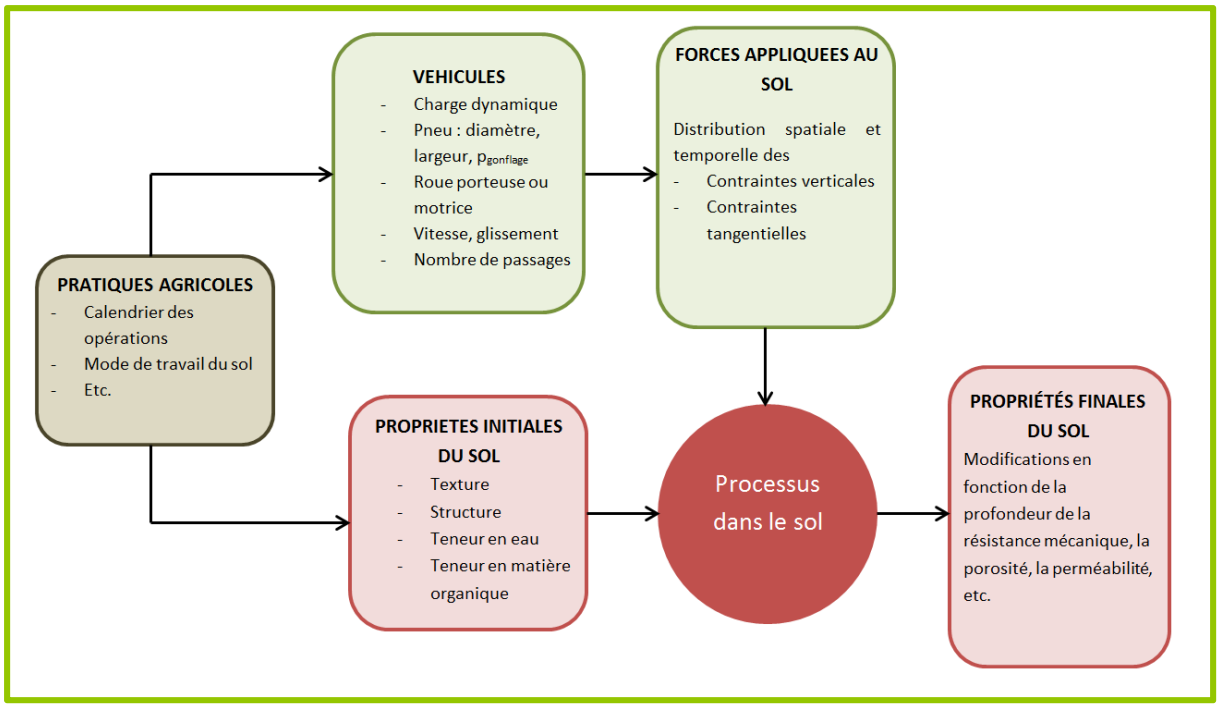

Fig. 4. Relations entre les propriétés finales du sol, les propriétés initiales et les forces appliquées.

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. 5 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 des textures les plus grossières (les moins sensibles) vers les textures les plus fines (les plus sensibles), selon :

sable < 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.

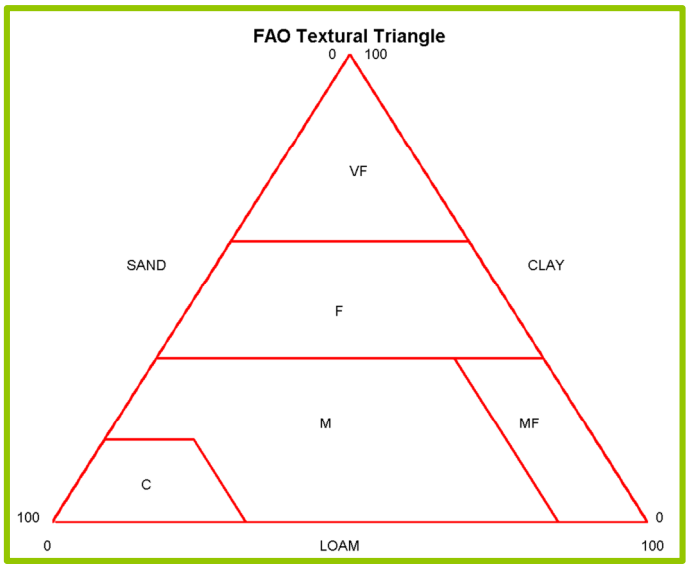

Fig. 5. Triangle textural FAO/HYPRES. Sand (sable), Loam (limon), Clay (argile), C = coarse (texture grossière), M (texture moyenne), MF (texture moyenne fine), F (texture fine), VF (texture très fine).

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. L'essai Proctor permet d'estimer la teneur en eau critique pour laquelle le tassement est maximal, à une énergie de compression donnée (Fig. 6).

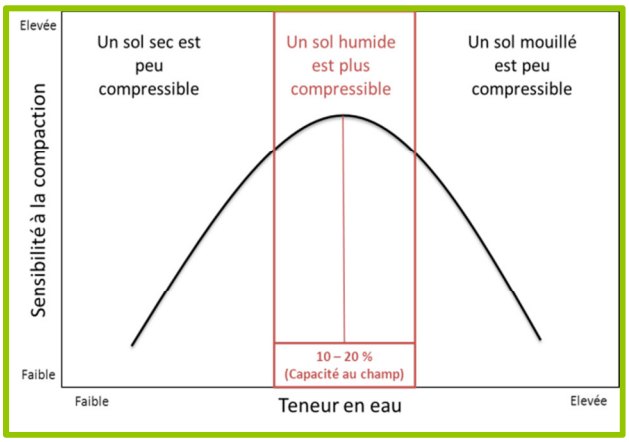

Fig. 6. Sensibilité du sol à la compaction en fonction de la teneur en eau.

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. 7).

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 agricoles, cette notion nous indique que le sol est sensible à la compaction lorsque I_c est compris entre 0.7 et 1.3.

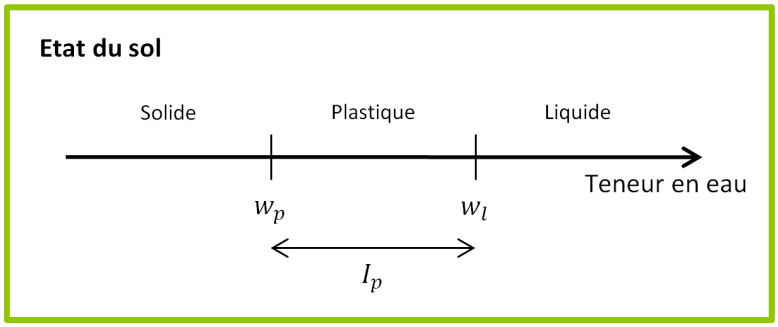

Fig. 7. Comportement du sol en fonction de la teneur en eau et limites d'Atterberg : limite de plasticité (w_p) et de liquidité (w_l), indice de plasticité () .

3.1.3. La structure du sol

La structure est définie comme le plus petit niveau d'organisation du sol visible à l'œil nu (Fig. 8). Il s'agit d'une caractéristique fondamentale du sol : la structure influence le fonctionnement physique du sol (déplacement de l'air et de l'eau, évolution de la température, …) et détermine les conditions de vie des êtres vivants dans le sol. Un bon état structural est un élément clé de la fertilité des sols. La structure évolue sans cesse sous l'effet des contraintes subies par le sol, qu'elles soient d'origine climatique, biologique ou anthropique.

La structure influence la sensibilité à la compaction. Des sols possédant une haute stabilité structurale du fait de leur teneur élevée en argile et en carbonate de calcium, de la présence de matière organique, d'un drainage favorable et d'une bonne activité biologique ont une structure stable qui offre une meilleure résistance aux agents externes. Par exemple, une structure de type prismatique ou polyédrique présente une résistance aux charges plus importante qu'une structure massive [6].

Fig. 8. Analyse de la structure du sol [7].

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.

Pour une contrainte donnée, une teneur élevée en matière organique améliore la stabilité des agrégats, augmente l'élasticité du sol et réduit sa sensibilité à la compaction. 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 [8].

3.2. Le passage de véhicules équipés de pneumatiques

Lorsqu'une roue se déplace sur le sol, elle engendre des contraintes qui provoquent une déformation du sol (Fig. 9). Cette déformation est particulièrement visible en surface, où apparait 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 [9].

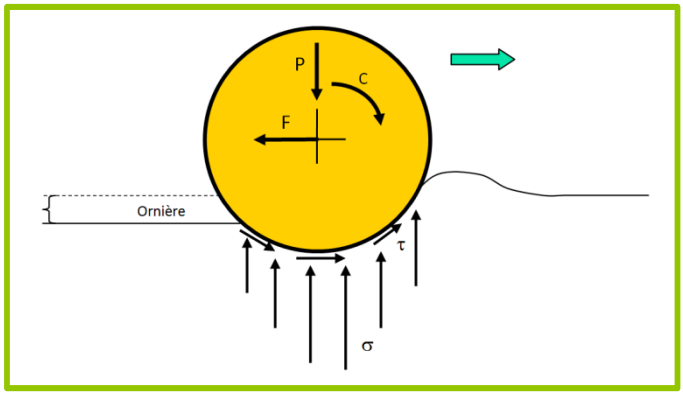

Fig. 9. Equilibre d'une roue motrice. C = couple, P = charge verticale, F = effort de traction, σ = contraintes verticales, τ = contraintes tangentielles.

L'interaction pneu-sol est un phénomène complexe et encore mal connu avec précision. Cette complexité est notamment liée au fait qu'un sol cultivé présente une succession d'horizons avec des lois de comportement différentes, qui varient en fonction de la teneur en eau. Par exemple, suite à la présence d'horizons compactés, comme une semelle de labour, les contraintes peuvent être réparties sur une plus grande surface dans les horizons superficiels et être réduites dans les horizons sous-jacents [10].

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

La pression de contact moyenne p_c 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 [11, 12]. La Fig. 10 représente la distribution des contraintes modélisée à l'interface pneu - sol. 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 à l'interface atteignent 200 kPa avec le pneu 650R38, alors qu'elles ne dépassent pas 140 kPa avec le 800R38.

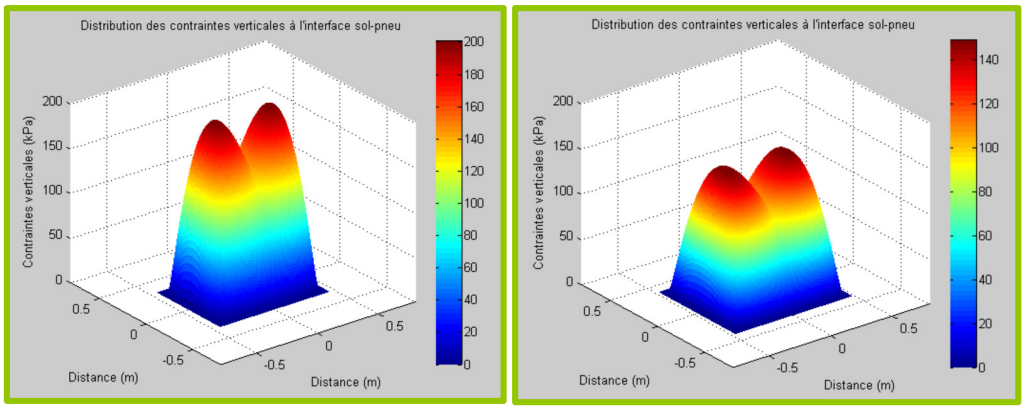

Fig. 10. Distribution des contraintes verticales à l'interface sol – pneu - Charge = 6000 kg. A gauche, pneu 650R38, pression de gonflage = 1.2 bar ; à droite, pneu 800R38, pression de gonflage = 1 bar.

A charge égale, il est 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. 11.

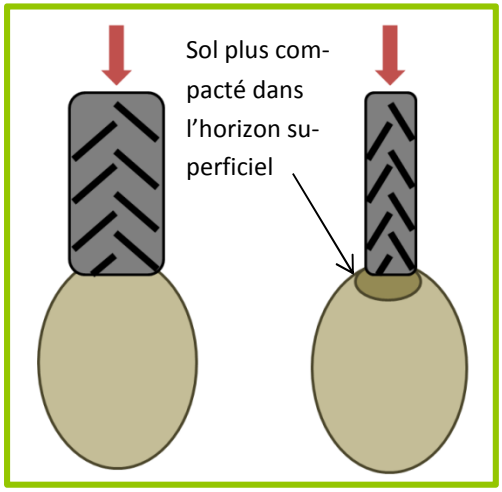

Fig. 11. A charges égales, une roue large permet d'uniformiser les contraintes verticales dans la zone de contact et de réduire la compaction dans l'horizon superficiel.

Remarque : La pression de contact moyenne 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_c 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 [8].

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 manufacturiers. La Fig. 12 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.

