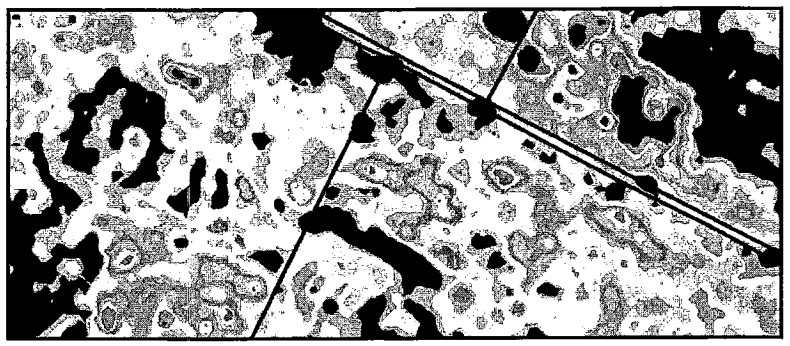


# AGRICULTURE DE PRÉCISION



**Avancées de la recherche**

---

**technologique**

---

**et industrielle**

---

**Actes du colloque UMR Cemagref-ENESAD  
Dijon, 29-30 mai 2000**

# **La résistance mécanique du sol : mesure en continu et cartographie pour l'agriculture de précision**

***The soil strength : measure on-line and cartography  
for precision agriculture***

**D. Sirjacobs**

**M.F. Destain**

***Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux  
FUSAGx\****

## ***Résumé***

La résistance mécanique d'un sol est un paramètre important qui conditionne la croissance racinaire et le développement des plantes. L'objectif de cette recherche est de mettre au point un capteur capable de mesurer en ligne les variations locales de résistance du sol. Celui-ci est constitué d'un anneau dynamométrique qui enregistre indépendamment les sollicitations (forces horizontales, verticales et couple) générées par la traction uniforme d'une lame dans le sol. Une première expérience a été menée dans un champ limoneux situé en Hesbaye (Belgique). Le géocodage de ces informations via un système DGPS a permis d'identifier des zones de diverses résistances au sein de la parcelle étudiée.

**Mots-clés :** Résistance mécanique du sol, mesure en continu, cartographie

---

\* Laboratoire de mécanique agricole,  
Passage des Déportés, 2  
Gembloux - Belgique.  
Fax : 0032 81 62 21 67 - Tél. : 0032 81 62 21 63  
E.mail : sirjacobs.d@fsagx.ac.be et destain.mf@fsagx.ac.be

### **Abstract**

*The soil mechanical resistance is an important parameter, affecting root growth and plant development. The aim of this research is to develop a sensor able to measure on-line the local soil strength variations. The sensor is constituted of a ring dynamometer recording independently the solicitations (horizontal, vertical forces, and moment) generated by the uniform traction of a blade in the soil. A first field experiment was performed in a silt soil (Hesbaye, Belgium). Geocoding those information with a DGPS system allowed the first identification of different soil strength areas in the parcel investigated.*

**Keywords :** *Soil mechanical strength, measure on-line, cartography.*

## **1. La résistance mécanique du sol**

La résistance mécanique du sol (*soil strength*) exprime la grandeur de la force qu'il faut exercer sur un élément de sol pour produire une déformation donnée. Sa mesure directe est donc nécessairement destructive et implique le remaniement du volume de sol étudié. Lorsqu'il est soumis à des forces extérieures, un sol peut subir une compaction (par exemple, sous l'effet du passage de véhicules) ou une rupture (par exemple, sous l'action des outils de travail du sol), en fonction de ses caractéristiques internes et de l'intensité des forces appliquées. Une résistance mécanique élevée peut être un élément favorable ou défavorable selon les objectifs. Elle est favorable à la circulation des véhicules car elle augmente la capacité portante mais est défavorable au travail du sol car elle accroît les forces de traction requises, rend plus difficile la création d'une structure optimale, contrarie l'émergence des semis et la croissance racinaire.

