



HAL
open science

Le tassement et la portance des sols en rotations cerealieres intensives.

C. Cheverry, Jérôme Guerif

► **To cite this version:**

C. Cheverry, Jérôme Guerif. Le tassement et la portance des sols en rotations cerealieres intensives.. Les rotations cerealieres intensives. Dix annees d'etudes concertees INRA-ONIC-ITCF : 1973-1983, INRA, 1986. hal-02855781

HAL Id: hal-02855781

<https://hal.inrae.fr/hal-02855781>

Submitted on 8 Jun 2020

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

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

Les rotations céréalières intensives. Dix années d'études concertées INRA - ONIC - ITCF, 1973-1983.
INRA, Paris, 1986.

Le tassement et la portance des sols en rotations céréalières intensives

C. CHEVERRY*, J. GUERIF**

* INRA, Laboratoire de Recherches de la Chaire de Science du Sol,
ENSA, 65 rue de St. Brieuç, 35042 Rennes Cedex

** INRA, CR d'Avignon, Station de Science du Sol, Domaine St. Paul,
BP 9, 84140 Montfavet

R E S U M E

L'évaluation et l'analyse du comportement des sols au compactage sont envisagées à deux niveaux.

Dans un premier temps, les différents types de tests de laboratoire sont succinctement présentés et les résultats qu'ils permettent d'obtenir sont exposés et discutés. Les essais de compactage dynamique ont conduit à une nouvelle conception des limites de consistance et à l'établissement de relations statistiques entre ces teneurs en eau caractéristiques et quelques facteurs de constitution qui les déterminent.

L'analyse du phénomène de tassement à l'aide de méthodes complémentaires et d'essais oedométriques fait apparaître une diminution très prépondérante de l'espace poral structural, les possibilités de déformation de la distribution dimensionnelle de l'espace poral textural et les conséquences du tassement sur certaines relations sol-eau.

Les aspects cinétiques des déformations, très importants en mécanique des sols appliquée à l'agriculture, sont mis en évidence.

Le passage au terrain à l'aide d'un appareil de compactage in situ, ou grâce à l'analyse de roulages réels, implique la prise en compte des phénomènes de flusage latéral et surtout de l'anisotropie structurale et hydrique quasiment générale; la réduction du profil à un nombre limité de couches et la recherche des interactions entre couches au cours du compactage, devraient fournir les bases d'une prévision approchée du comportement du sol en place.

La simplification des systèmes de culture et la multiplication d'interventions lourdes généralement liées à l'intensification en cultures céréalières ont l'une et l'autre pour conséquence d'accroître l'importance du comportement des sols au compactage qu'il s'agisse de maîtriser les risques de tassement ou de prendre en compte les limites de portance des terrains cultivés.

Ces difficultés sont inégalement ressenties par les agriculteurs selon les conditions pédo-climatiques et culturelles; mais aussi, parce que les limitations de portance liées aux conséquences agronomiques des tassements en conditions défavorables sont mal perçues.

Notre objectif est ici de présenter brièvement les principaux acquis des 10 dernières années dans les domaines du diagnostic et du pronostic des tassements. Ce faisant, nous ne prendrons qu'indirectement en compte les problèmes de portance et leurs solutions basées sur l'évolution de critères de ce phénomène.

Nous examinerons successivement la manière dont le problème se pose et la démarche retenue, les informations tirées des tests de laboratoire et, enfin les moyens de passage au terrain.

I. POSITION DU PROBLEME ET DEMARCHE GENERALE

Il convient de rappeler que certaines techniques de travail du sol ont pour objectif direct de tasser le sol : roulage des semis pour améliorer le contact terre-graine, correction des terres creuses. Mais ces techniques, ainsi que de nombreuses autres, à objectifs divers, peuvent conduire à un compactage excessif et involontaire, avec les conséquences

défavorables souvent décrites sur le comportement de la végétation et sur le rendement de la culture en raison notamment d'une limitation de l'extension du système racinaire et d'une baisse de conductivité hydraulique pour l'eau saturante, susceptible d'entraîner une mauvaise aération du profil.

Il est donc indispensable d'avoir une connaissance suffisante du comportement au compactage des terres agricoles pour définir et contrôler les techniques de tassement et limiter les déformations dangereuses consécutives à la mise en oeuvre d'itinéraires techniques mal adaptés.

La prévision et la maîtrise des variations de compacité d'une couche de surface d'un sol cultivé passe par la connaissance de son état physique initial et de la pression appliquée au sol par un engin, DURAND (1982). Or, il est bien difficile d'analyser l'action d'un pneumatique lors d'un roulage, compte-tenu du grand nombre de variables à contrôler. Ainsi, pour les véhicules agricoles, SOANE (1982) distingue les caractéristiques propres :

- à l'engin : principalement son poids;
- au type de pneu : sa largeur, la rigidité plus ou moins grande de la carcasse, la pression de gonflage;
- à la cohésion et à l'humidité de la couche de surface, qui déterminent de plus, pour un engin donné, les effets du patinage, généralement négligés lors de l'étude du tassement.