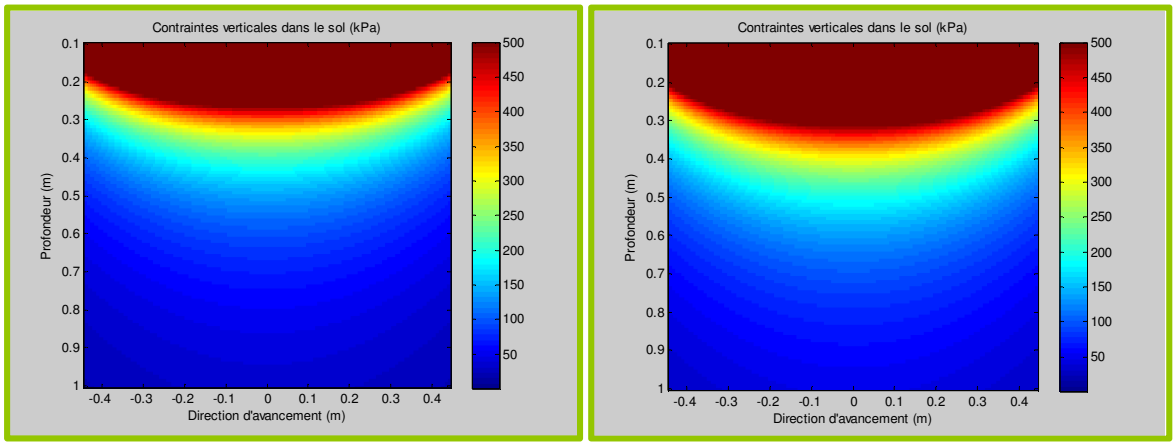

Fig. 12. Distribution des contraintes verticales dans le sol – Pneu 650R38
A gauche, charge = 5730 kg, pression de gonflage = 1 bar ;
à droite, charge = 8030 kg, pression de gonflage = 2.4 bar.

Ces résultats vont dans le même sens que des mesures effectuées par Lamandé et Schjønning (2011) dans un Luvisol, dans des conditions défavorables [13]. Lorsque le sol se trouve à la capacité au champ, on mesure encore 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, à une profondeur de 90 cm.

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. 13.

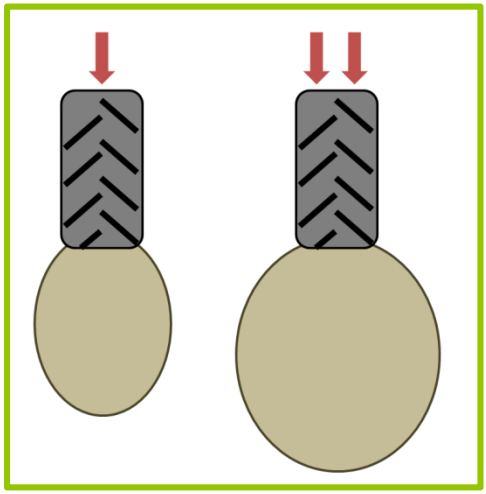

Fig. 13. Pour des pneus identiques, une augmentation de charge donne lieu à des contraintes verticales qui se transmettent à plus grande profondeur.

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.

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 [14, 15].

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 [16].

3.2.4. Pression de contact moyenne et opérations culturales

On a vu qu'il est intéressant de réduire la pression de contact moyenne pour diminuer la compaction des horizons superficiels. Le Tableau 1 montre les interventions culturales majeures regroupées en trois catégories selon la pression moyenne de contact. C'est pour les machines de récolte de betteraves et leur transport que la pression moyenne est la plus élevée.

Tableau 1. Classement des opérations culturales majeures en fonction de la pression moyenne exercées par les machines à l'interface sol-pneu (adapté de [16]).

Catégories	Opérations culturales	Culture	Pression moyenne (kPa)
1	Préparation du lit de semence	Betterave, maïs, colza	50 – 60
	Combinaison préparation et semis	Froment	50 – 60
	Déchaumage	Colza	50 – 60
2	Semis	Betteraves	80 – 90
	Semis	Maïs	70 – 90
	Semis	Colza	80 – 90
	Ensilage	Maïs	65 – 85
3	Récolte	Froment, colza	80 – 100
	Récolte	Maïs	90 – 110
	Récolte	Betteraves	90 – 110
	Transport	Betteraves	100 – 110

- *A charge constante, l'utilisation de pneus larges à basse pression permet de répartir les contraintes sur une surface plus grande 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.*

3.3. Les pratiques agricoles

3.3.1. Calendrier des opérations

La teneur en eau dans le sol varie en fonction de la période de l'année. La Fig. 14 donne, à titre d'exemple, la pluviométrie ainsi que les teneurs en eau de trois horizons HR1 (0 - 30 cm), HR2 (30 - 50 cm) et HR3 (50 - 70 cm), en région limoneuse sous une culture de blé d'hiver, au cours de l'année 2008 [17]. On voit que la teneur en eau fluctue fortement dans l'horizon superficiel, les alternances climatiques s'y manifestant plus fortement. Ces fluctuations sont amorties au fur et à mesure que la profondeur augmente. C'est ainsi qu'à 40 cm de profondeur, la teneur en eau est stable de début octobre à fin mars (6 mois) et, pour le système plante – sol considéré, est proche de 20 %. Cette teneur en eau diminue entre avril et septembre.

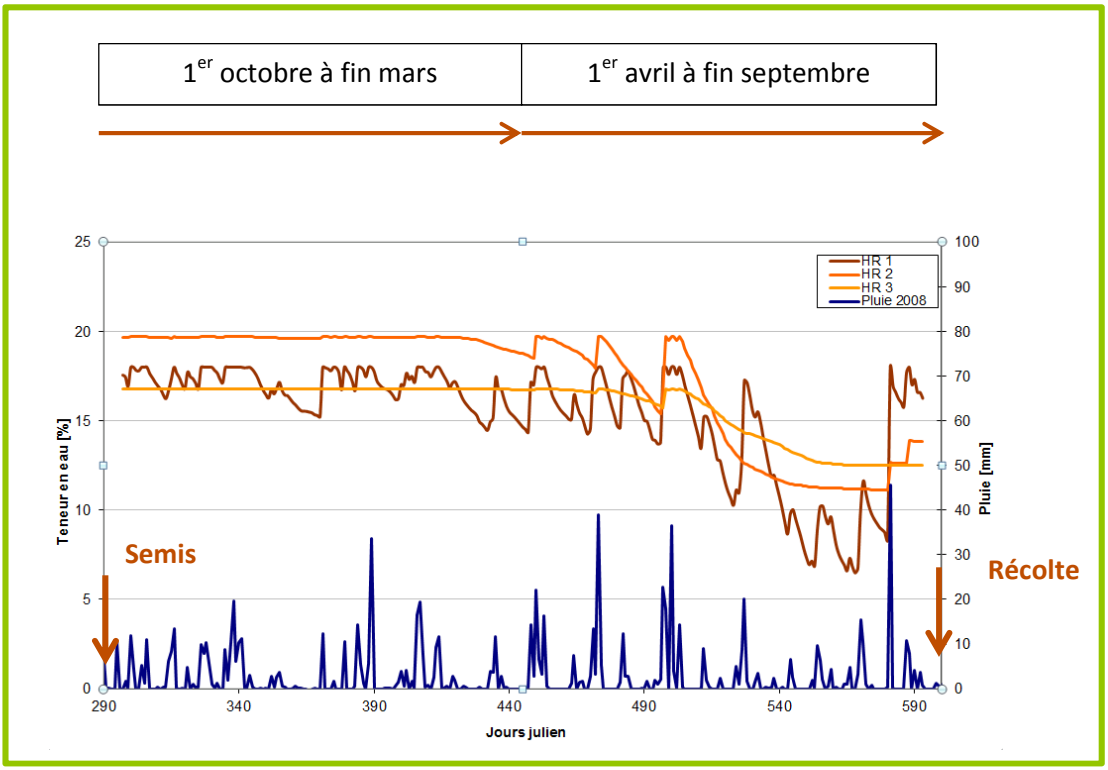

Fig. 14. Evolution de la teneur en eau sous une culture de blé d'hiver (Triticum aestivum L.) en région limoneuse ; HR1 : horizon de 0 - 30 cm ; HR2 : horizon de 30 - 50 cm ; HR3 : horizon de 50 - 70 cm [17].

D'une manière générale, dans nos régions, on distingue deux périodes :

- Une période sèche, d'avril à septembre, où la teneur en eau moyenne du sol est inférieure à la capacité au champ. L'impact du passage des machines sur la compaction des horizons profonds est peu important.
- Une période humide, d'octobre à mars, pour laquelle les risques de compaction dus aux passages d'engins agricoles lourds seraient plus élevés.

Fig. 15. Débardeuse de betteraves.

En Wallonie, la récolte de betteraves pourrait engendrer une compaction du sol du fait qu'elle est pratiquée durant l'automne par des machines (débardeuses ou intégrales) dont la charge à l'essieu peut dépasser 10 tonnes (Fig. 15). La profondeur de sol affectée par ces machines dépasse 60 cm [18].

3.3.2. Le travail du sol

Dans le travail du sol conventionnel, au cours du labour traditionnel, deux roues du tracteur se déplacent dans la raie de labour (Fig. 16). A cet endroit, le sol plus humide, est particulièrement sensible à la compaction. Cette zone n'est pas ameublie par les façons culturales ultérieures, à moins que l'on ne procède à un sous-solage. Ceci explique que ce mécanisme soit à l'origine de la semelle de labour, horizon plus dense dans le profil résultant des opérations de travail du sol.

Malgré les effets négatifs sur le développement des plantes qui découlent de la forte résistance mécanique et qui limitent les échanges gazeux et le mouvement de l'eau, la semelle de labour pourrait offrir un effet bénéfique : en raison de sa résistance, elle pourrait protéger le sous-sol de compactage supplémentaire [19].

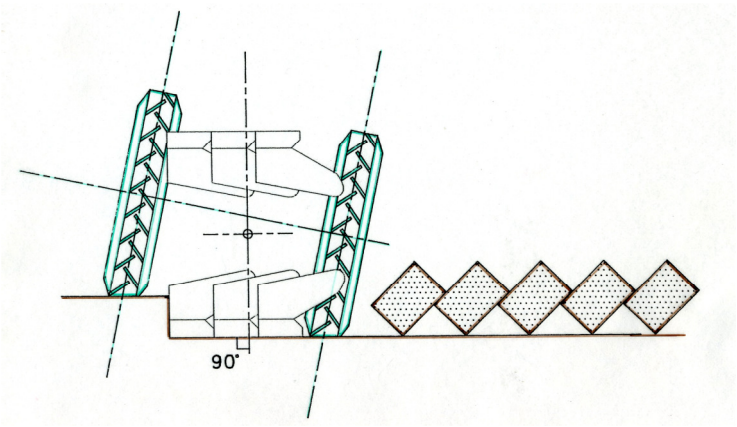

Fig. 16. Charrue au travail, avec roues dans la raie.

Par ailleurs, de plus en plus d'agriculteurs mettent en œuvre des techniques culturales simplifiées (TCS), selon différentes modalités. Parmi celles-ci, il faut mentionner celles qui sont basées sur la suppression permanente du labour. Dans ce dernier cas, les propriétés du sol sont modifiées. D'une manière générale, la résistance mécanique d'un sol cultivé sous TCS est plus élevée que celle créée par un travail du sol conventionnel et il est important d'évaluer les effets à long terme liés à la sup pression du labour.

La sensibilité à la compaction d'un sol dépend de:

- 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.

La sensibilité à la compaction dépend des pratiques agricoles

- Les **opérations culturales** les plus critiques sont celles qui sont effectuées entre début octobre et fin mars, au moment où les sols sont humides.
- Le **labour conventionnel** avec roue dans la raie est responsable de la semelle de labour mais celle-ci n'induit pas toujours des effets négatifs.

4. Les conséquences de la compaction des sols agricoles

4.1. Effets sur les propriétés du sol

La compaction affecte les propriétés mécaniques et physiques du sol [20 à 26]. Le plus souvent, on observe une augmentation de la masse volumique γ_d sous l'effet des charges appliquées jusqu'à 0.3 m de profondeur. Une valeur élevée de γ_d implique une capacité réduite de stockage et de transport de l'eau et de l'air.

La compaction diminue la capacité à l'air c_a, c'est-à-dire la porosité occupée par l'air. Pour des valeurs de c_a inférieures à 5 %, des zones hydromorphiques peuvent apparaître. La distribution de la taille des pores de même que leur connectivité et leur tortuosité est affectée. Les pores de grande taille qui drainent l'eau entre la saturation et la capacité au champ ont tendance à être détruits les premiers, alors que les pores de plus petite taille deviennent plus nombreux. De ce fait, la conductivité hydraulique à saturation K_s est réduite, des valeurs de K_s inférieures à 10 cm/jour devenant problématiques. L'infiltration de l'eau dans le sol est réduite, principalement dans l'horizon superficiel (Fig. 18). L'eau s'infiltre beaucoup plus facilement dans des sols avec des agrégats bien individualisés que dans des sols possédant une structure massive.