Plusieurs méthodes d'évaluation de la résistance du sol ont été développées. Deux d'entre elles sont plus classiquement utilisées. D'une part, une méthode de laboratoire qui, sur la base d'essais triaxiaux, permet d'estimer deux paramètres essentiels de la mécanique des sols à partir d'échantillons de sol non perturbés : la cohésion et l'angle de frottement interne. D'autre part, la mesure de la résistance à la pénétration par enfoncement d'un cône dans le sol constitue une méthode semi-empirique de terrain plus rapide à mettre en œuvre, mais délivrant une information plus globale. On trouve dans la littérature de nombreuses applications des pénétromètres, notamment pour évaluer les effets du passage des véhicules (Jorajuria et al, 1997), déterminer les effets de la compaction sur le développement des racines (Varsa et al, 1997), mesurer la résistance de croûtes superficielles (Martino et Shaykewich, 1994), analyser la variabilité spatiale de la résistance du sol (Perfect et al, 1990), etc. Cependant, ces méthodes sont de nature discontinue et donc lourdes à mettre en œuvre dans un but de cartographie.

L'objectif de cette recherche est de mettre au point un capteur dynamométrique capable de mesurer en ligne les variations locales de résistance du sol afin d'envisager une approche localisée du travail du sol. Comme dans le cas des méthodes précédemment citées, on cherche à mesurer les efforts nécessaires à la création d'une déformation donnée.

## 2. Le capteur dynamométrique

### 2.1. Description et principe de fonctionnement

Le capteur s'inspire du principe utilisé lorsqu'on instrumente les dents d'outils de travail du sol pour la détermination des efforts de traction requis (Hamza et Destain, 1998). Il est constitué d'un soc se déplaçant horizontalement dans le sol, légèrement incliné par rapport à la verticale (figure 1). Ce soc subit des sollicitations pouvant se ramener à une force horizontale  $F_x$  et une force verticale  $F_z$ . Le corps d'épreuve du capteur de forces est de type « anneau octogonal étendu ». Il est fixé rigidement, hors du sol, entre l'étau supportant la lame et le tracteur. Il subit donc les mêmes sollicitations  $F_x$  et  $F_z$  ainsi que leur couple de transfert  $M_y$ . Le système de détection est constitué de jauges de contrainte, convenablement collées et raccordées pour constituer trois ponts de Wheatstone mesurant sans interférence  $F_x$ ,  $F_z$  et  $M_y$ .

Les sollicitations  $F_x$ ,  $F_z$  et  $M_y$  sont fonction de l'état physique du sol mais également de la géométrie, de la profondeur d'enfoncement et de la vitesse de traction de la lame. Ces trois derniers paramètres doivent donc être maintenus constants dans le but de détecter les variations de la résistance mécanique du sol.

En ce qui concerne la géométrie, un soc long (longueur 27 cm) et étroit (largeur 4,5 cm), ne nécessitant qu'une faible puissance de traction, a été choisi. Il est mis en place avec un angle d'attaque de  $10^\circ$  par rapport à la verticale afin de faciliter son enfoncement dans le sol. Des essais préliminaires ont montré que cette géométrie présentait une très bonne sensibilité, c'est à dire un rapport élevé entre les sollicitations mesurées et la résistance à la pénétration observée à l'aide d'un pénétromètre conventionnel.

La profondeur d'enfoncement est maintenue constante en employant le système de contrôle de position du relevage trois points du tracteur. Le capteur est fixé sur ce dernier par l'intermédiaire d'un bâti. L'ensemble est réglé pour un enfoncement de 30 cm afin de collecter des informations concernant la tranche la plus superficielle du sol. L'objectif est, en effet, de fournir les informations utiles à une gestion localisée des travaux de sol superficiels classiques.