Dans les sols eux-mêmes, la variabilité aussi bien temporelle que spatiale des états physiques des couches de surface des sols cultivés rend très difficile l'analyse des comportements au champ.

Aussi a-t-on intérêt à aborder ce problème par une démarche à deux niveaux (DURAND, 1982).

Le premier niveau consiste en l'utilisation de tests de laboratoire pour dégager des lois physiques et/ou statistiques permettant d'extrapoler les effets des principales variables explicatives des comportements mécaniques : constitution, teneur en eau, pressions appliquées. On cherche ainsi à mettre en évidence des caractéristiques permanentes intrinsèques des matériaux.

Le deuxième niveau est une expérimentation en vraie grandeur, au champ, pour évaluer la valeur prévisionnelle des modèles établis grâce aux tests de laboratoire.

II. INFORMATIONS TIREES DES TESTS DE LABORATOIRE

2.1. Les tests avec application dynamique de l'effort

2.11. Rappels sommaires du principe du test Proctor

Le test Proctor consiste à remplir de matériau, en trois couches successives, un moule de volume connu, par compactage avec une dame de masse donnée tombant d'une hauteur donnée, un nombre de fois donné.

Compte-tenu de la teneur en eau des échantillons compactés et des masses de matériau que l'on a pu introduire dans le moule, on obtient une série de couples (ρ_d, W) . Le tracé de la courbe complète est obtenu en répétant l'opération sur des échantillons à teneur en eau croissante.

2.12. Influence de la constitution des sols sur leur comportement au compactage

L'allure de ces courbes, telle celle présentée à la figure 1 permet le plus souvent de distinguer trois plages de teneur en eau W bornées par deux valeurs particulières W_p et W_m correspondant respectivement à un premier seuil de changement de comportement au compactage assimilé par A. FAURE (1978) à un seuil d'entrée en plasticité du matériau à l'énergie considérée, et à l'obtention d'un maximum de masse volumique (ρ_{dm}) , l'échantillon étant alors saturé ou très proche de la saturation. Ces seuils hydriques et les densités qui leurs correspondent dépendent fortement de l'énergie de compactage et de la constitution du matériau et notamment des teneurs en argile et en matière organique (FAURE, 1978; GUERIF et FAURE, 1979).

C'est ainsi que GUERIF et FAURE ont établi à partir d'une population de sols naturels un certain nombre de relations statistiques formalisant cette influence de l'argile (A) et des constituants organiques (MO) sur les principales caractéristiques des courbes de comportement au compactage.

$$W_p = 0,27 A + 1,52 \text{ M.O.}$$

$$r = 0,84$$

$$\frac{1}{\rho_{dm}} = 0,197 A + 2,645 \text{ M.O.} + 0,503$$

$$r = 0,87$$

2.13. Analyse du tassement

Outre le test Proctor, M. GRIMALDI (1981) a mis en oeuvre une batterie de méthodes complémentaires :

- des mesures physiques permettant d'amener un échantillon à

Figure 1 Courbe de compactage (PROCTOR)