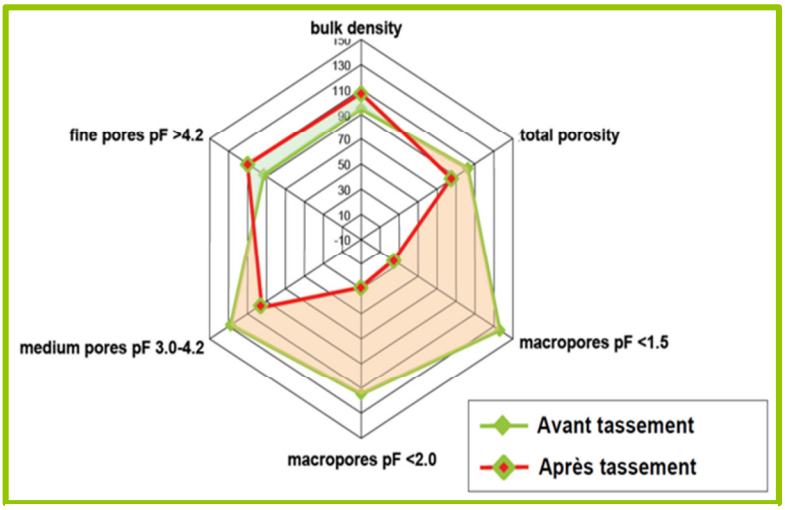

Fig. 17. Effets d'un tassement sur la masse volumique (bulk density) et sur les différentes classes de tailles de pores. Les unités sont des valeurs relatives par rapport à un traitement témoin sans compaction (Rapport de la convention Elipsol).

Du fait de la présence de zones compactées, comme par exemple une semelle de labour, l'eau et les solutés sont susceptibles de suivre des chemins d'écoulement préférentiels (galeries de vers ou macropores biologiques) [27, 28]. Les solutés ne traversant pas les couches de sol dans lesquelles les processus de transformation et de rétention sont les plus actifs, une pollution peut apparaître. Les effets de la compaction sur le transport des solutés dépendent de la nature du composé chimique. Par exemple, après une irrigation, l'écoulement de l'azote et du potassium est ralenti quand la compaction augmente alors que celui du phosphore est accéléré [29].

La présence de zones compactées peut aussi entraîner une accumulation de l'eau à la surface du sol avec une augmentation des écoulements latéraux et du ruissellement [25]. Il en résulte une augmentation des risques d'inondation et de pollution de surface provenant des épandages organiques (purin, boues), des pesticides, herbicides et autres intrants ainsi qu'une réduction de recharge des eaux souterraines [19, 25, 30]. Une augmentation du risque d'érosion sur des sols en pente, même faible

(2-4%), existe via une quantité d'eau trop importante présente au-dessus d'une zone compactée [27].

Lorsque la teneur en eau dans le sol est importante, des zones anaérobies peuvent se former aux endroits plus compactés. Dans ces conditions, une augmentation de l'émission vers l'atmosphère de N_2O, puissant gaz à effet de serre, peut être observée [31, 32].

Fig. 18. Accumulation d'eau à la surface du sol dans un sol compacté.

4.2. Effets sur la fertilité du sol

Une compaction excessive a pour principale conséquence une perte de fertilité liée à la perturbation de la respiration des microorganismes du sol ou à la difficulté pour les racines de prélever l'eau et les nutriments essentiels [33]. En effet, du fait de la plus forte résistance à la pénétration qu'elle induit, une couche compactée ralentit le développement en profondeur des racines et les rend plus vulnérables aux maladies. Celles qui arrivent toutefois à croître à travers cette couche peuvent être déformées [32, 39].

Comme on l'a dit précédemment, la compaction influence l'aération et donc le cycle de l'azote. Dans les cas sévères, la nitrification est inhibée par le manque d'oxygène dans le sol, ce qui conduit à une dénitrification. Ce phénomène peut réduire la quantité de nitrates présents dans le sol, le rendant moins disponible pour les plantes. Les échanges de gaz carbonique (CO_2) sont également diminués [31]. Un excès d'eau dans une zone compactée peut également entrainer des pertes en phosphore [34].

La faune du sol est, elle aussi, affectée par la compaction. La densité de population et le spectre d'espèces diminuent, ce qui entraine une réduction de l'activité biologique [35].

Tous ces impacts dus à la compaction des horizons profonds conduisent à une diminution des rendements et à des augmentations des coûts (consommation plus importante de carburant et d'intrants, utilisation plus intensive des machines, frais de remédiation) [25].

4.3. Effets sur les plantes et les rendements

Les effets de la compaction sont néfastes sur le développement des racines des plantes en raison d'une part de la modification de l'espace poral, de la réduction de l'aération du sol et d'autre part de l'augmentation de la masse volumique et de la résistance à la pénétration [36, 37].

La compaction n'affecte pas toutes les cultures de la même manière. Son impact est plus négatif sur les rendements des racines (par ex. les betteraves) et des tubercules (par ex. les pommes de terre) que sur celui des céréales (Tableau 2).

Tableau 2. Sensibilité des cultures à la compaction du sol [57].

	Niveau d'exigence	Profondeur de compaction la plus pénalisante	Conséquences
Graminées fourragères	+	-	Conséquences indirectes de la structure sur l'asphyxie racinaire
Blé	++	0 cm	
Escourgeon, orge hiver	++(+)	-	
Colza	+++	10-15 cm	
Pois d'hiver	++(+)	-	
Orge de printemps	+++	10-15 cm	
Pois de printemps, féverole	+++	10-15 cm	
Lupin, soja	+++	-	
Sorgho	+++	-	
Maïs	++++	25 cm	
Tournesol	++++	-	
Betterave sucrière	+++++	25 cm	Impact sur la qualité (betteraves fourchues, tare terre, qualité du tubercule)
Pomme de terre	+++++	25 cm	

+ : très peu sensible ; +++++ : très sensible.

Une réponse courante du système racinaire face à une augmentation de masse volumique est de diminuer sa longueur en se concentrant dans la couche supérieure du sol et en réduisant la profondeur d'enracinement [38, 39]. Le développement des racines peut être affecté si la masse volumique du sol est supérieure à 1.60 Mg/m³ et peut être limité si elle dépasse 1.75 Mg/m³ (USDA NACS Soil Quality Test Kit Guide). La valeur seuil à laquelle la résistance du sol entrave le développement racinaire dépend du type de plantes mais elle est généralement comprise entre 2000 and 3000 kPa. Le changement d'anatomie des racines affecte l'efficacité des plantes à prélever et à utiliser l'eau et les nutriments ainsi que leur tolérance à la sécheresse. Cette limitation dans les prélèvements induit une perte d'efficacité des fertilisants [36].

Des études ont montré que, dans un sol compacté dont la résistance à la pénétration excède 2000 kPa, la longueur des racines de différentes espèces céréalières (blé, orge, maïs, triticale et seigle) est réduite d'au moins 50% par rapport à un sol non compacté. La proportion de radicules secondaires augmente avec le taux de compaction du sol au détriment des racines principales [40].

4.4. Effets sur la qualité du travail du sol

Un travail du sol donné n'a pas le même résultat sur un sol compacté et sur un sol qui ne l'est pas. La fragmentation d'un sol tassé est mauvaise. Un réseau de « blocs-creux » et de fissures peut être créé, engendrant des chemins préférentiels pour l'eau. De plus, un sol compacté entraine la formation de lissages qui sont des freins à l'infiltration de l'eau et au développement racinaire (C. Roisin, communication orale).

La compaction : ses conséquences

La compaction donne lieu à une diminution de la porosité totale mais induit aussi une modification de l'arrangement des constituants du sol, ce qui a des effets négatifs sur le transport des fluides dans le sol et son fonctionnement.

- Au niveau de la fertilité des sols :
  - Les plantes racines (ex. les betteraves) et les tubercules (ex. les pommes de terre) sont plus sensibles à la compaction que sur les céréales.
  - La croissance de la faune du sol et des microorganismes est perturbée.
  - La compaction des couches profondes est particulièrement problématique du fait de sa persistance et des difficultés qui existent pour y porter remède.

- Au niveau environnemental :
  - 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.

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 (Fig. 19), selon l'expression :

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

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:

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

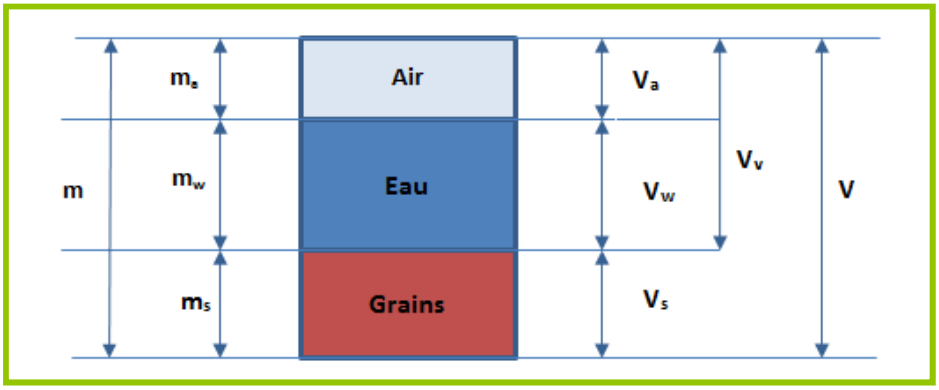

Fig. 19. Représentation schématique des différentes phases d'un sol.

Exemple : Effet du passage d'une débardeuse de betteraves en sol limoneux, travaillé de façon conventionnelle sous labour ou en techniques culturales simplifiées (TCS) sans labour [41].

Les débardeuses sont des machines lourdes, qui interviennent souvent au moment où le sol est humide. Dans ces conditions défavorables, la masse volumique du sol augmente et la porosité totale diminue, aussi bien en labour qu'en TCS.

A 20 cm de profondeur, en labour, la diminution de porosité totale est importante mais concerne principalement la macroporosité (Fig. 20). En TCS, la diminution de porosité totale est moins élevée qu'en labour mais elle peut s'accentuer au cours des années puisque le sol n'est plus labouré. Son évolution est liée à la teneur en argile et en eau du sol qui sont déterminantes sur le comportement de type retrait-gonflement du sol et l'importance des micro-fissures.

A 40 cm de profondeur, la masse volumique, déjà élevée (de l'ordre de 1.50 pour le labour et 1.55 Mg/cm^3 pour le TCS), augmente encore. La porosité totale diminue (Fig. 21).

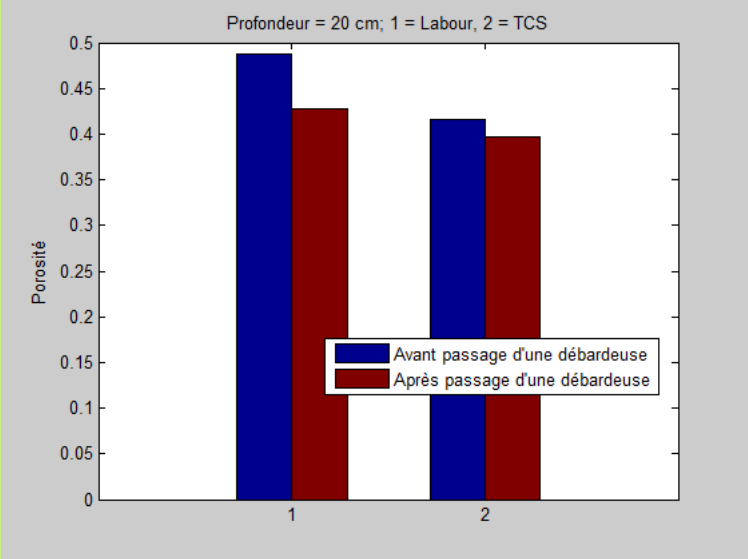

Fig. 20. Diminution de porosité en labour (1) et TCS (2), à 20 cm de profondeur, suite au passage d'une débardeuse de betteraves, en sol limoneux.

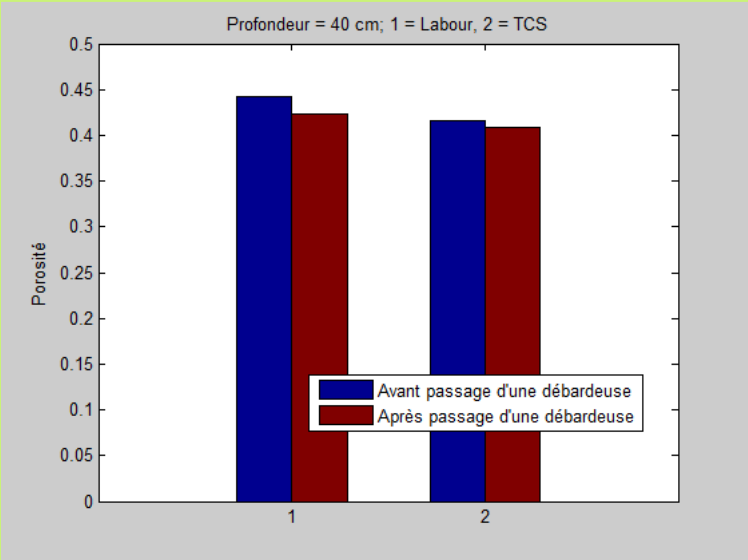

Fig. 21. Diminution de porosité en labour (1) et TCS (2), à 40 cm de profondeur, suite au passage d'une débardeuse de betteraves, en sol limoneux.

