

# Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision

Jean-Paul Douzals

L'objectif de cet article est d'apporter des points de repère sur les moyens pouvant être mis en œuvre pour la caractérisation des sols dans un objectif d'agriculture de précision. Ce concept d'agriculture de précision<sup>1</sup> regroupe un ensemble de techniques destinées à raisonner les pratiques agricoles en fonction d'objectifs économiques de rentabilité, mais en tenant également compte de préoccupations environnementales. La modification des opérations culturales et en particulier la modulation des apports lors des épandages d'engrais, des traitements phytosanitaires et du semis, repose notamment sur la connaissance des hétérogénéités agronomiques du sol et des plantes. Cette connaissance nécessite une phase préalable de caractérisation et de localisation.

Le sol participe à l'établissement du rendement des cultures par sa capacité de réserve en eau et en éléments nutritifs, sa fonction de support physique des plantes (enracinement) et enfin par son rôle de portance et de support de traction des engins agricoles. Ainsi, l'établissement de cartes des sols révèle un premier niveau de variabilité, souvent d'origine géologique dépassant la taille de parcelles agricoles et conduisant à la définition de petites régions homogènes a priori. Des observations plus fines menées à l'échelle intraparcellaire font toutefois apparaître dans de nombreux cas une variabilité locale forte, jusqu'à présent peu prise en compte dans la conduite des cultures. Or, l'agriculture de précision repose sur un concept de caractérisation et d'optimisation des composantes du rendement agro-

économique local. Compte tenu du rôle agronomique du sol, la caractérisation de sa variabilité à l'échelle intraparcellaire représente un enjeu fondamental pour l'agriculture de précision.

Les paramètres d'importance pour la caractérisation de la variabilité des sols peuvent être classés en deux catégories :

- Les paramètres de composition, généralement cités dans les résultats d'une analyse de terre, que sont la composition physique, les teneurs en éléments fertilisants organiques et minéraux, l'humidité...
- Les paramètres de comportement (cohésion, plasticité, comportement hydrique...) qui correspondent à des phénomènes plus macroscopiques des paramètres du sol et sont généralement évalués en laboratoire.

La caractérisation de l'ensemble de ces paramètres requiert donc un échantillonnage préalable et la spatialisation de ces données nécessite un nombre important de mesures.

Les voies de recherche technologique présentées dans cet article concernent préférentiellement les mesures globales (*in situ* ou par télédétection) développées pour l'agriculture de précision et qui restent complémentaires des analyses physico-chimiques. Par exemple certaines techniques évoquées ici permettent d'évaluer globalement la variabilité de paramètres de composition conjugués au travers de la résistivité électrique ou de la réflectance. De même les mesures mécaniques *in situ* correspondent à une première approche d'évaluation des paramètres de comportement.

1. Cet article résulte des travaux présentés à Dijon les 29 et 30 mai 2000 au colloque « Agriculture de précision, avancées de la recherche technologique et industrielle », organisé par le Cemagref et l'Enesad. Les actes de ce colloque sont diffusés par Educagri Éditions.

**Jean-Paul Douzals**  
UMR Cemagref-Enesad  
Bd du Dr Petitjean,  
BP 87999  
21079 Dijon

## La caractérisation par prélèvement et analyse de terre

Historiquement la plus ancienne, cette méthode permet de donner une image locale de la composition physico-chimique des sols dans les couches superficielles.

Les informations recherchées sont généralement la structure, la texture, la granulométrie, l'humidité, la capacité d'échange en cations, le pH, la teneur en éléments fertilisants, la présence d'éléments traces et la teneur en matière organique.

Parmi ces paramètres, certains peuvent difficilement être corrigés (texture, structure...) à court terme, mais d'autres peuvent l'être par des amendements ou par la fertilisation. Dans ce cas, les analyses de terre sont utilisées pour établir des bilans de fertilisation (N, P, K), mettre en évidence des carences en éléments minéraux (Cu, Zn, Bo...) et effectuer des corrections de pH par exemple.