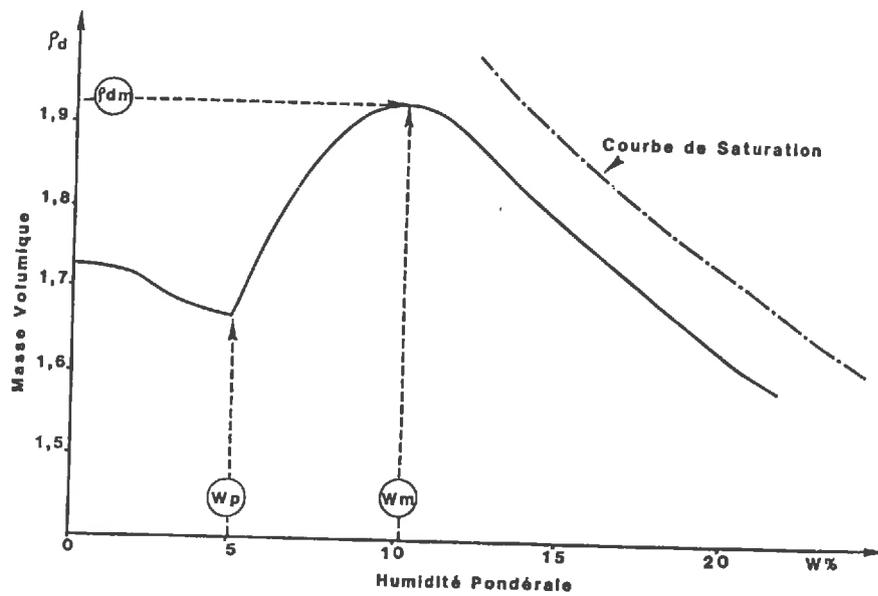
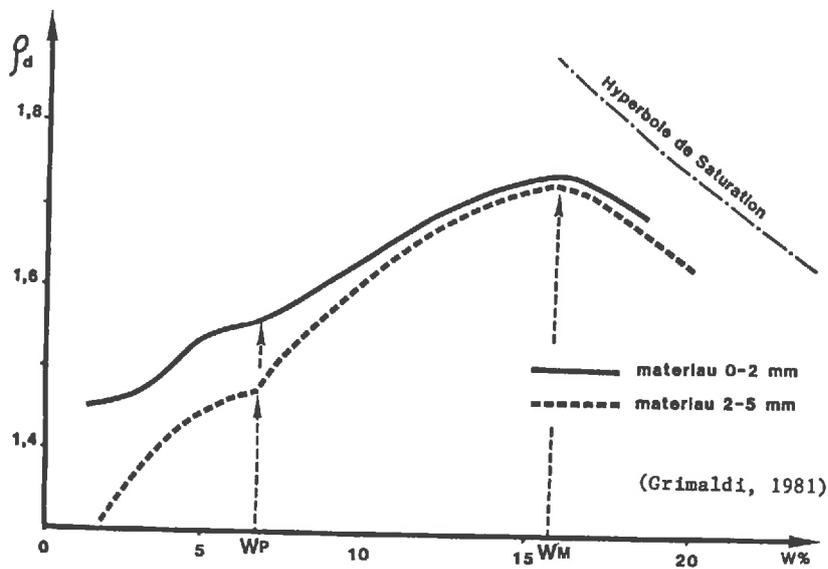


Figure 2 : Influence de la taille des agrégats sur le comportement au compactage (Test Proctor)



- l'équilibre avec une succion prédéterminée, soit par une pression pneumatique (pF 1,5 à 4,4), soit par le contrôle de l'humidité relative (pF supérieur à 4,8).
- la porosimétrie à mercure, permettant d'apprécier la distribution de la taille des pores dans des agrégats de sols.
 - et enfin, des observations micromorphologiques, en microscopie optique ou à balayage.

Le matériau étudié a été prélevé dans un horizon B_t (21% d'argile et 70% de limons), pauvre en matière organique (0,6 %).

a/ M. GRIMALDI observe dans son expérience avec le test Proctor que le tassement aux faibles humidités et notamment au voisinage du seuil W_p de changement de sensibilité au compactage est moins marqué avec des agrégats de taille comprise entre 2 et 5 mm qu'avec des agrégats de taille comprise entre 0 et 2 mm (figure 2).

D'après l'auteur, ce n'est pas tant la taille moyenne des agrégats que la distribution de celle-ci qui serait déterminante : le niveau de compacité atteint serait d'autant plus faible que les agrégats ont une taille initiale plus homogène ménageant entre eux une porosité d'arrangement plus importante; cet effet s'estompe pour des teneurs en eau plus élevées au moment du compactage. Ces résultats déjà obtenus par STENGEL et FAURE (1978) mettent en évidence, de façon plus générale, l'influence de l'état initial pour des couples, teneur en eau-énergie appliquée, n'autorisant pas un tassement maximum.

b/ M. GRIMALDI constate, dans les mêmes conditions expérimentales, que le compactage à des teneurs en eau croissantes provoque une diminution de la porosité interagrégats et finalement sa disparition au maximum de compacité. L'étude microscopique des lames minces à ce niveau de tassement confirme que le matériau acquiert alors une structure continue par suite de la coalescence des agrégats.

Par contre, quelle que soit la teneur en eau au moment du compactage, le tassement ne se traduit pas par une diminution significative de la porosité interne aux agrégats, cette dernière étant mesurée par la méthode proposée par MONNIER et al. (1973) sur des agrégats isolés d'une dimension de 2 à 3 mm.

c/ Le même auteur a, par ailleurs, pu mettre en évidence, en analysant la distribution de la taille des pores (plus précisément des seuils d'intrusion) par la technique de la porosimétrie au mercure, que la morphologie

de l'espace poral intraagrégats pouvait être sensiblement modifiée par le compactage et ceci de manière variable selon la teneur en eau à laquelle il est effectué (figure 3).