5.2. Contrainte de préconsolidation

Selon Dexter [5], le fait d'appliquer une charge sur le sol conduit à sa compaction si la contrainte de préconsolidation est dépassée. Celle-ci est mesurée en laboratoire, en réalisant des essais de char-

gement unidirectionnels ou essais oedométriques (Fig. 22). 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. 23). Le point d'inflexion de cette courbe, qui sépare la partie élastique de la partie plastique est la contrainte de préconsolidation du sol (Pc).

Fig. 22. Oedomètres automatiques.

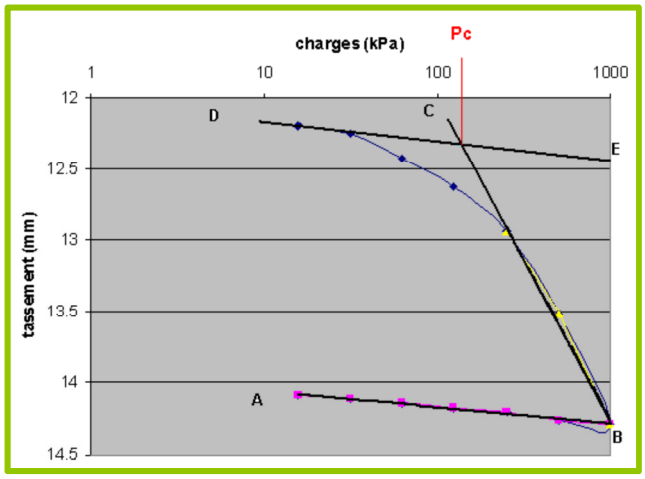

Fig. 23. Courbe oedométrique.

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 Pc 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, Pc 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'une débardeuse de betteraves en sol limoneux, travaillé de façon conventionnelle sous labour ou en techniques culturales simplifiées (TCS) sans labour [41].

La contrainte de préconsolidation Pc traduit la résistance mécanique du sol. Cette résistance est plus élevée en TCS qu'en labour (Fig. 24 et 25). Le sol possède donc une meilleure portance en TCS, ce qui peut donner l'impression que le passage des machines ne donnera lieu à aucun problème. Pourtant, il faut être attentif au fait que, suite au passage des machines, Pc augmente et la porosité diminue. Par ailleurs, Pc est plus élevé à 40 cm qu'à 20 cm. Ceci met en évidence l'effet cumulatif en profondeur des passages de machines.

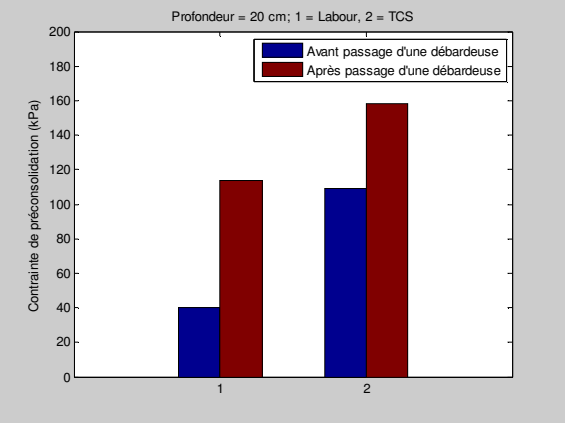

Fig. 24. Augmentation de contrainte de préconsolidation en labour (1) et TCS (2), à 20 cm de profondeur, suite au passage d'une débardeuse de betteraves, en sol limoneux.

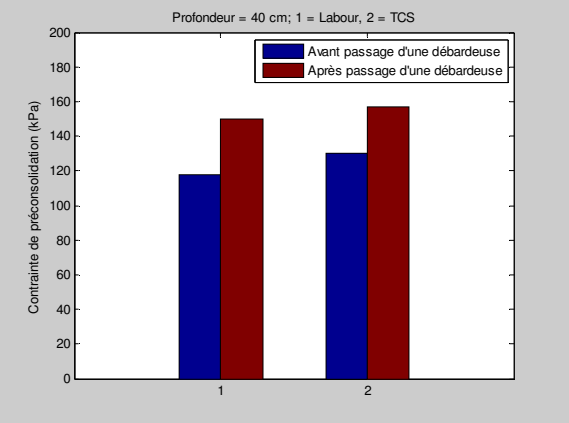

Fig. 25. Augmentation de contrainte de préconsolidation en labour (1) et TCS (2), à 40 cm de profondeur, suite au passage d'une débardeuse de betteraves, en sol limoneux.

5.3. Mesures indirectes

D'autres propriétés indirectes sont également fréquemment mesurées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés en plein champ, comme la distribution et la structure des pores, la diffusion de l'oxygène, … [42]. Outre le fait que Pc soit dépassé, on peut qualifier un sol de sévèrement com-

pacté si (1) la capacité à l'air à un pF de 1.8 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 [22, 23]. Sur le terrain, on recourt souvent à un pénétromètre pour mesurer la résistance rencontrée pour enfoncer une pointe conique dans un sol. Celle-ci est principalement fonction de la masse volumique et de l'humidité du sol. En réalisant des mesures très rapprochées, on peut obtenir une cartographie illustrant la variabilité de la résistance à la pénétration d'un sol agricole (Fig. 26) [43].

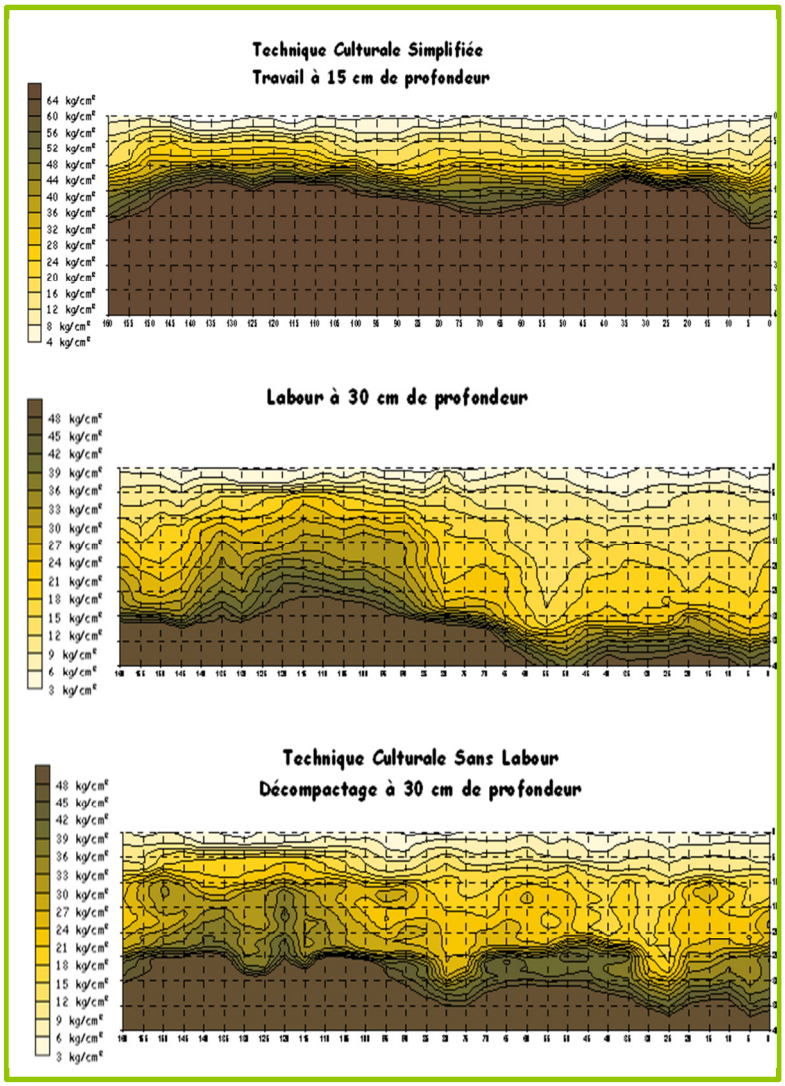

Fig. 26. Cartes pénétrométriques illustrant la résistance à la pénétration selon le travail du sol à Gembloux [41].

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, la contrainte de préconsolidation Pc ou des mesures indirectes telles que la résistance à la pénétration, la distribution de la taille des pores, la diffusion de l'oxygène, …

- Les mesures directes présentent des avantages et inconvénients. La mesure de γ_d est très précise et rapide puisque, dans de bonnes pratiques de laboratoire, γ_d peut être évaluée 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. Cependant, la mesure de Pc est longue et, par conséquent, coûteuse.

- La résistance à la pénétration est une technique de terrain rapide mais sensible à la nature du 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 (Pc) selon la méthode de Horn et Fleige [44]. Il s'agit d'évaluer Pc 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. 27. Ces variables sont accessibles à partir de bases de données comme Aardewerk [45] ou à partir de fonctions de pédotransfert. Plus de détails sur le calcul de Pc sont donnés dans [46].

Les FTP de Horn et Fleige [44] 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 différente 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 [47] sont données au Tableau 4. Il s'agit de valeurs moyennes, qui peuvent fluctuer en fonction de la texture précise.

Tableau 3. Fonctions de pédotransfert pour le calcul de Pc [44].

	Classes texturales	Fonctions de pédotransfert	r^2
1	Sable	$Pc_{1.8}$ = 438.10 X1 – 0.0008($X8_{1.8}$)³ - 3.14 X4 – 0.11 ($X3_{1.8}$)² - 465.60	0.778
		$Pc_{2.5}$ = 410.75 X1 – 0.0007($X8_{2.5}$)³ - 3.41 X4 – 0.35 ($X3_{2.5}$)² - 384.71	0.710
2	Limon sableux	$Pc_{1.8}$ = 169.30 X1 – 29.03 $X6^{0.5}$ + 6.45 X5 + 32.18 log($X7_{1.8}$) – 9.44 $X8_{1.8}$ + 27.25 sin(X4) + 119.74 log ($X3_{1.8}$) + 19.51	0.828
		$Pc_{2.5}$ = 89.50 X1 – 23.99 $X6^{0.5}$ – 2.89 X5 + 125.76 log($X7_{2.5}$) – 1.14 $X8_{2.5}$ + 26.90 sin(X4) – 51.46 log($X3_{2.5}$) – 77.25	0.874
3	Limon	$Pc_{1.8}$ = 374.15 X1 – 4.10 X6 + 3.38 $X2_{1.8}$ – 1.58 $(X5)^{-0.5}$ + 1.79 $X7_{1.8}$ + 1.09 X4 – 6.37 $(X8_{1.8})^{0.67}$ + 0.088 ($X3_{1.8}$)² - 472.77	0.765
		$Pc_{2.5}$ = 460.71 X1 – 20.33 X6 + 9.08 $X2_{2.5}$ – 2.38 $(X5)^{-0.5}$ + 2.86 $X7_{2.5}$ + 4.50 X4 – 20.96 $(X8_{2.5})^{0.67}$ + 0.304 ($X3_{2.5}$)² - 610.62	0.847
4	Argile (< 35 %) et limon argileux	Log($Pc_{1.8}$) = 0.843 X1 – 0.544 $(X5)^{0.33}$ – 0.022 X4 + 7.03 $(X7_{1.8})^{-1}$ + 0.024 $X8_{1.8}$ – 0.015 $X3_{1.8}$ + 0.725	0.808
		Log($Pc_{2.5}$) = 0.844 X1 – 0.456 $(X5)^{0.33}$ – 0.026 X4 + 12.88 $(X7_{2.5})^{-1}$ – 0.003 $X8_{2.5}$ – 0.016 $X3_{2.5}$ +1.419	0.804
5	Argile (≥35%) et limon argileux	$Pc_{1.8}$ = 4.59 X1 – 1.02 X6 – 16.43 $(X5)^{0.33}$ + 0.31 X4 – 1.57 $X3_{1.8}$ + 3.55 $X7_{1.8}$ + 1.18 $X8_{1.8}$ – 18.03	0.774
		$Pc_{2.5}$ = 70.65 X1 – 0.55 X6 – 7.01 $(X5)^{0.33}$ + 1.32 X4 – 1.08 $X3_{2.5}$ + 1.72 $X7_{2.5}$ + 1.05 $X8_{2.5}$ – 100.94	0.763

$X_1 = \gamma_d$: la masse volumique apparente sèche (g/cm³) ;
$X_2 = c_a$: 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) ;
$X_8 = \emptyset$: l'angle de frottement interne (degrés) ;
Pc : la contrainte de préconsolidation au pF de 1.8 ou 2.5 kPa (kPa).