De nombreuses études sont menées pour évaluer la variabilité de la teneur en éléments fertilisants et minéraux. Dans la majorité des cas, il s'agit de mieux gérer localement les apports en ces éléments à partir d'un échantillonnage réalisé au champ.

Les mesures chimiques sont encore aujourd'hui difficilement réalisables en continu au champ. Cependant, en utilisant le principe d'un transistor à effet de champ muni d'une membrane sélective pour certains ions (ISFET<sup>2</sup>), (Viscarra Rossel et Mc Bratney, 1997) ont testé la validité de mesure du pH par des capteurs potentiométriques, en terme de gamme de mesure, sensibilité et temps de réponse, les principaux résultats sont présentés dans le tableau 1.

2. Ion Selective Field Effect Transistor.

3. Des travaux sont menés également sur la mesure directe de granulométrie par ultrasons (Scarlett *et al.*, 1997) ou par analyse d'image (Stafford et Ambler, 1990).

▼ Tableau 1 – Performances de différents types de capteurs de pH.  
(a) Les temps de réponse correspondent à des mesures effectuées sur une solution sol-eau (1:5 en masse). D'après Viscarra Rossel et Mc Bratney, 1997.

Caractéristiques	Électrode verre	Micro-électrode de verre	Électrode métallique	ISFET
Matériau	Verre	Verre	Antimoine	Silicium
Gamme de pH	0 – 12	0 – 12	2 – 11	0 – 14
Résolution (unité pH)	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>
Temps de réponse (a)	15 s	20 s	28 s	7 s

Dans le but d'automatiser les mesures (Birrel et Hummel, 1997) ont élaboré un capteur en continu de nitrates sur le principe de l'ISFET, couplé à un système permettant un échantillonnage à haute vitesse (jusqu'à 1,25 s par mesure).

De nombreux travaux concernent la détermination d'un maillage optimal en fonction des paramètres du sol étudiés (Chang *et al.*, 99 ; Geypens *et al.*, 1999). Un maillage de l'ordre de 20 m x 20 m constitue un support de recherche d'intérêt mais ne peut être transféré à l'ensemble d'un parcellaire où la densité d'analyse est couramment d'une analyse par parcelle en conduite classique.

Cependant, l'analyse de terre reste le plus sûr moyen de caractériser quantitativement un sol agricole. Dans le souci d'augmenter la productivité de la prise d'échantillons, des systèmes motorisés ont été développés à partir de motocycles tous terrains du type « quads », munis d'un dispositif de localisation GPS ou d'engins spécialement dédiés à cette application (Géochnide). Dans le même but, l'intégration de méthodes basées sur un « échantillonnage orienté », à partir de cartes de rendements notamment, permet dans certains cas de diminuer la densité d'échantillonnage.

Compte tenu des contraintes liées à l'échantillonnage (coût et temps), il peut être intéressant également de caractériser un sol agricole de manière plus qualitative. Les informations sur la variabilité permettront alors de délimiter des zones plus ou moins homogènes dans une parcelle. D'une manière générale, ces informations collectées sont reliées à la structure physique, la composition chimique ou l'humidité du sol et on peut distinguer trois grandes catégories de mesures<sup>3</sup> : les mesures de résistivité/conductivité apparente, les mesures basées sur la réflectance et les mesures mécaniques.

## Les mesures de résistivité/conductivité apparente

Issues de la géophysique, ces méthodes sont basées sur la mesure de la résistance électrique du sol, fortement liée à la nature du sol et à son humidité. Elles utilisent des techniques par contact (méthodes électriques) ou à faible distance (induction électromagnétique).