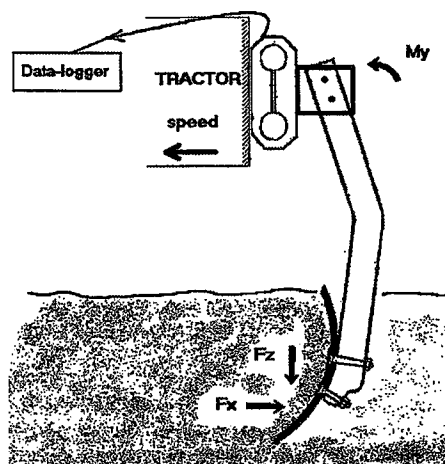


Fig. 1 : Schéma général du capteur.

La vitesse de traction de la lame est maintenue constante à une valeur de 5 km/h par un réglage précis du régime du moteur. Cette vitesse d'avancement est courante pour de nombreuses opérations culturales et le comportement du capteur pourra ainsi être étudié en conditions d'utilisation normales.

## 2.2. Dimensionnement et réalisation

Le dimensionnement de l'anneau dynamométrique se base sur les travaux de Godwin R.J. (1975) et de Hamza et Destain (1998) et utilise la formule de Cook et Rabinowicz (1963). Le calcul prend en compte le moment  $M_y$  maximal qui doit être transmis par l'anneau. Ce moment de dimensionnement  $M_y$  a été estimé par voie théorique via l'équation universelle des mouvements de sol (Reece A.R., 1965). L'usinage de l'anneau dynamométrique, le positionnement des jauges, les raccordements électriques, l'assemblage du capteur et la réalisation du bâti destiné à la fixation sur l'attelage trois points du tracteur ont entièrement été réalisés au Laboratoire de Mécanique agricole de la FUSAGx. Un étalonnage du capteur a été mené en laboratoire de manière à établir les relations entre les sollicitations appliquées (forces horizontale  $F_x$ , verticale  $F_z$  et couple  $M_y$ ) et les tensions de sortie délivrées par les ponts de jauges de contrainte. Ces relations sont linéaires avec un excellent coefficient de corrélation ( $r^2 > 0.9999$ ).

## 3. Chaîne de mesure et acquisition des données

Une chaîne de mesure complète a été conçue et réalisée afin de permettre l'acquisition simultanée des signaux fournis par le capteur dynamométrique et par un système DGPS destiné à repérer la position spatiale du tracteur. La chaîne de mesure comporte les éléments suivants : un ordinateur portable de type industriel, une carte d'acquisition analogique et numérique, un conditionneur de signal assurant l'alimentation stabilisée des ponts de jauges. L'acquisition des signaux provenant du capteur doit être caractérisée par (1) une possibilité de géocodage à des fins de cartographie et (2) une fréquence de mesure suffisamment élevée pour permettre une analyse vibratoire des forces de traction, susceptible de délivrer des informations concernant le mode de rupture du sol. Une telle acquisition a été réalisée grâce au logiciel « Labview » (National Instruments). Une application Labview « haute fréquence » a été modifiée afin de permettre l'acquisition des signaux issus du capteur à une fréquence de 500 Hz ainsi que leur repérage temporel (enregistrement précis de l'instant initial d'acquisition des tensions  $V_{F_x}$ ,  $V_{F_z}$  et  $V_{M_y}$ ) qui servira au géocodage ultérieur. La position délivrée par l'antenne DGPS est enregistrée via le logiciel « Geographic Tracker » de Mapinfo, au rythme d'une acquisition par seconde des coordonnées en WGS-84 et du temps UTC vers un fichier indépendant.

## 4. Première expérience en champ

### 4.1. Objectifs et plan expérimental

Une campagne de mesure a été menée à Hannut (Belgique) en octobre 1999. La parcelle expérimentale (2 ha) est située en région limoneuse sur les plateaux ondulés de la Moyenne Belgique. Elle présente deux légères ondulations de quelques mètres de dénivelé (3-4 mètres sur 600 mètres de long). Le sol est limoneux à horizon B textural A<sub>ba</sub> (Baeyens, L. 1960). Cette parcelle avait été emblavée en froment, récoltée en août 1999 et n'avait subi aucun déchaumage.