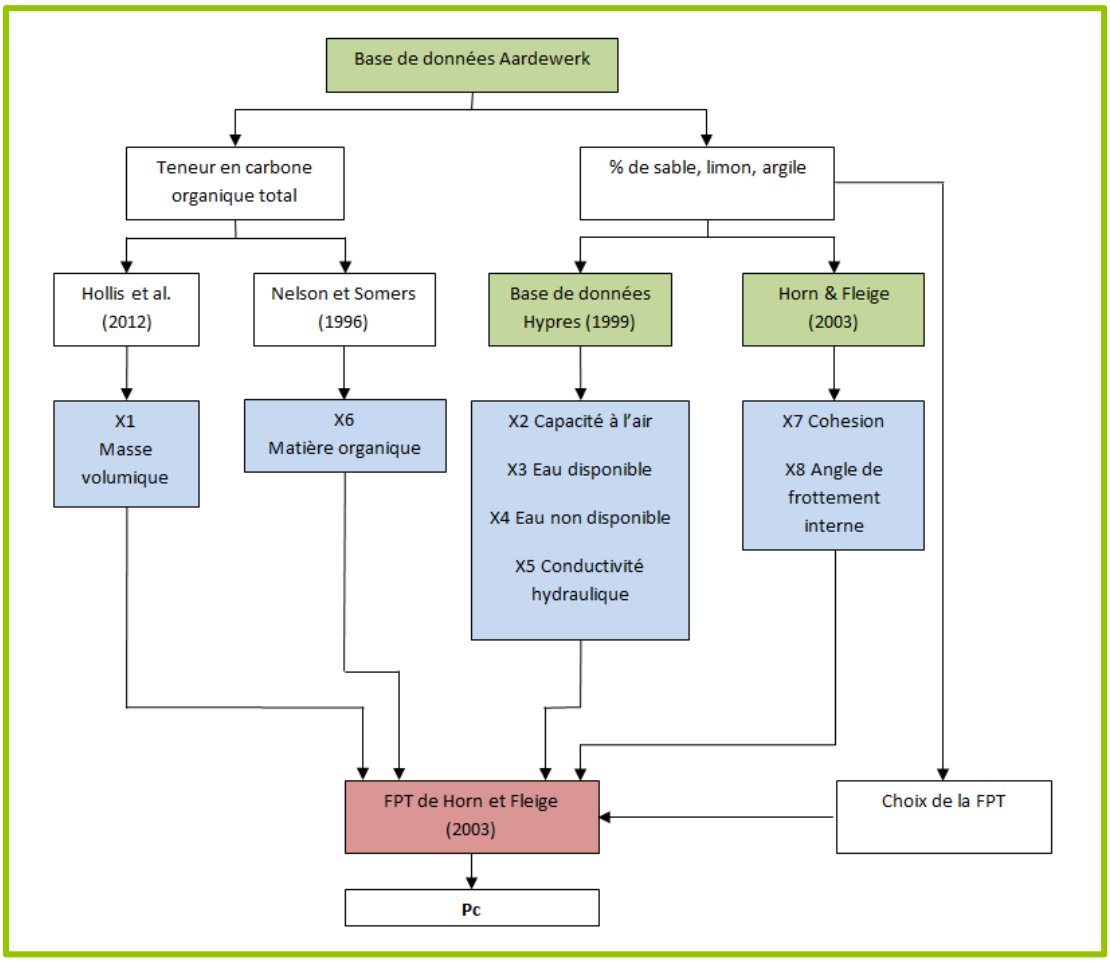

Fig. 27. Organigramme de calcul de la contrainte de préconsolidation [46].

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

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 une 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)[44].

Tableau 5 : Sensibilité du sol à la compaction en fonction de la contrainte de préconsolidation Pc [44].

Classe de sensibilité	Pc (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 calculer Pc, 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 [48]. Les principaux résultats sont indiqués ci-dessous.

6.2. Cartes de sensibilité à la compaction des sols wallons

6.2.1. Masse volumique apparente sèche

La masse volumique apparente sèche γ_d est une variable importante qui intervient dans le calcul de la contrainte de préconsolidation. Elle est ici calculée à partir des FPT de Hollis et al. [49] et est représentée sous forme cartographique à la Fig. 28. On voit qu'à une profondeur de 40 cm les valeurs de γ_d s'échelonnent de 0.83 à 1.84 Mg/m^3, avec 95 % des valeurs comprises entre 1.35 et 1.62 Mg/m^3. 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/m^3 des horizons minéraux avec des valeurs de l'ordre de 1.35 Mg/m^3.

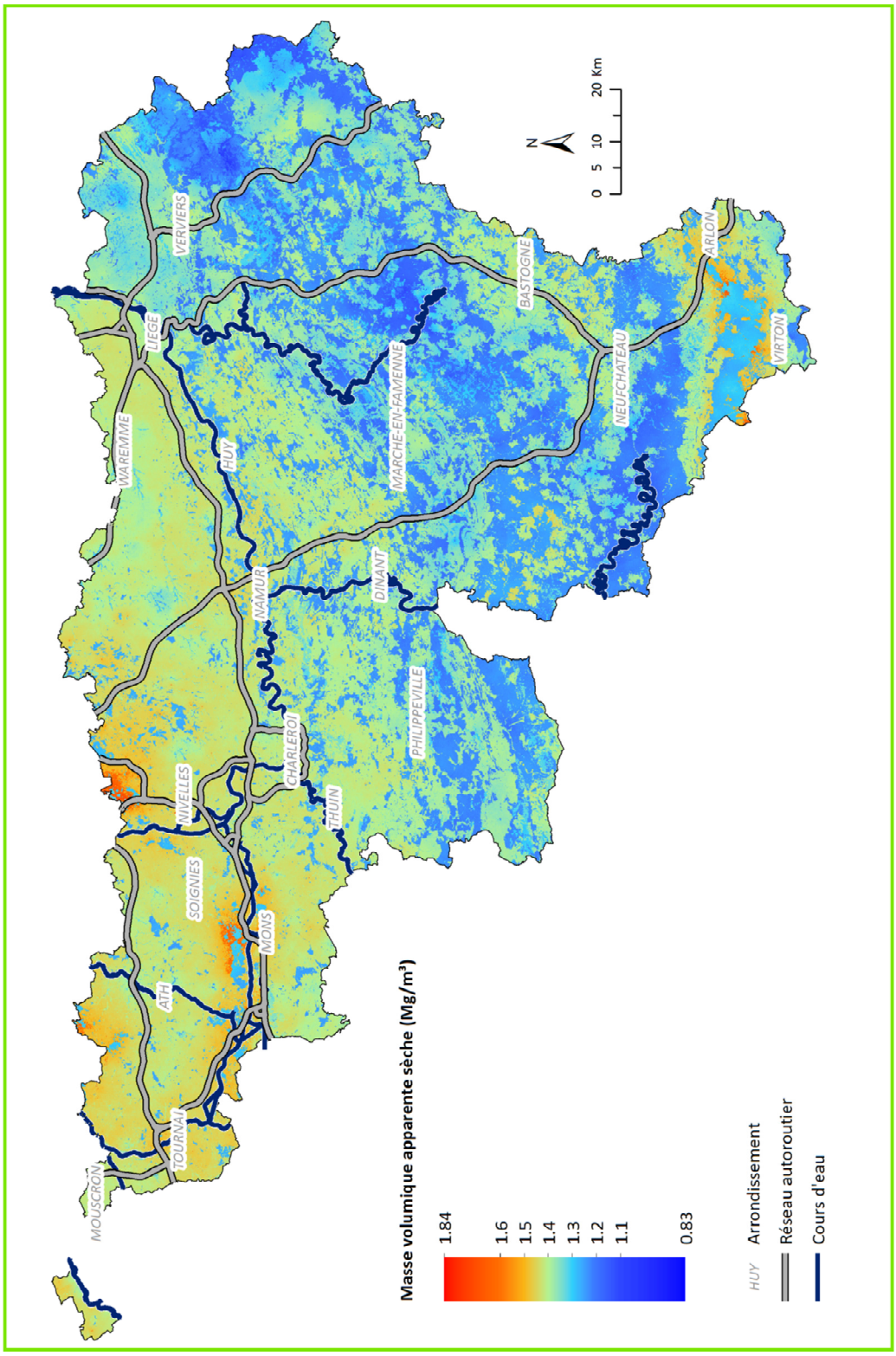

Fig. 28. Cartographie de la masse volumique apparente sèche à 40 cm de profondeur [48].

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 méthodes 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. 29a et 29b, 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. Cette sensibilité apparaît plus marquée pour la partie centrale de l'Ardenne et la région à l'Est de Verviers à pF 2.5, c'est-à-dire à la capacité au champ. Dans son ensemble, la région limoneuse située au Nord de l'axe Sambre-Meuse possède des valeurs de Pc élevée et les sols se situent dans les classes 5 et 6 à pF 2.5. Ceci est vraisemblablement lié à la masse volumique élevée de ces sols.

Les zones où l'incertitude liée au calcul de Pc 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.

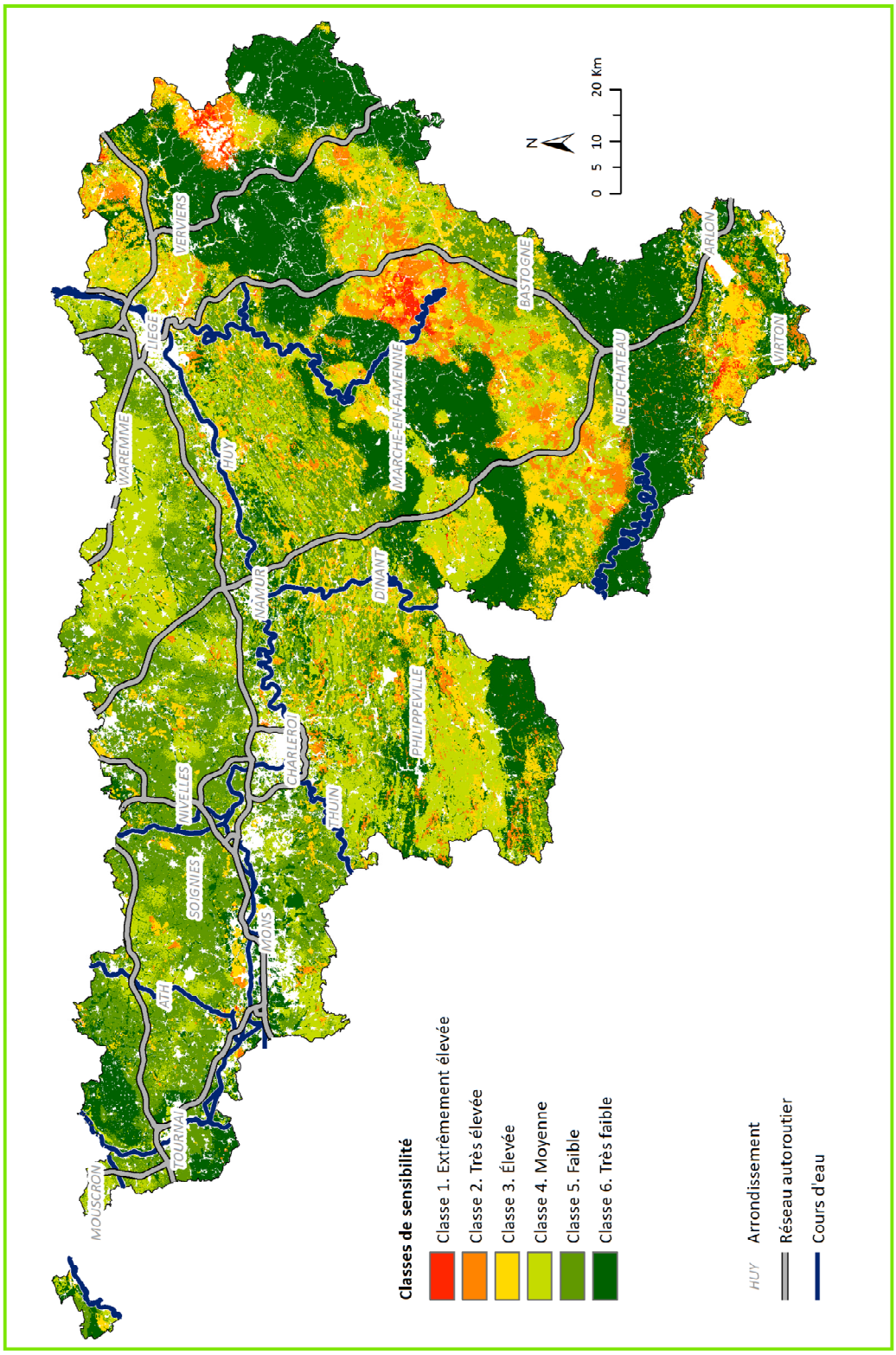

Fig. 29a. Cartographie des classes de contrainte de préconsolidation moyenne à 40 cm de profondeur à pF 1.8 [48].