■ **Méthodes électriques**

La mesure de résistivité ( $\rho$ ) consiste à évaluer la résistance électrique du sol situé entre deux groupes d'électrodes. La conductivité ( $\chi$ ) est l'inverse de la résistivité, elle est donnée en Siemens.mètre<sup>-1</sup> et sa mesure est analogue à celle de la résistivité. Un courant électrique est imposé entre 2 électrodes (dites électrodes de courant), et 2 électrodes mesurent une tension (électrodes de potentiel), les 4 électrodes étant équidistantes deux à deux d'une valeur  $d$  (protocole IEEE standard 81-1983). La résistance électrique moyenne  $R$  à une profondeur égale à  $d$  est donnée selon la tension l'intensité et la distance  $d$  (équation 1) :

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot d = 2 \cdot \pi \cdot \frac{U}{I} \cdot d \quad \text{Équation 1}$$

avec :  $\rho$ , la résistivité en W.m ;  $d$ , la distance entre électrodes en mètre ;  $R$ , la résistance en Ohm ;  $U$ , la tension en volt et  $I$ , l'intensité en ampère.

La figure 1 montre le dispositif de mesure de la résistivité électrique apparente selon la technique du quadripôle. La profondeur investiguée est dans ce cas fonction de la distance  $d$  entre électrodes et un maillage des mesures sur la parcelle. Une autre technique consiste à effectuer une mesure en continu avec des électrodes roulant sur le sol. Par exemple, (Boydell *et al.*, 1999) ont testé un appareil permettant la mesure de résistivité en continu en utilisant des disques verticaux comme électrodes de mesure.

La mesure de résistivité permet de donner des indications qualitatives sur le type de sol ; la résistance est fonction de la texture, de la structure et de l'humidité du sol. La profondeur investiguée peut atteindre 30 m mais est limitée par la résistivité intrinsèque du sol.

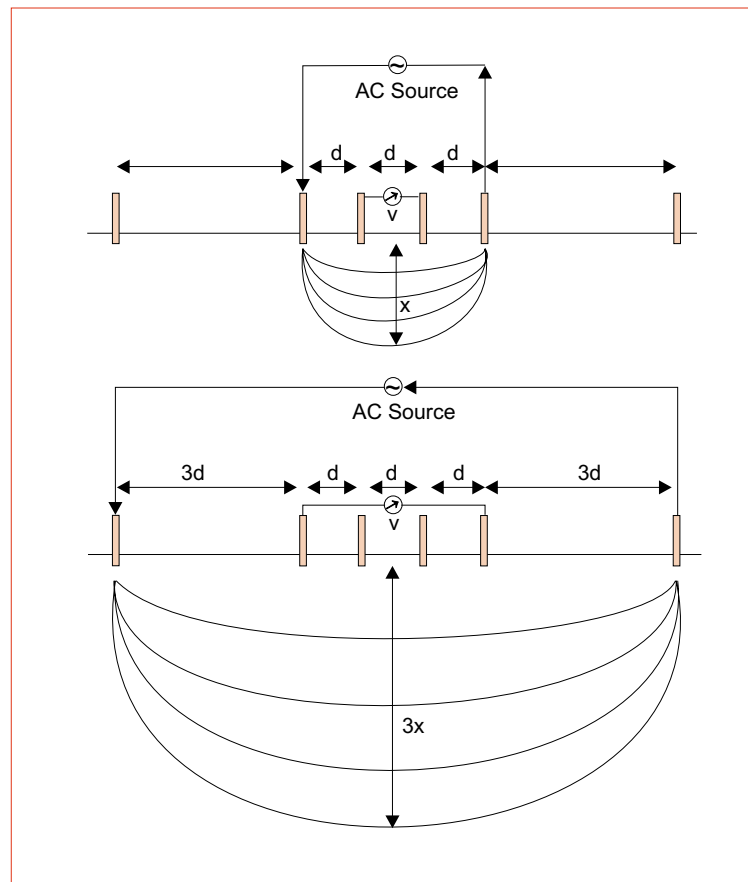
La mesure de résistivité peut être utilisée pour mesurer divers paramètres du sol (toutes choses égales par ailleurs) tels que la salinité (teneur en NaCl) (Podznyakova et Zhang, 1999), le taux d'argile (Lund *et al.*, 1999), la granulométrie, la densité apparente et l'humidité du sol. Elle peut être utilisée également pour caractériser les propriétés hydriques des sols saturés (Hilhorst et Balendonck, 1999).