L'objectif des essais était d'abord de réaliser une cartographie des forces brutes mesurées par le capteur dynamométrique afin d'obtenir une image de la variabilité naturelle de la résistance du sol à l'échelle du champ. Le second objectif était d'étudier les relations entre les forces de traction et plusieurs paramètres physiques du sol mesurés sur 10 parcelles d'essais, réparties à travers le champ (figure 2). Ceux-ci sont, d'une part des profils pénétrométriques qui fournissent une caractérisation rapide (mais globale) de la résistance mécanique du sol et, d'autre part, les teneurs en eau, courbes de pF, densités, granulométries, limites d'Atterberg, essais triaxiaux et de compression simple qui doivent permettre d'aborder le problème sous un angle plus fondamental.

Chacune des 10 parcelles « test » est positionnée sur le passage du capteur et couvre une zone de sol de 20 mètres de long. Cette dimension a été estimée suffisamment grande pour obtenir des efforts mesurés moyens représentatifs de la zone, tout en considérant la parcelle comme une unité de sol aux propriétés homogènes. Elle correspond également à l'ordre de grandeur de résolution qui pourrait concrètement être adopté lors d'une conception localisée des travaux de sol. Les parcelles ont été placées dans le champ de manière à couvrir au mieux la variabilité des conditions de sol suggérée par une observation du champ la veille de l'expérience.

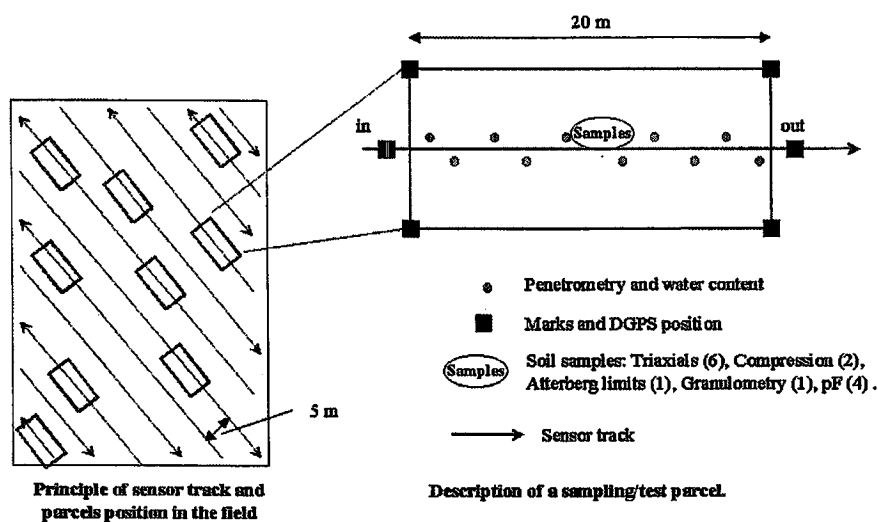


Fig. 2 : Schéma expérimental (Hannut, 10/99).

## 4.2. Traitement des signaux issus du capteur dynamométrique

Un programme écrit en langage C ++ réalise en post-traitement la conversion des tensions délivrées par le capteur dynamométrique en sollicitations  $F_x$ ,  $F_z$  et  $M_y$  en appliquant les équations d'étalonnage obtenues en laboratoire et en tenant compte du poids propre du capteur. Il recalcule également l'instant d'enregistrement de chacune des mesures à partir de l'instant initial de mesure, de la fréquence de mesure et du décalage entre le temps local (horloge de l'ordinateur portable) et le temps UTM du DGPS. Le programme génère deux types de fichiers supplémentaires destinés aux deux objectifs de traitements et analyses envisagés dans le cadre de cette expérience. Les uns (fichiers « parcelle ») contiennent les données relatives à chacune des dix parcelles test, identifiées et extraites grâce à la valeur d'un indicateur de parcelle commandé manuellement. Ils serviront à l'étude des relations entre l'état physique du sol mesuré et les forces de traction enregistrées. Un exemple de ce type de fichier correspondant à la parcelle 1 est représenté en figure 3. Les autres contiennent les valeurs moyennes de chaque sollicitation calculées pour chaque seconde de mesure. Ceux-ci serviront à l'étude cartographique des sollicitations brutes.