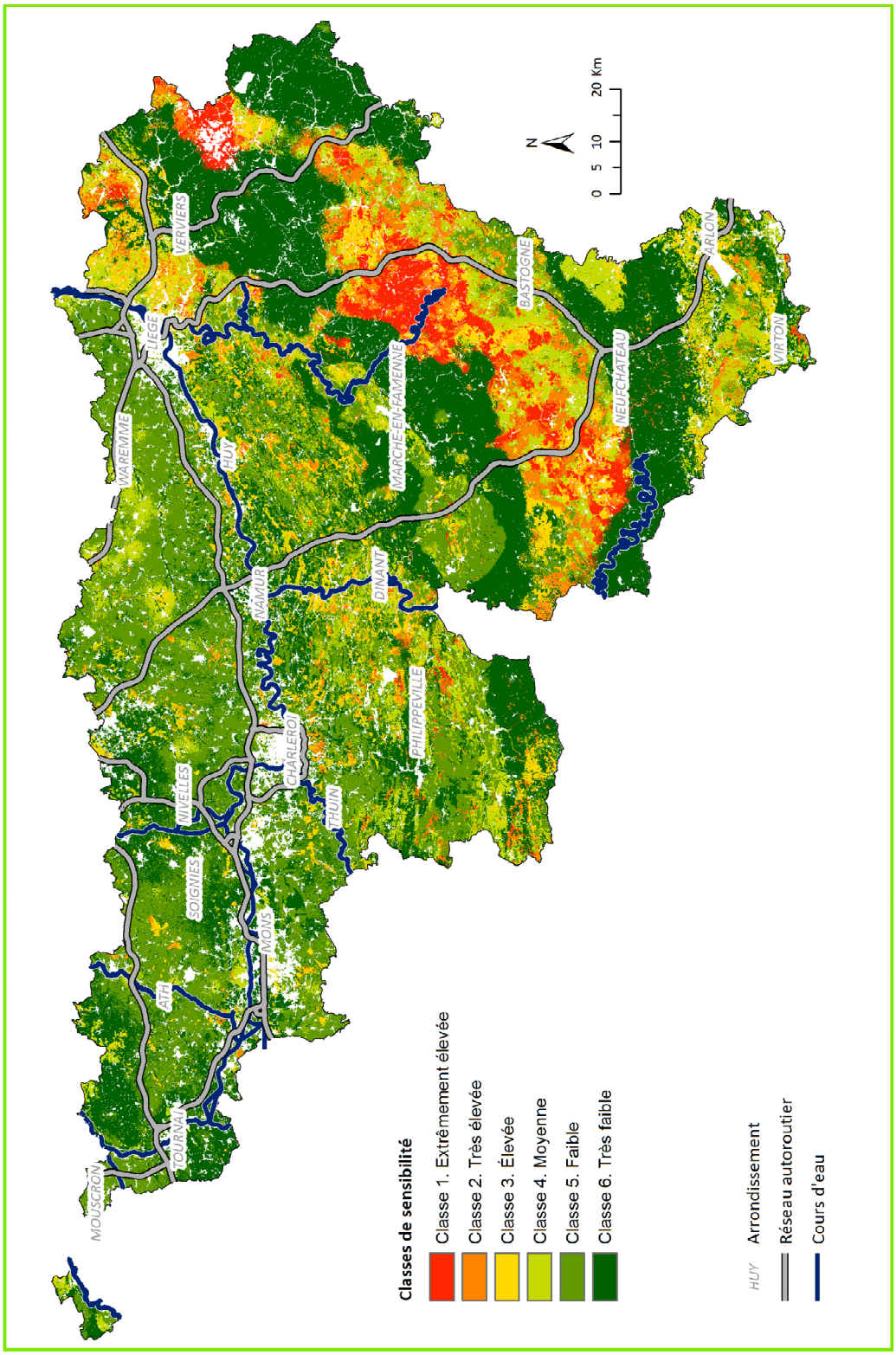

Fig. 29b. Cartographie des classes de contrainte de préconsolidation moyenne à 40 cm de profondeur à pF 2.5 [48].

.

7. Les risques de compaction

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 agricoles et d'autre part les teneurs en eau très différentes dans lesquelles ont lieu les opérations culturales, 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 Pc. Si σ dépasse Pc, 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 [46]. 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) [50]. 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 [51]. Dans cette étude, la valeur de ν = 5 proposée dans [50] est utilisée.

Les simulations sont réalisées avec deux types de scénarios :

- scénario 1 : un pneu de tracteur couramment utilisé, à savoir un pneu 650/R38 avec une charge de 4440 kg à 1 bar ;
- scénario 2 : un pneu équipant des machines de récolte, à savoir un pneu 800/R38 avec une charge de 6300 kg à 1.2 bar.

Les résultats sont donnés aux Fig. 30 et 31. 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.

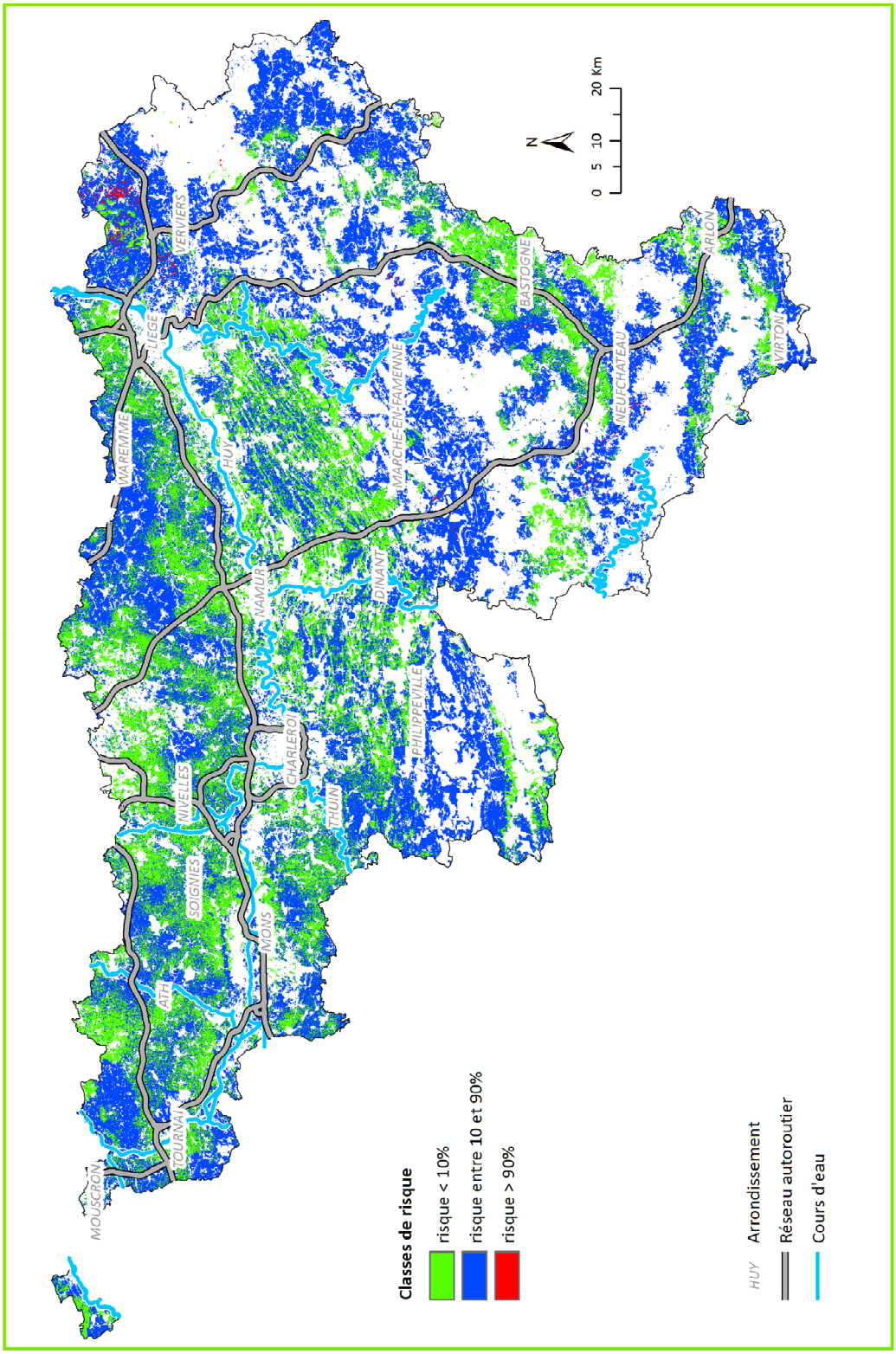

Fig. 30a. Carte des niveaux de risque à 40 cm de profondeur pour pF 1.8 pour le scénario 1 (pneu 650/R38 avec une charge de 4440 kg à 1 bar) [48].

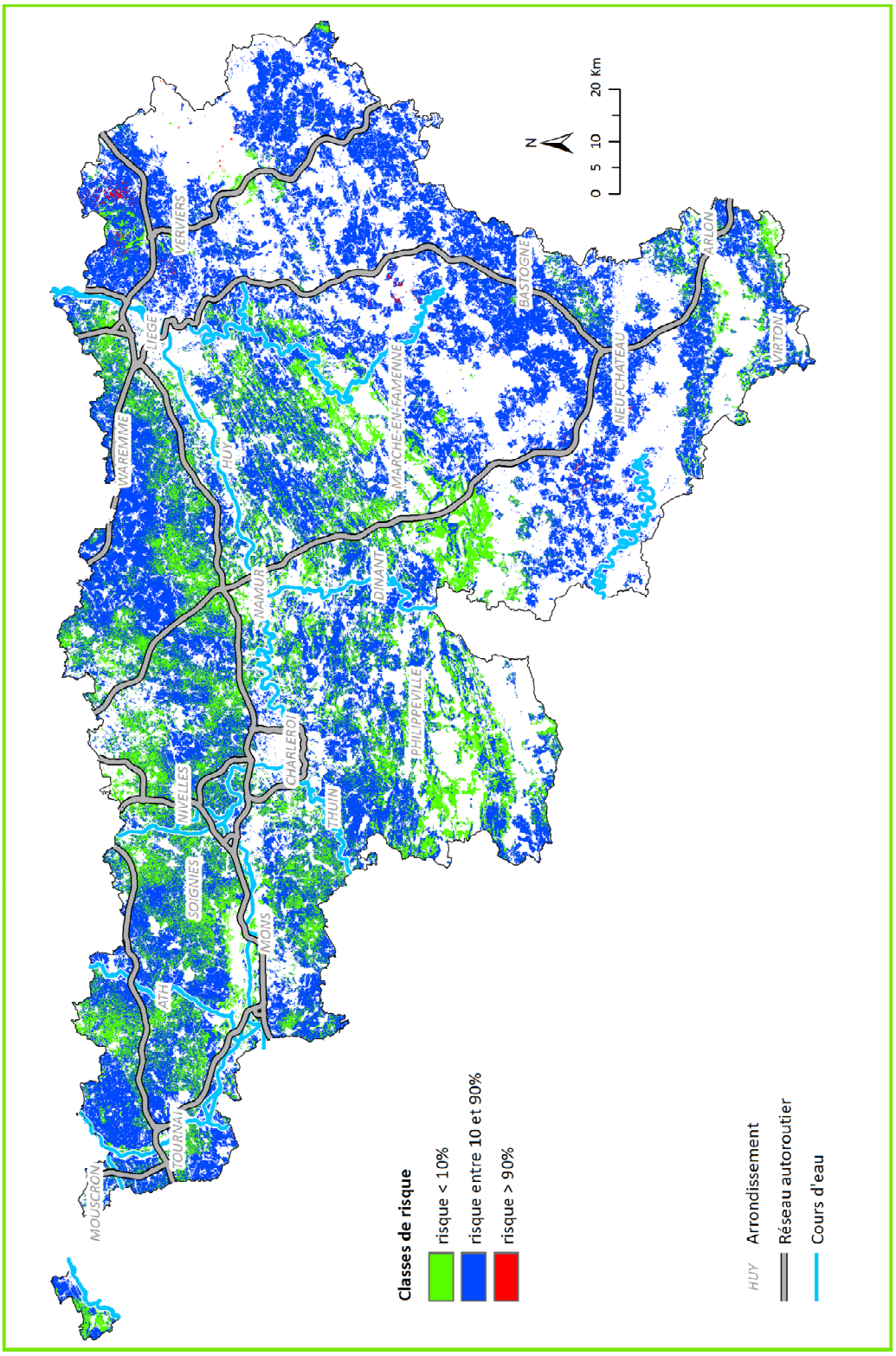

Fig. 30b. Carte des niveaux de risque à 40 cm de profondeur pour pF 2.5 pour le scénario 1 (pneu 650/R38 avec une charge de 4440 kg à 1 bar) [48].