■ **Mesures électromagnétiques**

La transmission d'un champ électromagnétique dans le sol est fortement corrélée à la résistivité apparente définie précédemment. Cette techni-

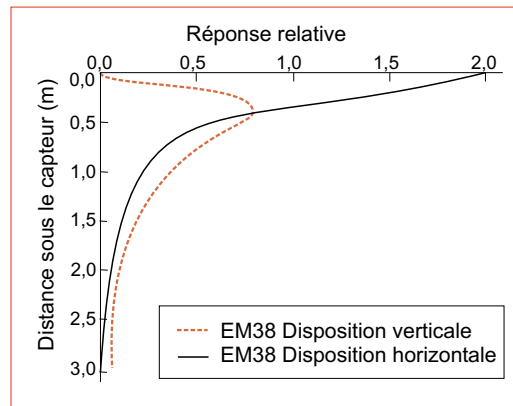
que utilise deux bobinages (inducteur et induit) qui peuvent être disposés verticalement ou horizontalement pour modifier la profondeur d'investigation comme montré par la figure 2 (p. 48). Sudduth *et al.* (1999) ont réalisé des mesures directes de la conductivité apparente du sol (Système VERIS 3100) simultanément à un procédé électromagnétique (GEONICS EM 38). Les résultats de ces deux méthodes sont comparables et ont donné une bonne indication de la teneur en eau et de la profondeur du sol.

Kachanovsky *et al.* (1988) ont montré que la variation spatiale de la teneur en eau des couches superficielles du sol était corrélée à la conductivité apparente mesurée avec une technique d'induction électromagnétique à distance.



▲ Figure 1 – Dispositif de mesure de la résistivité électrique apparente du sol par quadripôle. La distance entre électrodes de courant fait varier la profondeur d'investigation. D'après Boydell *et al.*, 1999.

► Figure 2 – Profondeur d'investigation en fonction de la disposition des bobines (horizontales ou verticales) d'un système de mesure de résistivité apparente du sol par induction électromagnétique. D'après Sudduth *et al.*, 1999.



### Les techniques basées sur la réflectance

On distingue couramment deux grands types de procédés<sup>4</sup> :

4. D'autres techniques telle l'émission infrarouge (radiométrie IR) permet par exemple de caractériser le réchauffement des sols. Comme dans le cas de la radiométrie, ces données sont le plus souvent non spatialisées.

5. Charge Coupled Device.

6. Radio Detecting And Ranging.

- Les dispositifs passifs correspondent au cas où le capteur (spectromètre, CCD<sup>5</sup>, capteur hyperfréquence) mesure la proportion de rayonnement réfléchi par le sol ou la culture lorsqu'ils sont éclairés par une source lumineuse naturelle ou artificielle. Cette méthode consiste par exemple à mesurer la réflectance dans le visible (400-700 nm) et/ou le proche infrarouge (700-1000 nm) en vue de donner des informations directes sur le taux de matière organique, l'humidité (sur sol nu) ou indirectes sur la teneur en azote du sol d'après la réflectance des végétaux présents sur le sol étudié.
- Les dispositifs actifs combinent la fonction d'émetteur et de récepteur d'ondes, dont le RADAR<sup>6</sup> est le système le plus répandu dans le domaine des hyperfréquences ( $10^{-4}$  à  $10^{-1}$  m).