### Sollicitations mesurées dans la parcelle 1, ligne 1.

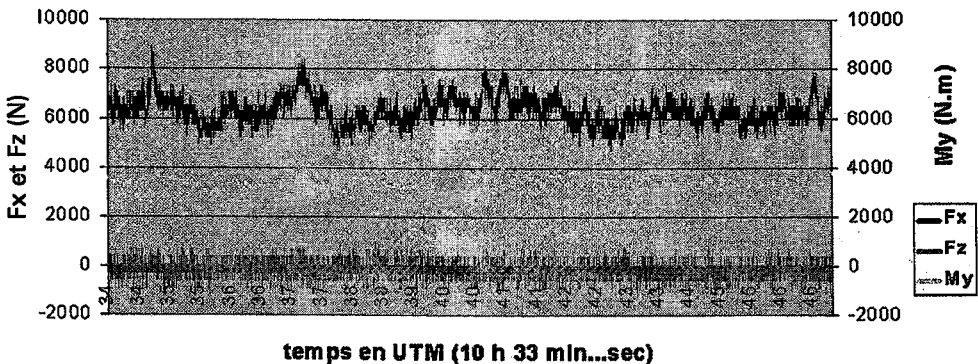
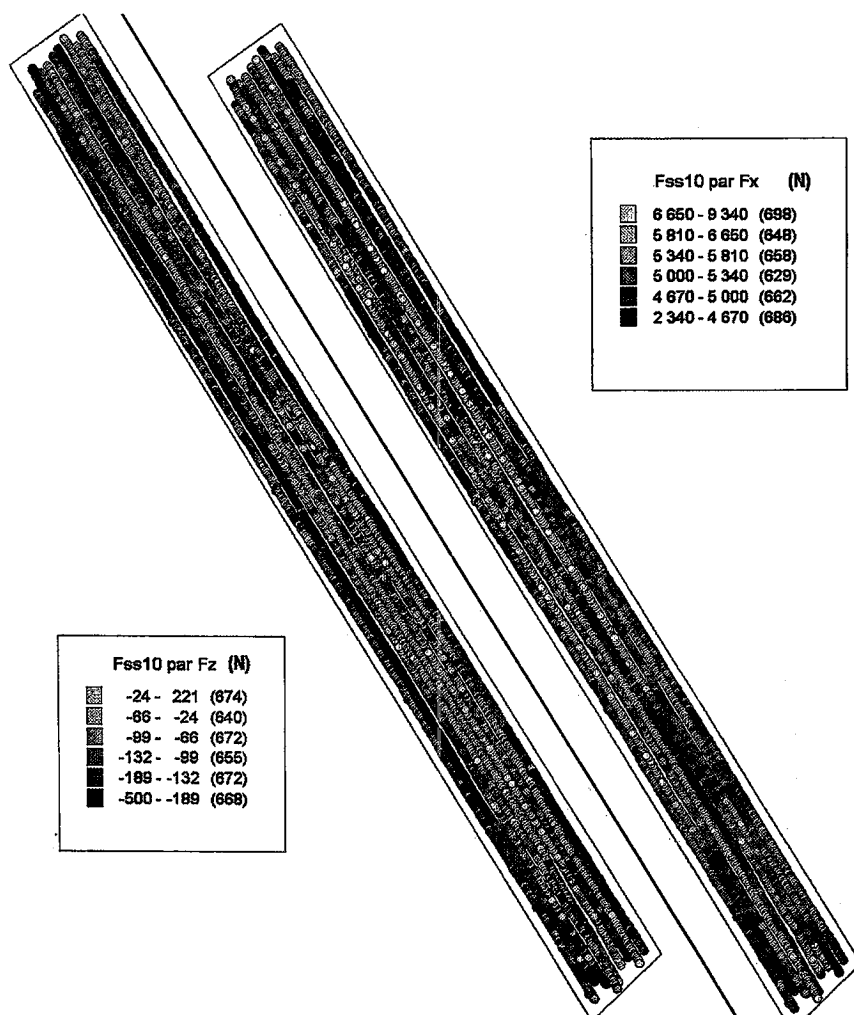