Ces modifications concernent vraisemblablement les cavités ménagées par l'assemblage des particules de limon enrobées d'argile, ainsi que l'ont montré sur un matériau à squelette plus grossier FIES et ZIMMER (1982). Il apparaît donc que le compactage à des humidités élevées (même lorsqu'il ne modifie pas, comme dans le travail de GRIMALDI, le volume poral total des agrégats) est susceptible de modifier l'organisation et l'accessibilité des pores.

d/ Toujours selon M. GRIMALDI, des différences de comportement non négligeables sont liées au mode de préparation des agrégats (existence ou non d'une phase de dessiccation avant compactage). Il semblerait donc que les limites hydriques de comportement dépendent non seulement de l'énergie mise en jeu et de la constitution du matériau, mais aussi de l'histoire énergétique subie par le matériau avant compactage.

e/ Il en résulte que les propriétés de rétention de l'eau du matériau sont modifiées. Une série d'expériences de mise en équilibre d'échantillons de sols avec une succion prédéterminée a montré que le compactage se traduit par des changements de comportement hydrique du matériau, en dessiccation comme en réhumectation, entre pF 1,5 et pF 4,2 au moins, c'est à dire dans toute la gamme de succions pour lesquelles il est couramment admis que l'eau est disponible pour les plantes.

f/ Dans l'expérience de M. GRIMALDI, le compactage se traduit aussi par des changements importants des propriétés de retrait et de gonflement du matériau : au cours d'une dessiccation, les agrégats acquièrent une compacité plus élevée et ceci d'autant plus que le matériau a été au préalable compacté à une humidité plus élevée. Les effets des tassements les plus intenses seraient aggravés par la dessiccation.

De plus, les écarts de compacités d'agrégats apparus lors de la dessiccation subsistent lorsque le matériau est réhumecté. Une alternance de "dessiccation-humectation", quelle que soit son amplitude, ne parvient pas à effacer, au contraire, les effets sur la structure des tassements les plus intenses. Dans les limites de ce modèle expérimental, le phénomène présenterait donc un certain aspect d'irréversibilité.

Figure 3 : Influence de la teneur en eau lors du compactage sur les modifications de la morphologie de l'espace poral intraagrégat. Comparaison de courbes d'intrusion de mercure : volume intrudé en fonction du rayon équivalent des pores d'intrusion.

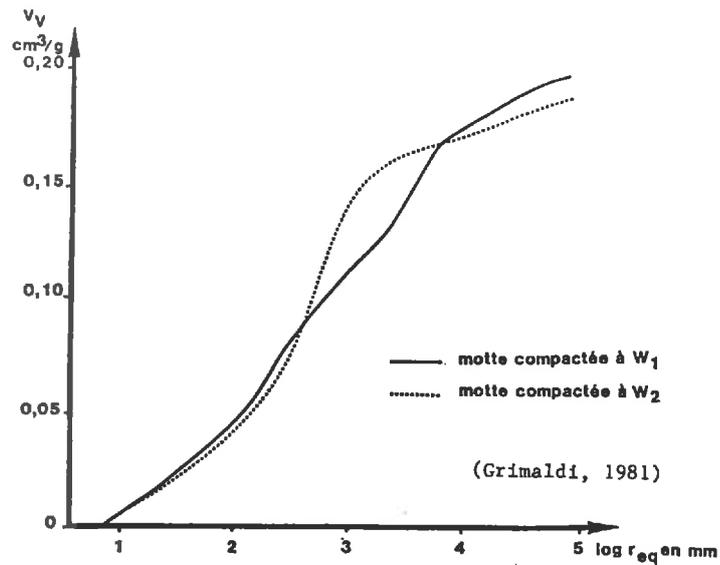
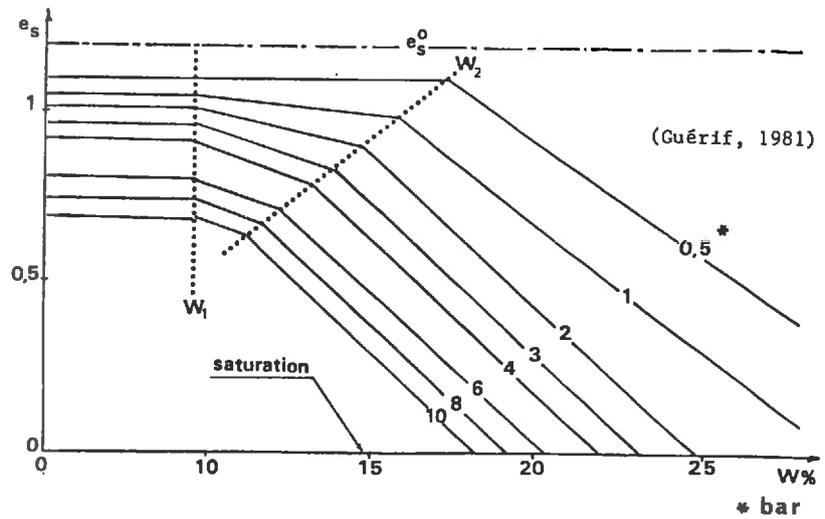


Figure 4 : Exemple de courbes de compactage obtenues à l'oedomètre : variation de l'indice des vides structural en fonction de la teneur en eau lors du compactage. Influence de l'intensité de la charge appliquée.