#### ■ Les systèmes passifs

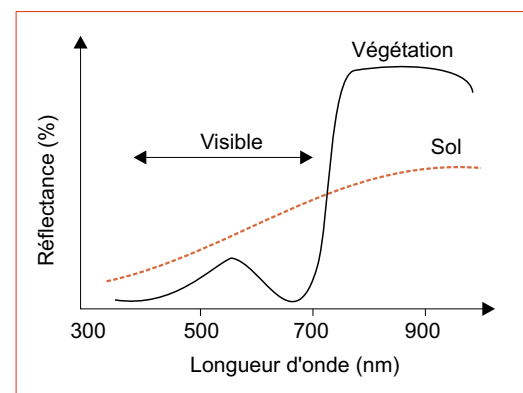
Les techniques mises en jeu sont utilisées dans la gamme de rayonnement électromagnétique correspondant au visible ou au proche IR.

- La spectrométrie utilise aujourd'hui des capteurs CCD en ligne qui mesurent le spectre de rayonnement réfléchi par le sol à partir d'une source lumineuse naturelle ou artificielle. Cette méthode permet de mettre en évidence des mo-

difications de réflectance dues à des compositions physico-chimiques, des teneurs en humus ou en eau différentes. Par exemple la figure 3 montre que le spectre de réflectance du sol et de plantes sont différents selon la longueur d'onde ; cette propriété sera notamment utilisée pour certaines techniques de discrimination entre le sol et les plantes. La résolution dépend de l'objectif utilisé, relié au faisceau de fibres optiques, et de la distance d'analyse. Le spectre obtenu comporte généralement les longueurs d'ondes du visible (Bleu-Vert-Rouge de 400 à 700 nm) qui sont souvent complétées par le proche infrarouge et l'infrarouge. Dans le cas de CCD au silicium, le spectre est limité à 1050 nm. Les inconvénients de cette méthode concernent le rayonnement incident qui doit être contrôlé, la lumière naturelle ou l'ensoleillement pouvant être soumis à des variations d'intensité et de nature. De plus, les spectres obtenus correspondent à une moyenne de réflectance, ce qui limite l'utilisation de cette technique à haute distance (télédétection). Enfin, les spectres obtenus n'étant pas spatialisés, des équipements complémentaires sont nécessaires pour intégrer les données dans une cartographie.

- L'analyse colorimétrique est basée sur le même principe mais utilise un capteur CCD matriciel muni de filtres souvent multispectraux (plusieurs gammes de longueurs d'ondes). Cette technique permet l'analyse d'images et leur spatialisation par intégration dans un SIG.

Le tableau 2 présente quelques applications de mesures de réflectance avec des systèmes passifs.



▲ Figure 3 – Spectres types de réflectance d'un sol nu et d'une végétation.

Niveau	Technique	Mesures
Proxidétection	Spectrométrie multispectrale	Mesure indirecte de la teneur en azote du sol
Aérien	Réflectance visible et infrarouge	Mesure indirecte de la teneur en azote du sol en profondeur
	Imagerie visible et infrarouge proche	Mesure indirecte de la balance hydrique
	Imagerie multispectrale	Matière organique
	Imagerie multispectrale	Mesure indirecte de la teneur en azote du sol.
Satellite	Imagerie multispectrale	Matière organique

▲ Tableau 2 – Applications de la mesure de réflectance à l'étude de la variabilité agronomique des sols. Les mesures indirectes (teneur en azote et humidité du sol) concernent des mesures réalisées sur les cultures et corrélées ensuite grâce à des prélèvements ou à des mesures *in situ*.

### ■ Les systèmes actifs

Il s'agit d'évaluer la réponse à un train d'ondes électromagnétiques envoyé dans le sol par un émetteur. La réflexion des ondes électromagnétiques est notamment sensible à un changement de structure du sol et à la présence d'obstacles en profondeur (nappe phréatique, roche...). L'intérêt d'utiliser des ondes hyperfréquence réside dans leur faible sensibilité aux conditions atmosphériques comparé aux techniques basées sur la réflectance. Il est ainsi possible de réaliser des images RADAR, soit issues de mesures à faible distance, soit provenant de satellites (type ERS, JERS ou Radarsat) qui analysent la réflectance en hyperfréquence sur des distances au sol allant de 50 à 170 km selon les systèmes.