Fig. 3 : Sollicitations mesurées dans la parcelle n° 1, données brutes.

## 4.3. Cartographie des forces brutes

Le géocodage a été réalisé par l'association des valeurs de forces avec leurs coordonnées GPS, via le temps UTM contenu dans les deux fichiers. Cette opération a été réalisée à l'aide du logiciel MapInfo. Elle a permis d'obtenir un contrôle de la localisation des parcelles tandis qu'une analyse thématique (6 classes de même population) nous donne un premier aperçu cartographique de la variation des sollicitations mesurées (figure 4). Les limites de classes sont indiquées en légende, ainsi que les populations, entre parenthèses. L'observation de ces cartes permet déjà d'identifier des zones de diverses résistances, malgré la relativement grande homogénéité du champ. Certains passages du capteur

donnent une réponse assez différente des lignes voisines. Ceci peut être dû au fait que le capteur soit situé dans une ancienne trace compactée, ou à une variation de l'enfoncement de la lame (par exemple : passage du tracteur dans une trace de moissonneuse-batteuse). Une autre explication est liée à la représentation utilisée qui fait apparaître comme contiguës des lignes de mesure qui sont en réalité séparées de 5 mètres : des mesures intermédiaires auraient peut-être montré une variation plus progressive des résistances. La mise en place d'une solution géostatistique adaptée (filtres, technique d'interpolation) lors de la phase de cartographie proprement dite, qui constitue la prochaine phase de traitement des données, devrait permettre de lever ces indéterminations.



**Fig. 4:** Aperçu cartographique des forces horizontales  $F_x$  et verticales  $F_z$  enregistrées à Hannut (10/99).



## **4.4. Etude des relations entre forces et paramètres physiques du sol**

L'étude et analyse globale des différents paramètres physiques du sol sera réalisée une fois en possession de l'ensemble des résultats. L'étude de la relation entre ceux-ci et les forces mesurées sera abordée sous un aspect fondamental d'une part, impliquant des techniques telles que la modélisation des efforts ou l'analyse du spectre de fréquence des sollicitations enregistrées. D'autre part, des relations empiriques seront recherchées par analyse statistique globale, par comparaison des sollicitations avec des indices représentant l'état physique du sol. A l'exception des essais triaxiaux et de compression simple toujours en cours, les différents essais de laboratoires concernant la mesure des paramètres physiques du sol sont terminés. Quelques premiers commentaires relatifs aux différents tests sont donnés ci-dessous.

### **4.4.1. Granulométrie**

Les échantillons de sol destinés à l'analyse granulométrique proviennent de la couche allant de 0 à 30 cm de profondeur. Les courbes confirment la grande homogénéité texturale du champ annoncée par la carte pédologique (limon fin).

### **4.4.2. Masse volumique**

Les masses volumiques sèches obtenues à partir de mesures gravimétriques faites sur plusieurs échantillons non perturbés sont comprises entre 1,4 et 1,55 gr/cm<sup>3</sup> selon les parcelles. S'ajouteront ensuite les valeurs obtenues sur les échantillons destinés aux tests triaxiaux et de compression simple.