2.14. Limites de l'utilisation du test Proctor (GUERIF, 1982)

Le test Proctor est donc une méthode particulièrement révélatrice de l'effet de la teneur en eau et elle offre un grand intérêt comparatif. En revanche, elle présente des limites dans l'analyse des variations de compacité du matériau.

Le protocole et l'appareillage de ce test ne permettent :

- ni d'analyser les variations du volume de l'espace poral d'un échantillon, son état initial n'étant pas défini,
- ni de traduire à des fins prédictives ou analytiques l'énergie de compactage en terme de pression appliquée.

Il est donc impossible avec cette méthode :

- d'établir des relations entre pression appliquée et potentiel de l'eau dans le matériau,
- de transposer des résultats acquis au laboratoire dans des analyses de comportements in situ.

Cette analyse de l'intérêt et des limites de l'utilisation du test Proctor a conduit à mettre en oeuvre simultanément un autre type de test, "statique".

2.2. Les tests avec application statique de l'effort (GUERIF, 1982)

La cellule de compression est constituée d'un cylindre et d'un piston de 7 cm de diamètre, la hauteur de l'échantillon avant compactage étant de 2,4 cm. Cette stricte définition du volume initial de l'échantillon permet d'en maîtriser l'état initial. Si le sol est saturé, la présence de deux plaques poreuses permet l'évacuation de l'eau au cours du compactage.

L'application statique de l'effort donne la possibilité de contrôler au mieux l'intensité et le temps d'application de la pression appliquée. Les intensités de pression retenues (entre 0,5 et 10 bar) sont compatibles avec les gammes des pressions au sol engendrées généralement lors du passage des engins agricoles. Les temps d'application en revanche ne sont pas du même ordre que ceux relevés lors du roulage (1/25 s pour une vitesse d'avancement de 0,8 m/s) : ils sont plus élevés : soit de l'ordre de 4 heures, ce qui permet d'atteindre un état d'équilibre : soit de l'ordre de la minute (temps court, mais suffisamment long pour assurer une bonne répétabilité des résultats).

Ce dispositif permet aussi de suivre les effets cumulés d'une même

pression et la cinétique de compression et de recouvrance. Il permet enfin d'étudier les variables caractéristiques de matériaux divers : constitution (minérale, organique ...), état hydrique (teneur en eau et potentiel), déterminant des comportements au compactage.

Ce test permet donc de comprendre certains mécanismes de base, en étudiant l'effet d'une variable, toutes choses étant égales (ou contrôlées) par ailleurs. Il permet par exemple de classer des matériaux, au même titre qu'un test de stabilité.

La figure 4 (GUERIF, 1982) illustre le type de courbe obtenue avec un oedomètre, et la mise en évidence du rôle de la pression appliquée sur la forme de ces courbes. Le seuil W_1 correspond à la limite de retrait des agrégats constituant le massif. Il est indépendant de la charge appliquée. W_2 correspond au seuil de sensibilité au compactage. Il est fonction de l'intensité de la charge appliquée. Entre W_2 et W_3 l'indice des vides structural décroît, jusqu'à un point d'arrêt correspondant à la saturation de l'échantillon pour la teneur en eau W_3 . Pour la charge appliquée, le massif est à son maximum de compacité.

Les données de ce test statique, les types d'interprétation du comportement au compactage des milieux discontinus qu'ils autorisent, ouvrent des pistes de recherche. On peut envisager notamment :

- de développer la notion de caractéristiques mécaniques intrinsèques en reliant la cohésion et l'angle de frottement interne au niveau textural à des variables de constitution.

- de relier les comportements mécaniques et les variables qui les décrivent au potentiel de l'eau dans le matériau en cours de compression.

Mais pas plus que l'essai Proctor, ce test ne donnera les moyens de prévoir directement le comportement au compactage des couches de sols en place. Il constitue cependant un préalable nécessaire à la généralisation d'études de terrain visant à prendre en compte, dans des situations bien typées, les anisotropies de constitution (matière organique), d'organisation et d'hydratation des couches de surface dans les phénomènes de tassement.

que l'on peut simplifier ce profil en trois couches (figure n° 5). Cette différenciation du profil en couches (ou horizons) est une illustration de l'anisotropie de la structure.