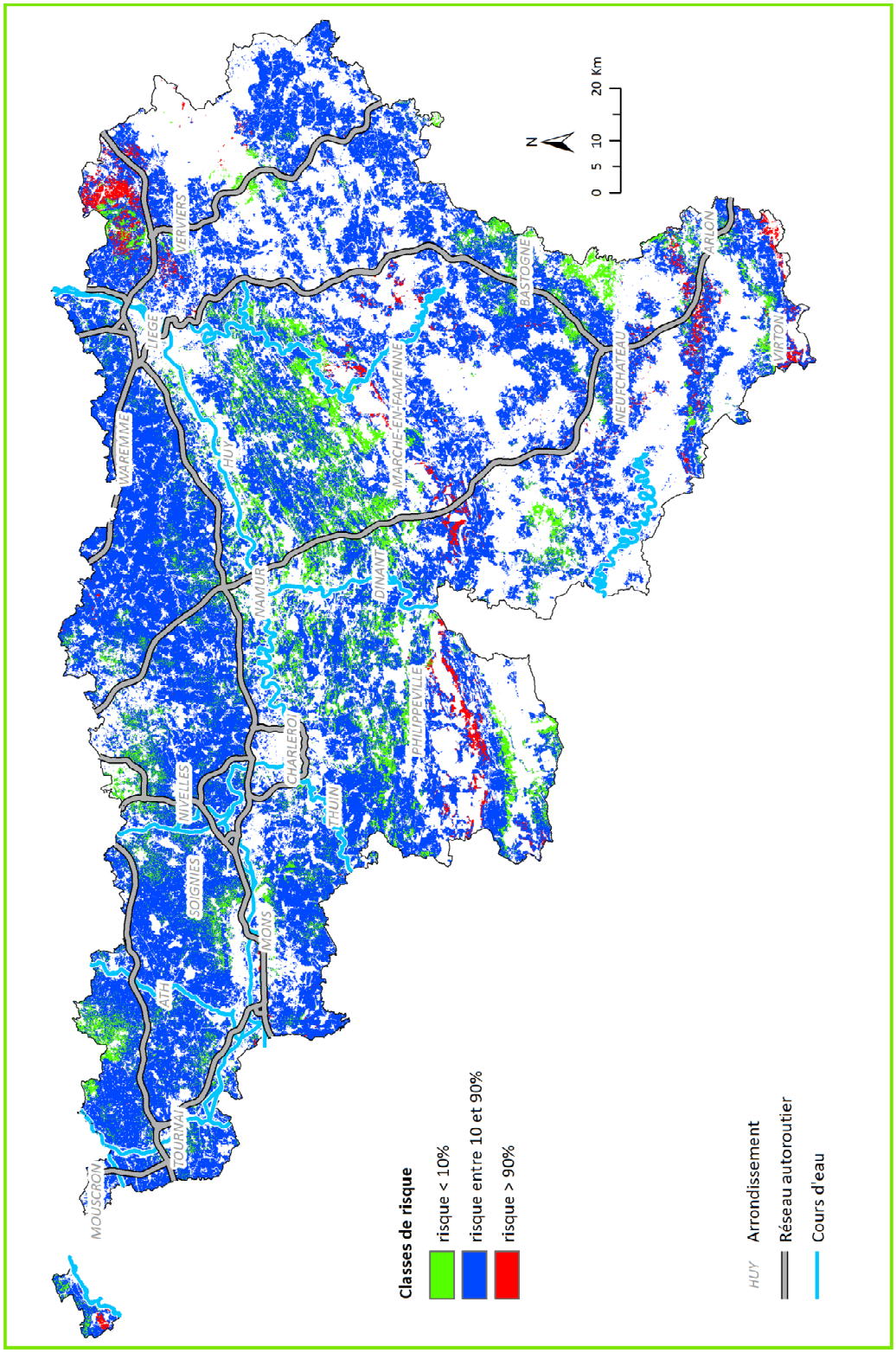

Fig. 31a. Carte des niveaux de risque à 40 cm de profondeur pour pF 1.8 pour le scénario 2 (pneu 800/R38 avec une charge de 6300 kg à 1.2 bar) [48].

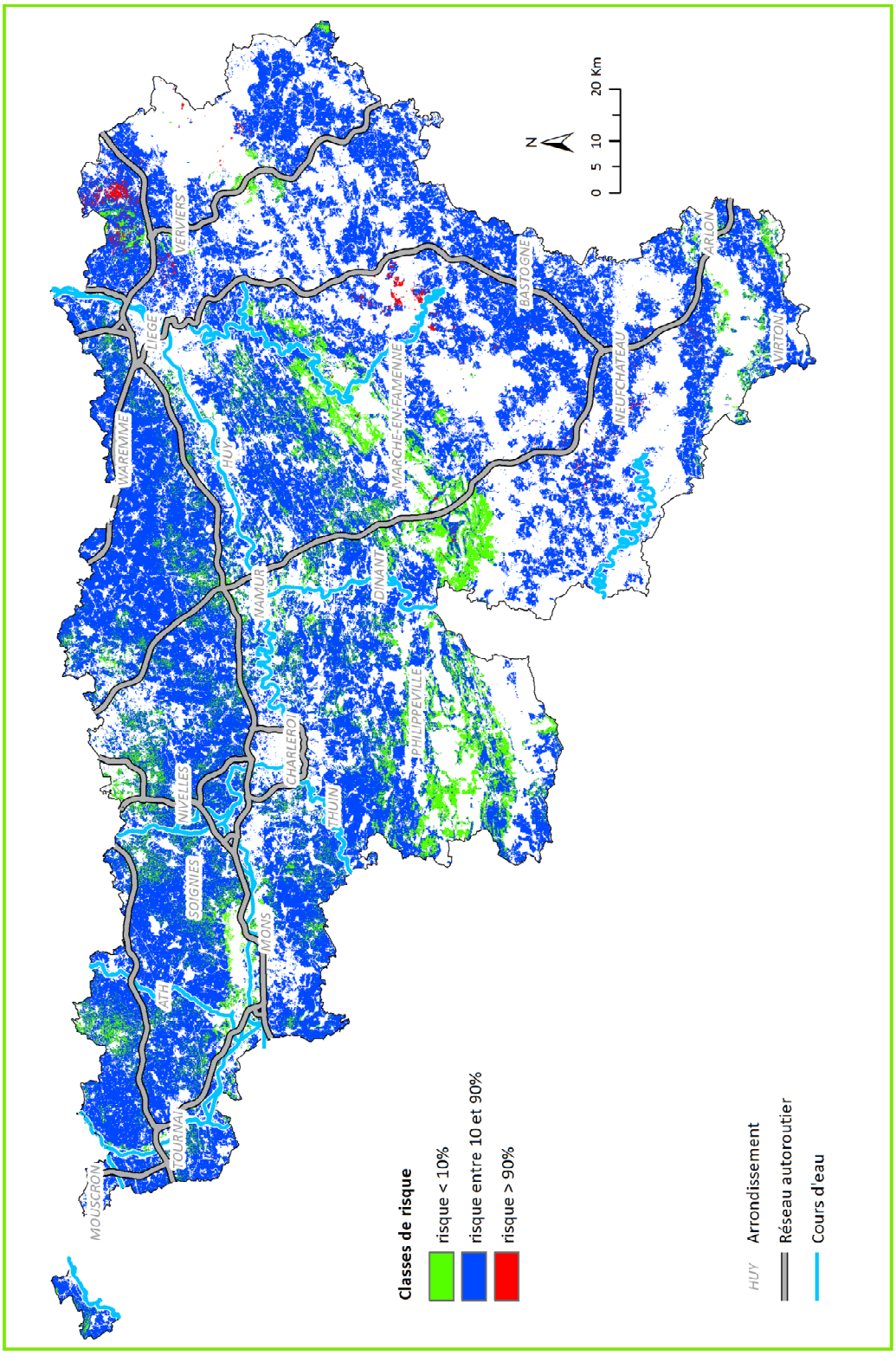

Fig. 31b. Carte des niveaux de risque à 40 cm de profondeur pour pF 2.5 pour le scénario 2 (pneu 800/R38 avec une charge de 6300 kg à 1.2 bar) [48].

8. La gestion de la compaction des sols en milieu agricole

Il est préférable d'éviter la compaction du sol plutôt que d'essayer de porter remède à une structure déjà compactée. La conservation des sols et, en particulier, la prévention de la compaction, repose sur quatre piliers (Fig. 32) [52]: les possibilités techniques, la limitation des charges, l'adaptation des méthodes de travail et la maîtrise de l'état physique des sols.

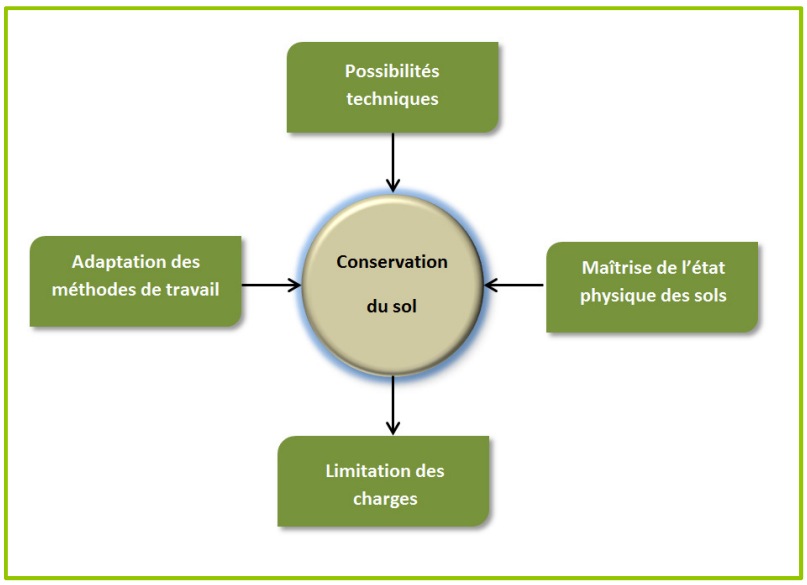

Fig. 32. Les quatre éléments de la conservation des sols [Adapté de 52].

8.1. Possibilités techniques

8.1.1. Le véhicule

Le poids des véhicules est un élément déterminant sur la compaction du sol. 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. Par contre, la charge dynamique tient compte des reports de charge. Compte tenu des conditions de travail, elle est plus difficile à évaluer de façon précise.

L'augmentation de puissance des tracteurs agricoles s'accompagne d'une hausse de leur masse[1], ce qui est un élément défavorable au point de vue de la compaction. Cependant, si l'adhérence n'est pas un facteur limitant, grâce à l'augmentation de puissance, il est possible d'utiliser des outils plus larges, avec pour conséquence une réduction du nombre de passages dans une parcelle donnée.

8.1.2. La pression de contact pneu-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.

[1] L'adhérence sur les roues motrices est fonction du poids qu'elles supportent.

Pour réduire la pression de contact, diverses configurations conduisant à l'augmentation de la surface de contact peuvent être utilisées : roues jumelées, pneus de grande taille, pneus basse pression, chenilles souples, … , chaque solution ayant toutefois un surcoût par rapport aux pneus traditionnels.

Des systèmes de télégonflage permettent d'adapter la pression des pneus depuis la cabine afin d'assurer une utilisation optimale sur route (pression de gonflage élevée pour réduire la résistance au roulement et la consommation d'énergie) et sur sol agricole (faible pression).

La désignation d'un pneumatique
Exemple : Pneu 16.9R24 IC/IV=134A8 et 131B
Il s'agit d'un pneu de largeur égale à 16.9 pouces (soit 43 cm), de carcasse radiale, monté sur une jante de diamètre égal à 24 pouces (soit 61 cm). D'après son indice de charge IC et son indice de vitesse IV, il peut supporter 2120 kg à 40 km/h et 1950 kg à 50 km/h.

L'indice de charge IC est un code international qui correspond à la charge maximale que peut supporter un pneu, indépendamment de son type ou de sa taille. *L'indice de vitesse* IV est la vitesse maximum à laquelle le pneu peut porter la charge correspondant à l'indice de charge.

8.2. Limitation des charges

La charge appliquée sur la roue 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 glissement qui résulte de forces de traction élevées est également fonction du type de sol et de son état.

Pour réduire la charge, dans la récolte de betteraves par exemple, le volume de la trémie des débardeuses doit être réduit mais il y a lieu d'optimiser l'organisation générale du chantier de récolte, compte tenu des dimensions du champ pour éviter un nombre de manœuvres excessif. Sur les sites sensibles, la limitation de la charge doit être accompagnée de l'utilisation d'équipements techniques adaptés (des pneus larges, des roues jumelées, voire des chenilles souples).

8.3. Adaptation des méthodes de travail

8.3.1. Planification des interventions

On sait que circuler sur un sol dont la teneur en eau est proche de l'optimum Proctor ou supérieure à la limite de plasticité est défavorable (voir 3.1.2). Dans la mesure du possible, il faut planifier les interventions agricoles en tenant compte de la teneur en eau du sol. Limiter le trafic uniquement quand la teneur en eau du sol est inférieure à 60% de la capacité au champ permettrait de réduire les risques de compaction du sol [55].

Cependant, la mise en œuvre d'une telle mesure est compliquée par le fait que, dans un champ donné, la teneur en eau du sol varie en fonction de la profondeur, de la texture, de la pente… Par ailleurs, en pratique, il faut tenir compte de ce que les agriculteurs doivent effectuer leur travail dans des laps de temps déterminés et n'ont pas toujours la possibilité d'attendre que l'état du sol soit satisfaisant. Ainsi, la récolte des betteraves se produit souvent dans une période où le sol est très humide.

8.3.2. Labour hors raie

Le labour conventionnel avec une roue dans la raie est à l'origine de la semelle de labour (voir 3.3.2). Certains constructeurs proposent aujourd'hui des charrues adaptables, capables de fonctionner à la fois de façon conventionnelle (*labour dans la raie*) ou avec le tracteur sur le sol ferme (*labour hors raie*) (Fig. 33). Cette dernière disposition réduit la compaction du sol dans la raie de labour mais un manque d'adhérence peut survenir quand la couche arable est très humide ou peu portante. Si le labour hors raie n'est pas réalisable, il est conseillé d'utiliser les pneus les plus larges possibles compte tenu du fait que le sol retourné ne doit pas être écrasé.

Fig. 33. Labour hors raie (Kverneland).