### **4.4.3. Teneur en eau**

Afin d'obtenir suffisamment de données sans s'encombrer d'une quantité difficilement manipulable d'échantillons destinés à la technique classique de pesée gravimétrique, une sonde Thêta Probe de type ML2-x (développée par Delta-T Devices) a été employée pour réaliser des mesures in situ. Il s'agit d'un capteur qui mesure la constante diélectrique du sol. La relation entre cette dernière et la teneur en eau du sol dépend de la composition du sol. Un calibrage spécifique au sol de Hannut a été réalisé selon la méthode proposée par le constructeur. Un échantillon de sol non perturbé a pour cela été prélevé dans chacune des 10 parcelles test. Cinq trous ont été creusés dans chaque parcelle le long du passage du capteur dynamométrique. Dans chacun d'entre eux, la teneur en eau a été mesurée (trois répétitions ou enfoncements de la Thêta Probe) pour les tranches 0-15 cm et 15-30 cm de profondeur. Les résultats de la mesure par la Thêta Probe ont principalement montré une absence de variation horizontale ou verticale significative de la teneur en eau à l'intérieur des parcelles test. L'ordre de grandeur de la teneur en eau était de 22%. Une variation de quelques pour cent a été observée d'une parcelle à l'autre.

#### **4.4.4. Limites d'Atterberg**

L'état de consistance des sols limono-argileux dépend fortement de leur teneur en eau. Atterberg a défini des essais conventionnels qui permettent de fixer les teneurs en eau pondérales délimitant les états solide, plastique et liquide de ces sols. Les valeurs de ces limites sont directement fonction de tous les paramètres physico-chimiques du sol et constituent en quelque sorte des paramètres de synthèse. L'indice de plasticité ( $I_p = w_l - w_p$ ) mesure l'intervalle de la teneur en eau à l'intérieur duquel on doit s'attendre à un comportement plastique du matériau. La plasticité observée dans toutes les parcelles est qualifiée de faible (de 5 à 10). L'indice de consistance «  $I_c = (w_l - w) / I_p$  » permet, en tenant compte de l'humidité présente dans le sol, de caractériser son état de consistance. L'état du sol rencontré durant cette expérience à Hannut est qualifié de peu consistant à consistant, selon les parcelles. La position du point représentatif dans le diagramme de Casagrande (couple  $w_l, I_p$ ) permet d'identifier la nature du minéral argileux dominant. En portant les valeurs obtenues pour la terre de Hannut, on voit que l'on se situe dans la zone des limons peu plastiques. En outre, on s'assure de l'absence d'argiles gonflantes et des complications de comportement mécanique qu'elles engendrent.

#### **4.4.5. Les courbes de pF**

La tension qui règne dans le liquide interstitiel du sol (soil moisture tension) influence significativement la cohésion apparente de ce sol et par conséquent son comportement mécanique. Cette succion dépend du type de sol ainsi que sa teneur en eau. La relation entre tension et teneur en eau (courbes de pF) est donc une information utile à l'étude du comportement mécanique d'un sol donné. Le pF équivaut au logarithme de la hauteur de succion (dépression exprimée par la hauteur de la colonne d'eau qui équilibre la succion du sol). Une courbe de pF a été établie à partir de deux échantillons pour chacune des 10 parcelles. Le comportement semble globalement homogène pour l'ensemble des parcelles.

#### **4.4.6. Profils pénétrométriques**

Treize profils pénétrométriques ont été enregistrés dans chaque parcelle grâce à un pénétromètre automatisé mobile. Un programme en C++ a été rédigé pour corriger l'erreur de profondeur des fichiers pénétrométriques due aux irrégularités de la surface du champ. Ce pré-traitement rend les profils comparables et a permis au programme de calculer le profil pénétrométrique moyen pour chaque parcelle. Les valeurs de résistance à la pénétration observées à 20 cm étaient comprises entre 1 et 2.5 Mpa.