La première couche, A, est la couche concernée par le travail superficiel (0 à 10-12 cm). La deuxième couche, B, est comprise entre la précédente et l'ancien fond de labour avant l'implantation de l'essai (à 25 cm de profondeur). La troisième couche, C, est l'horizon sous-jacent.

La machine à tasser est alors utilisée, dans des conditions évoquées au § 3.11. Les profils de masse volumique obtenus après tassements sont simplifiés en fonction des trois couches A, B, C définies précédemment (moyennes par couches) (figure n° 6).

Ces mêmes données peuvent être représentées graphiquement d'une autre manière, en traçant les courbes de compression des trois couches (indice des vides totaux e), en fonction de la pression appliquée en surface, P (figure n° 7).

On constate sur ces courbes que la couche B sert de plancher, stable et incompressible, à la couche A, qui se tasse d'autant plus que la pression augmente, et ceci jusqu'à 4 bar environ.

Pour une pression comprise entre 4 et 6 bar, la couche B commence à se tasser. Le tassement de A reprend lorsque la couche B se stabilise à nouveau.

3.13. Les résultats obtenus par cette expérience conduisent à quelques remarques :

- ce test de terrain, avec une machine à tasser, offre le grand intérêt de permettre l'étude des phénomènes de fluages latéraux et d'extension des zones tassées.

- une telle approche de tassements de multicouche suppose que ces couches ont un comportement homogène. Elle permet d'aborder le comportement global du profil comme une somme de comportements individuels et interactifs.

- la théorie d'un tel mécanisme paraît difficile. On peut cependant espérer ramener l'ensemble des cas possibles de profils de sols cultivés à un nombre limité de cas type pour lesquels on pourrait prévoir les scénarios de comportement.

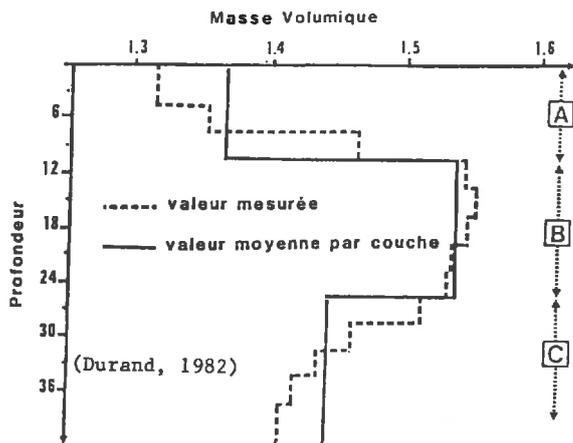


Figure 5 : Anisotropie verticale des sols travaillés : Exemple de modélisation en trois couches A, B, C.

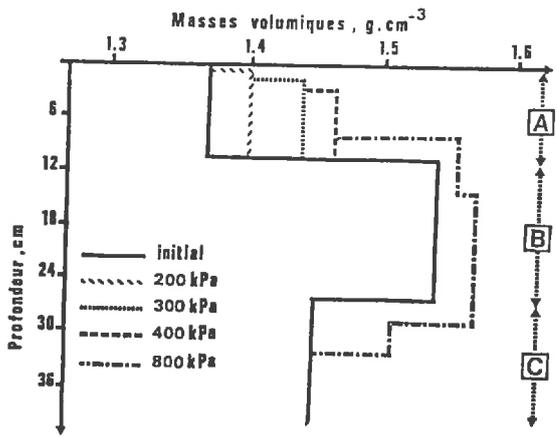


Figure 6 : Comportement au compactage d'un tricouche par applications de charges successives croissantes.

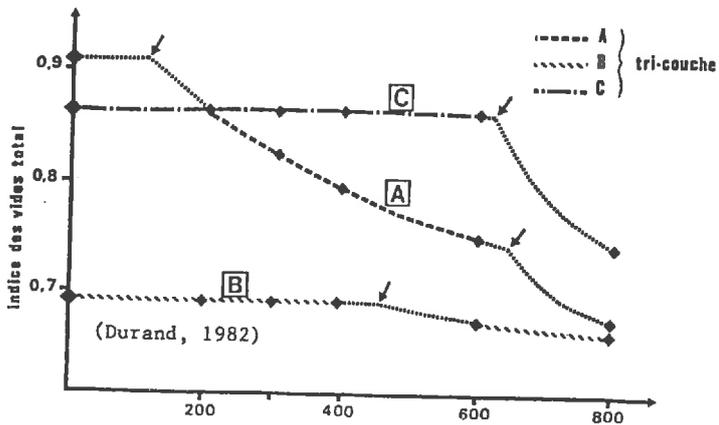


Figure 7 : Compressibilités relatives des trois couches A, B, C.