Les capteurs équipant ces satellites utilisent la technique des RADAR à Ouverture Synthétique (ROS) qui permet de mettre en évidence l'humidité et/ou la rugosité de surface (Moran *et al.*, 1999).

Le tableau 3 présente les différentes gammes spectrales et leurs caractéristiques.

Les techniques RADAR à Ouverture Réelle (ROR) peuvent être utilisées à proximité du sol pour caractériser le lit de semence à travers la rugosité de surface (Rouveure et Marionneau, 2000), par exemple.

### Les méthodes mécaniques

Différentes méthodes mécaniques permettent d'évaluer la variabilité intraparcellaire d'un sol agricole. Souvent basées sur des techniques ou des capteurs existants, elles trouvent un nouvel essor en agriculture de précision. Ces techniques tendent à évaluer, soit la résistance verticale du sol par pénétrométrie, soit la résistance opposée aux outils par le sol.

La mesure de pénétration correspond à une mesure physique couramment réalisée sur les sols agricoles. La pénétration varie en fonction de

Bande spectrale	Longueur d'onde	Fréquence	Intérêt des ROS en agriculture
X	~ 3 cm	~ 10 GHz	<b>Faibles longueurs d'ondes</b> : couverture végétale, biomasse. <b>Longueurs d'ondes plus importantes</b> (1-5 cm) : humidité de surface du sol, végétation. <b>Toutes les longueurs d'ondes</b> sont sensibles à la rugosité de surface et à la topographie.
C	~ 6 cm	~ 5 GHz	
L	~ 24 cm	~ 1,25 GHz	
P	~ 70 cm	~ 0,43 GHz	

◀ Tableau 3 – Spécifications et utilisations des principales longueurs d'ondes des Radars à Ouverture Synthétique (ROS) en agriculture. D'après (Moran *et al.*, 1999).



la texture, de l'humidité et de la densité apparente du sol. Domsch et Wendroth (1997) ont réalisé des mesures de densité apparente par pénétrométrie et ont utilisé l'analyse spectrale (densité spectrale) pour mettre en évidence la périodicité de zones plus compactes correspondant aux passages de roues.

Dans l'éventualité du développement des mesures pénétrométriques, Clark *et al.* (1999) ont conçu un appareil permettant un nombre important de mesures avec un pénétromètre automatisé embarqué.

Une deuxième voie consiste à enregistrer et localiser les signaux de capteurs d'effort présents sur la majorité des tracteurs agricoles ou équipant des outils de travail du sol. La mesure de l'effort de traction permet de dresser une carte de la variabilité intraparcellaire et d'aboutir à la définition des zones homogènes. Certains outils de caractérisation physique fonctionnent à faible profondeur (30cm) (Lui *et al.*, 1996) ou à profondeur plus importante (50 cm) (Chen *et al.*, 1997).

## Conclusion et perspectives

La caractérisation de la variabilité des sols est une étape importante dans le processus d'agriculture de précision. Faisant appel à différentes compétences (géologie, pédologie, géophysique, imagerie, traitement du signal, agronomie), la caractérisation de la variabilité des sols reste un vaste domaine de recherche. Les techniques basées sur l'échantillonnage donnent les résultats les plus complets mais nécessitent un investissement important en temps et en coût d'analyse. Des outils sont ainsi développés en vue d'automatiser et d'améliorer la productivité de la prise d'échantillons. De manière complémentaire, les techniques de caractérisation du sol par mesure de résistivité, de réflectance ou par voie mécanique donnent une information plus rapide mais plus macroscopique de la variabilité intraparcellaire. Ces données s'avèrent cependant très utiles pour une investigation localisée ultérieure. En ce sens, les techniques permettant l'acquisition de données au cours du travail sur la parcelle sont donc particulièrement intéressantes. □