#### **4.4.7. Compression et triaxiaux**

L'essai triaxial permet la détermination des paramètres intrinsèques de résistance mécanique du sol, à savoir la cohésion effective et l'angle de frottement interne. L'essai de compression simple permet quant à lui d'obtenir une valeur

de résistance à la compression (MPa) du sol. Il s'agit d'une notion plus globale, influencée notamment par sa teneur en eau au moment de l'essai. Il sera réalisé pour trois teneurs en eau : celle présente le jour de l'expérience, celles correspondant à la capacité en champ et au point de flétrissement pour ce sol. L'association des deux essais permet de plus d'étudier l'évolution de la cohésion apparente (somme de la cohésion effective et du supplément de cohésion dû à l'assèchement du sol) avec la teneur en eau du sol. Ces essais sont toujours en cours.

## **5. Conclusion**

L'utilisation de capteurs caractérisant en continu l'état physique du sol présente un double intérêt. D'une part, on peut les installer sur un véhicule en mouvement, équipé d'un système de positionnement (DGPS). Une fois traités, les signaux issus des capteurs doivent permettre d'établir des cartes apportant des informations complémentaires par rapport aux autres types de cartes déjà disponibles. La cartographie des propriétés physiques du sol facilitera l'étude de leur influence sur le développement des plantes et le rendement. Il s'agit d'une nouvelle couche d'information en agriculture de précision. D'autre part, les capteurs peuvent servir à réguler le fonctionnement des machines. En fonction des indications qu'ils délivrent, il devient possible d'adapter en temps réel les réglages des machines aux caractéristiques locales du sol rencontré afin de produire une structure de sol optimale. Les premiers résultats enregistrés durant la campagne de Hannut sont encourageants. Le capteur dynamométrique et la chaîne de mesure mis au point au cours de l'année 1999 semblent suffisamment sensibles et bien adaptés à la détection des variations de résistance mécanique du sol. La mise en place d'une telle expérience en conditions réelles a permis en outre d'identifier plusieurs améliorations à apporter au système.

### ***Remerciements***

Les travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet relatif à l'agriculture de précision, financé par le Ministère fédéral de l'agriculture (Belgique). Nous adressons nos remerciements au département Production végétale du Centre de Recherches Agronomiques (Directeur M. Franquinet) qui, dans le cadre du même projet, a apporté une contribution significative dans la mise en place et la réalisation des essais.

## Bibliographie

Baeyens (L.), 1960. *Carte des sols de la Belgique et texte explicatif de la planchette de Hannut 119 W*. Centre de cartographie des sols. IRSIA.

Cook (N. H.) and Rabinowicz (E.), 1963. *Physical measurement and analysis*. New York, Addison-Wesley.

Godwin (R. J.), 1975. *An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies*. J. agric. Engng Res. 20 : p. 347-352.

Hamza (E.) et Destain (M.-F.), 1998. *Instrumentation d'un tracteur agricole en vue d'étudier les besoins énergétiques des outils de travail du sol*. Proc. of the 13th international congress on agricultural engineering, Rabat (Morocco), p. 143-149.

Jorajuria (D.) and al., 1997. « The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium/Trifolium grassland ». *Soil & Tillage Research* 41, p. 1-12.

McKyes (E.), 1985. « Soil cutting and Tillage ». *Developments in Agricultural Engineering* 7, Elsevier.

Martino (D.) and Shaykewich (C. F.), 1994. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Can. J. Soil Sci.* 74 (2), p. 193-200.

Perfect (E.) and al., 1990. « Spatial variability of soil penetrometer measurements at the mesoscopic scale ». *Soil & Tillage Research* 16, p. 257-271.

Reece (A. R.), 1965. *The fundamental equation of earthmoving mechanics*. Symposium of Earthmoving Machinery, Institute of Mechanical Engineers, 179, Part 3F, London.

Scarlet (A.J.) and al., 1997. *Precision tillage : in-field, real-time control of seedbed quality*. Proc. of the First European Conference on Precision Agriculture, Warwick (UK), p. 503-510.

Varsa (E.C.) and al., 1997. « Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production ». *Soil & Tillage Research* 43, p. 219-228.