3.2. Etudes de terrain mettant en jeu des outils de travail courants

3.21. Rappel sur l'importance du tassement structural

La figure 8 illustre l'intérêt d'étudier le tassement au niveau structural. Dans un sol fraîchement travaillé, l'indice des vides structural est beaucoup plus élevé que dans un sol non travaillé : 1,30 contre 0,12. Plusieurs mois après le travail, et dans les conditions de l'expérience (sol limono-argileux; humidité voisine de la capacité de rétention), l'indice des vides chute fortement (0,49), particulièrement dans le cas d'un sol roulé (0,27). Or, la comparaison des valeurs de l'indice des vides textural, révèle des variations extrêmement faibles entre ces divers cas de figure (0,63 à 0,65).

Au plan quantitatif, le tassement au niveau structural offre donc le caractère le plus spectaculaire. On ne doit pas cependant négliger le suivi de la porosité texturale, notamment dans les aspects liés à la distribution dimensionnelle des pores.

3.22. L'analyse des conséquences d'un roulage sur un sol argileux travaillé à la bêche rotative : une mise en évidence de l'effet "profil hydrique" (BERTUZZI, 1980; GUERIF, communication orale)

Le sol est travaillé à la bêche rotative, et porté par aspersion à une teneur en eau voisine de la capacité de rétention. Le sol choisi est argileux, 40 à 45% d'une argile gonflante (sol à tendance vertique). Deux expériences ont été menées :

- Première expérience : après redistribution de l'eau dans le profil, à la capacité de rétention, on roule à trois pressions de gonflage de pneumatique (tracteur) : 0,5 - 1,25 - 2,0 bar.

Résultat : quelle que soit la pression, l'indice des vides structuraux est ramené à des valeurs proches de zéro. On obtient une couche de sol à structure quasi-continue. Les profondeurs d'ornières sont identiques (figure n° 9).

- Deuxième expérience : deux jours de mistral, à très forte demande climatique, provoquent un dessèchement de la couche 0-5 cm, qui apparaît comme étant pratiquement "à l'état sec" à l'air. La couche sous-jacente est restée, elle, à la capacité de rétention.

Résultat : (figure n° 10). On observe une hiérarchisation des profondeurs d'ornière, et de l'augmentation de la compacité, en fonction de la pression de gonflage des pneumatiques. La couche sèche joue donc un

Figure 8 : Analyse du système de porosité d'un sol limono argileux à la capacité de rétention : Partition de l'indice des vides total en indices des vides textural et structural

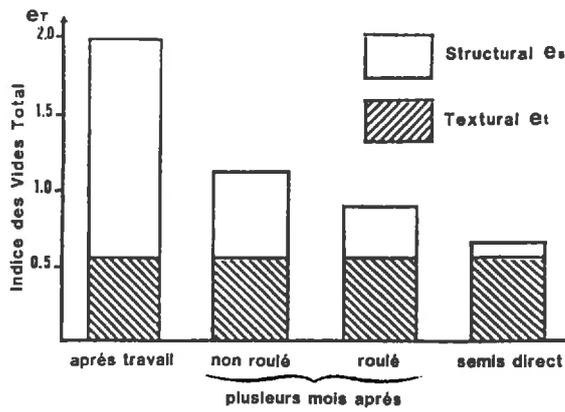


Figure 9 : Comportement au roulage à la capacité de rétention d'un sol argileux travaillé

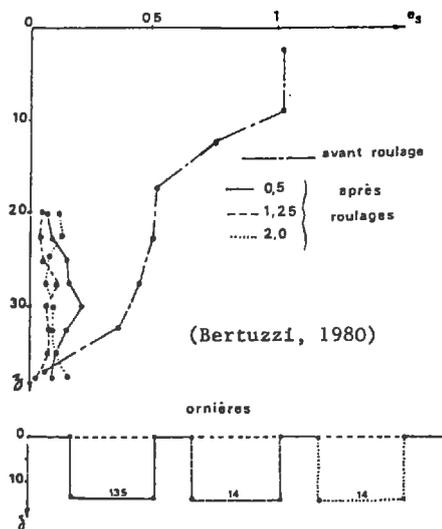
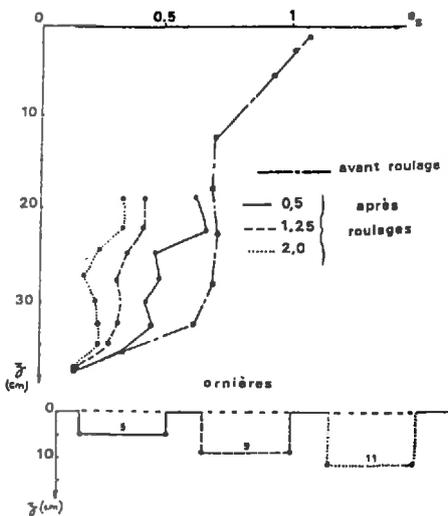


Figure 10 : Effet d'un gradient hydrique vertical sur le comportement au roulage d'un sol argileux travaillé.



rôle protecteur vis à vis de la couche sous-jacente. Mais l'interface couche sèche/couche humide est un mélange de ces deux couches dont les propriétés mécaniques résultantes peuvent être préjudiciables à la levée ou à l'enracinement de jeunes plantules.