8.3.3. Opérations combinées

La préparation du sol et le semis peuvent être effectués en une seule opération, à l'aide d'outils combinés. Ces outils peuvent être utilisés sur des tracteurs équipés de pneus larges. Toutefois, les tracteurs doivent disposer d'une puissance de levage suffisante pour pouvoir relever les outils.

8.3.4. Controlled Traffic Farming et striptill

Dans la circulation contrôlée ('Controlled Traffic Farming' ou 'CTF') et le travail du sol en bandes ('Striptill'), les passages de machines s'effectuent aux mêmes endroits, de manière à limiter la compaction à des bandes de sol déterminées. Ces méthodes impliquent de disposer de systèmes de positionnement précis de type RTK (Real Time Kinematics) lorsque les passages s'effectuent sur les mêmes traces au cours des années successives.

A titre d'exemple, citons un dispositif CTF qui fait l'objet d'essais en Grande-Bretagne (Fig. 34). Dans le système 'Twin Trac', les moissonneuses-batteuses circulent sur une trace décalée d'une demi-largeur par rapport à la voie plus étroite des tracteurs ; l'emprise atteint environ 25 % de la surface totale. Avec la variante 'Out Trac', les véhicules circulent les uns derrière les autres en empruntant les mêmes traces. Les voies de passage représentent environ 40 % de la surface pour une largeur de travail de 6 m et 30 % pour une largeur de 8 m [53].

Les expériences menées jusqu'à présent en Grande-Bretagne et en Allemagne semblent satisfaisantes mais on n'a pas encore trouvé de solution pour la récolte des pommes de terre et de betteraves.

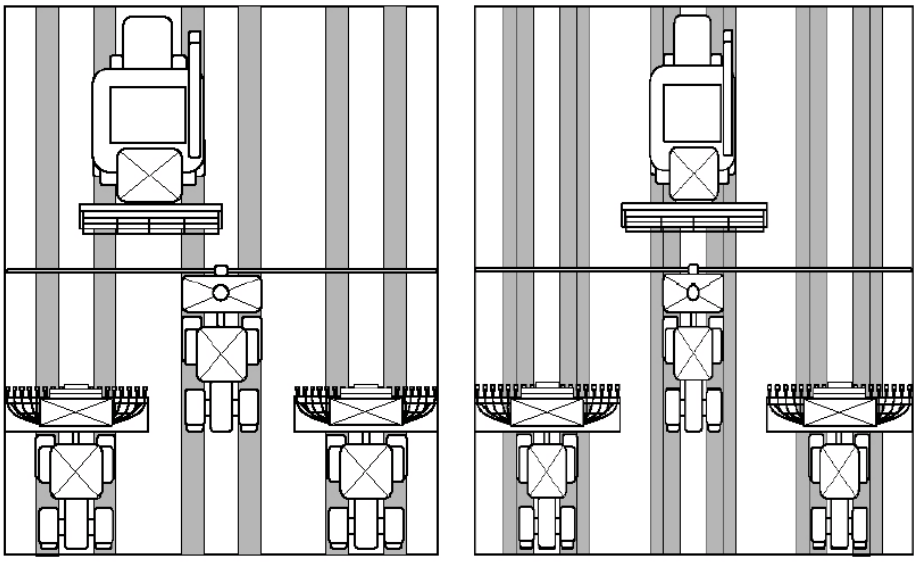

Fig. 34. Controlled Traffic Farming: Twin Trac (à gauche) et Out Trac (à droite) [53].

8.4. Maîtrise de l'état physique des sols

8.4.1. Les techniques de travail du sol

Le labour implique le retournement d'une profondeur de sol, généralement comprise entre 20 et 30 cm. Sa suppression présente de l'intérêt, principalement en termes de réduction de temps de travail.

Les sols cultivés par des techniques simplifiées (TCS) ont une meilleure capacité portante que les sols labourés. Cependant, dans les sols cultivés en TCS, on observe assez souvent une augmentation de la masse volumique de l'horizon superficiel suite au passage des machines (voir 4.1) et il semble que la régénération naturelle de la porosité soit plus lente dans les sols travaillés en TCS que dans des sols soumis à une exploitation traditionnelle [54]. Des essais réalisés à Gembloux ont montré que le passage des engins agricoles s'avère parfois plus dommageable en non labour qu'en travail du sol conventionnel pour les cultures telles que la betterave sucrière (C. Roisin, communication orale).

A l'heure actuelle, il n'existe pas encore de bilan comparatif complet de ces deux modes de travail du sol, à la fois au niveau environnemental et au niveau de la fertilité des sols.

Fig. 35. Effet du travail du sol sur l'infiltration de l'eau.

8.4.2. Mise en place de cultures intermédiaires

Des cultures intermédiaires (ou de couverture) à masse racinaire importante, comme la luzerne, le colza ou la moutarde, peuvent s'avérer très efficaces pour améliorer la structure du sol. En effet, grâce à une densité importante de racines dans les 10 -15 premiers centimètres, la dégradation de la structure du sol est limitée et la stabilité structurale est améliorée. De plus, grâce à un réseau racinaire profond, les plantes ont accès à l'eau des horizons profonds et jouent un rôle de « labour biologique du subsoil ». Enfin, par l'assèchement qu'elles procurent, les cultures intermédiaires permettent d'effectuer les travaux ultérieurs en conditions plus favorables [56].

La compaction : pour l'éviter

- Utiliser les **possibilités techniques** existantes, comme le télégonflage qui permet d'adapter la pression des pneumatiques aux valeurs recommandées par le manufacturier, sur route et sur champ.
- **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.
- **Maîtriser l'état physique des sols**, par exemple en utilisant des plantes de couverture.
- **Adapter les méthodes de travail**, notamment en planifiant au mieux les opérations culturales pour limiter les passages à une teneur en eau correspondant à un état plastique du sol.

9. Glossaire

Anoxique (milieu) : milieu dépourvu d'oxygène.

Battance : phénomène correspondant à la désagrégation de la partie superficielle du sol sous l'action de pluies. Les éléments les plus fins comblent les vides, ce qui entraîne la formation d'une croûte.

Capacité au champ (**= capacité de rétention maximale en eau du sol)**. Il s'agit d'un état d'équilibre pendant lequel la microporosité est remplie d'eau alors que la macroporosité est occupée par l'air. Elle dépend de la texture du sol.

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

Conductivité hydraulique à saturation K_s : valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène.

Contrainte de préconsolidation Pc : 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 Sr : 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 unidirectionnel : 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 (Pc).

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 : C'est un 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 :

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

pF : 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. Agregagation 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 pp.
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, pratices and policies. Report on the project 'Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo)'.
4. Soltner , D. 2003. Les bases de la production végétale. Tome I. Le sol et son amélioration. Collection Sciences et Techniques agricoles.
5. Dexter, A. 1998. Advances in characterization of soil structure. Soil and Tillage Research 11: 199-238.
6. Horn, R., Taubner, H., Wuttke, M., Baumgartl, T. 1994. Soil Physical-Properties Related to Soil-Structure. Soil and Tillage Research 30: 187-216.
7. Peigne, J., Vian, J.-F., Cannavacciuolo, M., Lefevre, V., Gautronneau, Y., Boizard, H. 2013. Assessment of soil structure in the transition layer between topsoil and subsoil using the profil cultural method. Soil and Tillage Research 127, 13–25
8. 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.
9. 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.
10. Poodt, M., Koolen, A., van der Linden, J.P., 2003. FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil preconsolidation stress and cohesion. Soil and Tillage Research 73: 67–76.
11. Smith, D.L.O., 1985. Compaction by wheels: a numerical model for agricultural soils. J. Soil Sci. 36: 621–632.
12. Burt, E.C., Wood, R.K., Bailey, A.C., 1992. Some comparison of average to peak soil–tire contact pressures. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 35, 401–404.
13. 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.
14. Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Durr, C., Boiffin, J. 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. Soil and Tillage Research 64: 149-164.
15. Alakukku, L. 1999. Subsoil compaction due to wheel traffic. Review. Agricultural and Food Science 8: 333-351.
16. Servadio, P., A. Marsili, M. Pagliali, S. Pellegrini and N. Vignozzi 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.
17. Mansouri, M., Dumont, B., Leemans, V., Destain, M.-F. 2013. Bayesian methods for predicting LAI and soil water content. Precision Agriculture, DOI 10.1007/s11119-013-9332-7.
18. Van der Veer, S., Meyer, M., Chervet, A., Sturny, W.G., Weisskopf, P. 2006. Atteintes physiques à la structure du sol lors de la récolte de betteraves sucrières. Revue Suisse d'Agriculture 38: 129-134.
19. Hamza, M. A., Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems - A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research 82: 121-145.
20. McKyes, E.S., Bousquet, R. 1980. Damage to agricultural fields by construction traffic. Transactions of the ASAE 23(6): 1388-1391.

21. Lebert, M., Böken, H., Glante, F. 2007. Soil compaction—indicators for the assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal Soil Protection Act. Journal of Environmental Management 82(3): 388-397.
22. Schäffer, B, Stauber M., Mueller T.L., Müller, R., Schulin, 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.
23. Schäffer, B, Mueller T.L., Stauber M., , Müller, R., Keller,M., Schulin, R. 2008b. Soil and macro-pores under uniaxial compression. II. Morphometric analysis of macropore stability in undisturbed and repacked soil. Geoderma 146: 175-182.
24. Zhang, S., Grip, H., Lövdahl, L. 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. Soil and Tillage Research 90(1-2): 117-125.
25. Hoefer, G. 2010. Subsoil compaction: causes, impact, detection, and prevention. Soil Engineering - Soil Biology 20: 121-145.
26. Kulli, B., Flühler, H. 2003. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. Soil and Tillage Research 70: 29-40.
27. Coquet, Y., Cardoux, S., Bouchard P., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H. 2005. Water and Solute Transport in a Cultivated Silt Loam Soil. Vadose Zone Journal 4(3): 587-591.
28. 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.
29. Sadegh-Zadeh, F.S., A.W., Seh-Bardan, B.J. 2008. Movement of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in undisturbed soil columns as affected by soil compaction. Journal of Soil Science 3(3): 157-163.
30. Stalham, M., Herry, E. 2005. Effects of soil compaction on potato growth and its removal by cultivation, B.P. Council, Editor. Oxford, UK.
31. Simojoki, A., Alakukku, L., 1991. Effect of compaction on soil air in a pot experiment and in the field. Soil and Tillage Research 19: 175-186.
32. Batey, T., McKenzie, M. 2006. Soil compaction: identification directly in the field. Soil Use and Management 22(2): 123-131.
33. Soane, B. D., Vanouwerkerk, C. 1995. Implications of Soil Compaction in Crop Production for the Quality of the Environment. Soil and Tillage Research 35: 5-22.
34. Jones, R., Spoor, G., Thomasson, A.J. 2003. Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. Soil and Tillage Research 73: 131-143.
35. Langmaack, M., Rapp-Bernhardt, U., Kotzke, K. 1999. Quantitative analysis of eartworm burrow systems with respect to biological soil-structure regeneration after soil compaction. Biology and fertility of soils 28: 219-229.
36. Lipiec, J., Arvidsson, J., Murer, E. 2003. Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. Soil and Tillage Research 73(1): 15-29.
37. Hakansson, I., Reeder R.C. 1994. Subsoil Compaction by Vehicles with High Axle Load Extent, Persistence and Crop Response. Soil and Tillage Research 29: 277-304.
38. Bengough, A.G. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. Journal of Experimental Botany 62(1): 59-68.
39. Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., Siczek A. 2012. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. Soil and Tillage Research 121: 74-81.
40. Bakken, L., Njo, S. 1987. Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (Triticum aestivum L.). Journal of Soil Science 38: 541-552.
41. Louvet J.-N., Roisin C., Destain M.-F. 2013. Rapport de la convention 'Evaluation des risques de compaction de la couche arable à l'échelle du champ'. ULg et CRA-W.

42. Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., Pellegrini, S. 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. Soil and Tillage Research 73: 119-129.
43. Roisin, C. 2007. A multifractal approach for assessing the structural state of tilled soils. Soil Science Society of America Journal 71: 15-25.
44. 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.
45. 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.
46. 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 (DGARNE), ULg, 110 p.
47. 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.
48. Ephesia 2013. Rapport final de la Convention 'Evaluation des risques de compaction des sols en Région Wallonne, Appui à la cartographie de la contrainte de préconsolidation' financée par le SPW (DGARNE), 103 p.
49. 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.
50. Keller, T., Defossez, 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.
51. 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).
52. Sommer, C. 1998: Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz 1: 12-16.
53. Holpp, M., Chamen, T., Demmel, M., Pedersen, H. 2013. 4 fois CTF en Europe. Technique Agricole 4: 40-41.
54. Boizard, H., Yoon, S. W., Leonard, J., Lheureux, S., Cousin, I., Roger-Estrade, J., Richard, G. 2013. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. Soil and Tillage Research 127: 34-44.
55. Raper, R.L. 2005. Agricultural traffic impacts on soil. Journal of Terramechanics 42(3-4): 259-280.
56. Chen, G., Weil, R.R. 2011. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. Soil and Tillage Research 117: 17-27.