### Résumé

Le sol, composante majeure du rendement des cultures, peut présenter une variabilité spatiale et temporelle importante. Ce document présente différentes méthodes de caractérisation utilisables dans un objectif d'agriculture de précision. La caractérisation quantitative basée sur les prélèvements donne une image précise de la composition physico-chimique des sols. Des méthodes de caractérisation qualitative des sols basées sur des mesures de résistivité, de réflectance ou des mesures mécaniques permettent d'obtenir des informations complémentaires et de réduire la densité d'échantillonnage.

### Abstract

Soil is generally considered to have a major effect on crop yield and may be subjected to spatial and temporal variability. This paper introduces different methods involved in soil characterization in the field of precision agriculture. Quantitative methods based on soil sampling give information about physical and chemical composition of soils. On the other hand, qualitative methods of soil characterization give complementary information by using electrical resistivity measurements, reflectivity or mechanical measurements. These last methods allow to reduce soil sampling density.

### Bibliographie

- BIRREL, S.J., HUMMEL, J.W., 1997, Multi-sensor ISFET system for soil analysis, in: *Precision Agriculture 97*, STAFFORD J.V. Ed., BIOS Scientific Publisher, Oxford, UK, p. 459-468.
- BLACKMOORE, S., GODWIN, R.J., TAYLOR, J.C., COSSER, N.D., WOOD, G.A., EARL, R., KNIGHT, S., 1999. Understanding variability in four fields in the United Kingdom, in: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture*, ROBERT P.C., RUST R.H., LARSON W.E. Ed., ASA, CSSA, SSSA Publishers, Madison, WI, USA, p. 3-17.
- BOYDELL, B., Mc BRATNEY, A., WHELAN, B., BUDIMAN, B., 1999, *Preliminary results with the Veris soil electrical conductivity instrument*, Internal Scientific Report, Sydney University, AUS, 8 p.  
www.usyd.edu.au/su/agric/electricalconductivityinstrument.html.
- CHANG, J., CLAY, D.E., CARLSON, C.G., MALO, D., CLAY, S.A., 1999. Precision farming protocols: Part 1, Grid distance and soil nutrient impact on the reproductibility of spatial variability measurements. *Precision Agriculture*, 1, p. 277-289.
- CHEN, J.-N., COQUILLE, J.-C., DOUZALS, J.-P., SABRE, R., ANDREUX, F., 1997. Frequency composition of traction and tillage forces on a mole plough. *Soil and Tillage Research*, 44, p. 67-79.
- CLARK, R.L., 1999, Soil strength variability within fields, in: *Precision Agriculture 99*, J.V. STAFFORD Ed., SCI, Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, p. 201-210.
- DIKER, K., BAUSCH, W.C., 1999. Mapping in-season soil nitrogen variability assessed through remote sensing, in: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture*, ROBERT P.C., RUST R.H., LARSON W.E. Ed., ASA, CSSA, SSSA Publishers, Madison, WI, USA, p. 1445-1455.
- DOUZALS, J.-P., 2000. Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision, Agriculture de précision. *Actes du colloque UMR Cemagref – Enesad, Dijon 29-30 Mai 2000*, Éducagri Éditions, p. 287-295.
- FRANZEN, D.W., REITMEIER, L., GILES, J.F., CATTANACH, A.C. 1999. Aerial photography and satellite imagery to detect deep soil nitrogen levels in potato and sugarbeet, in: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference in Precision Agriculture*, ROBERT P.C., RUST R.H., LARSON W.E. Ed., ASA, CSSA, SSSA Publishers, Madison, WI, USA, p. 281-290.
- GUEYPENS, M., VANONGEVAL, L., VOGEL, N., MEYKENS, J., 1999. Spatial variability of agricultural soil fertility parameters in a Gleyic Podzol of Belgium. *Precision Agriculture*, 1, p. 319-326.
- HILHORST M.A.; BALENDONCK J., 1999, A pore water conductivity sensor to facilitate non-invasive soil water content measurements, in: *Precision Agriculture 99*, STAFFORD J.V. Ed., SCI, Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, p. 211-222.
- LUI, W., UPADHYAYA, S.K., KATAOKA, T., SHIBUSAWA, S., 1996. Development of a texture/soil compaction sensor, in: *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international conference on precision agriculture*. ROBERT P., Ed. ASA, CSSA, SSSA Publishers, Madison, WI, USA, p. 617-630.
- LUND, E.D., CHRISTY, C.D., DRUMMOND, P.E., 1999. Practical applications of soil electrical conductivity mapping, in *Precision Agriculture 99*, STAFFORD J.V. Ed., SCI, Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, p. 771-780.
- MORAN, M.S., HYMER, D.C., QI, J., KERR, Y., 1999. Radar imagery for precision crop and soil management, in: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference in Precision Agriculture*, ROBERT P.C., RUST R.H., LARSON W.E. Ed., ASA, CSSA, SSSA Publishers, Madison, WI, USA, p. 1423-1434.
- MULLA, D.J., BHATTI, A.U., 1997, An evaluation of indicator properties affecting spatial patterns in N and P requirements for winter wheat yield, in *Precision Agriculture 97*, STAFFORD J.V. Ed., BIOS Scientific Publisher, Oxford, UK, p. 145-153.
- POZDNYAKOVA, L., ZHANG, R., 1999. Estimating spatial variability of soil salinity using geostatistical methods, in: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture*, ROBERT P.C., RUST R.H., LARSON W.E., Ed., ASA, CSSA, SSSA Publishers, Madison, WI, USA, p. 79-89.