3.3. Remarques

D'autres types d'observations, de données sont en cours d'obtention, mais dans un contexte qui n'est pas, contrairement aux précédents, celui de l'O.N.I.C.. Il s'agit des mesures de densités avant et après roulage, en cours à la Station I.T.C.F. de La Jaillière (Loire-Atlantique) sur des systèmes fourragers. Ils concerneront notamment des essais avec des pressions de gonflage différentes : ils ne sont cités ici que pour mémoire. On doit aussi rappeler les travaux de PLET et al. (1975) à Rennes.

IV. CONCLUSIONS

Quatre points nous paraissent résumer l'essentiel des travaux présentés ici.

4.1. L'étude en laboratoire des mécanismes du tassement a permis grâce à des tests qui présentent un grand intérêt comparatif, de :

- décrire, macro et micromorphologiquement, l'organisation des constituants de matériaux tassés dans des conditions diverses.
- mettre en évidence le rôle d'un certain nombre de paramètres, tels la teneur en eau, en argile, en matière organique du matériau ; la structure initiale et l'histoire énergétique antérieure de ce matériau;
- aborder l'étude des mécanismes en jeu : angle de frottement interne, inter et intra-agrégats, cohésion, ...

La limite de ces essais tient à l'impossibilité de transposer directement les résultats obtenus en laboratoire, même si de ce point de vue l'oedomètre est déjà plus proche de la "réalité terrain" que le test Proctor.

4.2. Les études de terrain, entreprises soit par le biais d'une machine à tasser, soit par l'utilisation d'engins (tracteurs), ont fourni de nombreuses indications intéressantes. Mais elles montrent aussi le chemin encore à parcourir pour parvenir à une maîtrise réelle du tassement.

Ceci tient notamment à l'extrême difficulté d'établir une théorie des mécanismes à l'échelle du terrain.

- 4.3. L'objectif à moyen terme paraît donc plutôt de dresser sur le terrain une typologie de cas de comportement et, à partir de cette typologie, de bâtir un certain nombre de scénarios de comportement.
- 4.4. Les études de laboratoire et de terrain menées simultanément dans le cadre de cette convention O.N.I.C. se complètent : "la confrontation des caractéristiques mécaniques intrinsèques des matériaux avec des observations plus globales de comportement in situ devrait permettre de dégager des règles, à la fois analytiques et empiriques, de prédiction du comportement d'une couche de sol de surface et donc :
- de choisir des conditions d'états physiques favorables aux opérations culturales,
 - d'envisager des solutions techniques au niveau des choix, voire des conceptions des matériels agricoles" (GUERIF, 1982).

B I B L I O G R A P H I E

- BERTUZZI P., 1980 - Déformation d'un sol argileux par le roulage d'un tracteur : études expérimentales au laboratoire et in situ. Mémoire fin d'études ENITA. Dijon - 43 p. INRA, Science du Sol - Avignon.
- DURAND H., 1982 - Comportement au compactage d'une couche de sol cultivée : influence de la profondeur de travail. Mémoire fin d'études ENITA. Dijon - 33 p. INRA, Science du Sol - Avignon.
- FAURE A., 1978 - Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Doc. ès Sciences, Grenoble, 179 p.
- GRIMALDI M., 1981 - Contribution à l'étude du tassement des sols : évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. Thèse Doctorat d'Ingénieur, ENSA Rennes, 221 p.
- GUERIF J., FAURE A., 1979 - Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage : 1. Etude statistique. Ann. agron. 30 (5), 387-399.
- GUERIF J., 1982 - Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur eau et de la pression appliquée. Agronomie, 2 (3), 287-294.
- GUERIF J., 1984 - The Influence of water-content Gradient and Structure Anisotropy on soil compressibility. J. agric. Engng Res, 29, 367-374.
- PLET P., TANGUY H., 1975 - Contribution à l'étude des relations entre l'évolution du profil cultural et le comportement des assolements céréaliers intensifs dans l'Ouest de la France. Mémoire de DEA-DAA, Univers. et ENSA de Rennes : 185 p.