ROUVEURE, R., MARIONNEAU, A., 2000. Réglage automatique des outils agricoles : préparation du lit de semence. *PHM – Revue horticole*, 410, p. 21-23.

SCARLETT, A.J., LOWE, J.C., SEMPLE, D.A., 1997, Precision Tillage: In-field, Real-Time control of Seedbed Quality, in: *Precision Agriculture 97*, STAFFORD J.V. Ed., BIOS Scientific Publisher, Oxford, UK, p. 503-510.

STAFFORD, J.V., AMBLER, B., 1990. Computer vision as sensing system for soil cultivator control, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (C419/041)*, p. 123-129.

SUDDUTH, K.A., KITCHEN, N.R., DRUMMOND, S.T., 1999. Soil conductivity sensing on claypan soils: comparison of electromagnetic induction and direct methods, in: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture*, ROBERT P.C., RUST R.H., LARSON W.E. Ed., ASA, CSSA, SSSA Publishers, Madison, WI, USA, p. 979-990.

THOMSEN, A., SCHELDE, K., HEIDMANN, T., HOUGAARD, H., 1997, Mapping of field variability in crop development and water balance within a field with highly variable soil conditions, in: *Precision Agriculture '97*, STAFFORD J.V. Ed., BIOS Scientific Publisher, Oxford, UK, p. 189-196.

VARVEL, G.E., SCHLEMMER, M.R., SCHEPERS, J.S., 1999. Relationship between spectral data from aerial image and soil organic matter and phosphorus levels. *Precision Agriculture*, 1, p. 291-300.

VISCARRA ROSSEL, R.A., Mc BRATNEY, A.B., 1997, Preliminary experiments towards the evaluation of suitable soil sensor for continuous, « on-the-go » field pH measurements, in: *Precision Agriculture 97*, STAFFORD J.V. Ed., BIOS Scientific Publisher, Oxford, UK, p. 493-501.