

Méthodes dynamiques de caractérisation physique des sols agricoles à l'échelle de la parcelle

Raphaël Rouveure ^a, Anicet Marionneau ^b, Myriam Chanet ^a, Marie-Odile Monod ^a

Le sol considéré comme le support des plantes joue un rôle essentiel dans la nutrition hydrique et minérale des végétaux¹. Ce rôle, favorisé ou non par l'action du climat et de l'homme, est lié en partie à sa texture et à sa structure. Si la texture du sol évolue très lentement, il n'en est pas de même pour la structure qui peut se transformer rapidement. Il est donc important de pouvoir apprécier l'état de cette structure en continu à l'intérieur d'une même parcelle, car elle est le révélateur des différentes contraintes subies par le sol. Son état conditionne à la fois la circulation interne de l'eau, de l'air et de la chaleur, permettant ainsi le développement des racines et la circulation des éléments fertilisants. Cet état est également déterminant vis-à-vis de la capacité du sol à absorber les fortes pluies qui induisent des phénomènes d'érosion, de transport d'éléments fertilisants ou phytosanitaires vers les cours d'eau, ainsi que des phénomènes d'inondation ou de glissement de terrain (Bruand, 2002).

Une meilleure connaissance des caractéristiques du sol doit conduire à optimiser les interventions réalisées lors de diverses opérations culturales : préparation du lit de semence, fertilisation, traitements phytosanitaires ou irrigation. Cette connaissance s'avère par ailleurs déterminante pour évaluer et diagnostiquer les conséquences des activités agricoles sur les milieux naturels : suivi de la migration de l'eau qui entraîne les éléments nutritifs en suspension et les particules actives des produits phytosanitaires ; évaluation des conséquences du compactage des sols ; compréhension

des phénomènes d'érosion (Chaplot, 2003 ; Richard, 2001). Par exemple dans le cas d'un sol compacté, la densité apparente augmente et se traduit par une diminution de la perméabilité à l'eau : le risque de voir apparaître un régime de circulation horizontal de l'eau augmente, avec à terme un accroissement du risque d'érosion.

Les travaux de recherche que nous présentons ici concernent le développement de méthodes de caractérisation physique des sols agricoles à l'échelle de la parcelle, dans le but de produire des données quantitatives concernant l'état de ces sols (humidité, rugosité, densité). Les informations recueillies seront destinées à alimenter des bases de données référencées géographiquement, mettant à disposition de l'agriculteur des cartographies de l'état des sols des parcelles de l'exploitation. Il aura ainsi la possibilité d'appliquer, lors des différentes opérations culturales, une modulation adaptée. Ces informations pourront par ailleurs fournir des indicateurs pour évaluer et suivre les conséquences des activités agricoles sur l'environnement (Ecrin, 2003). Dans cet article, nous présentons deux méthodes de caractérisation des sols : une méthode électromagnétique et une méthode mécanique. Ces deux méthodes réalisent une mesure indirecte de paramètres du sol, et l'interprétation des données au sens de ces paramètres du sol (on parle de résolution du problème inverse) demeure aujourd'hui un problème complexe (Chen, 2001 ; Rouveure, 2003). La fusion des données issues des différents capteurs est une des pistes poursuivies pour aider à l'exploitation des mesures. Ces deux approches

1. On attribue 5 grandes fonctions au sol : la production agricole et forestière ; la protection d'autres ressources naturelles comme l'eau et l'air ; le maintien de la biodiversité ; la prévention des risques naturels ; la production d'aménités positives (attrait du territoire).

Les contacts

Cemagref, UR Technologies, systèmes d'information et procédés pour l'agriculture et l'agroalimentaire
a. BP 50085, 24, avenue des Landais, 63172 Aubière Cedex
b. Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre

2. INRA Avignon :
équipe « Climat, sol
et environnement ».
INRA Laon : équipe
« Agronomie ».

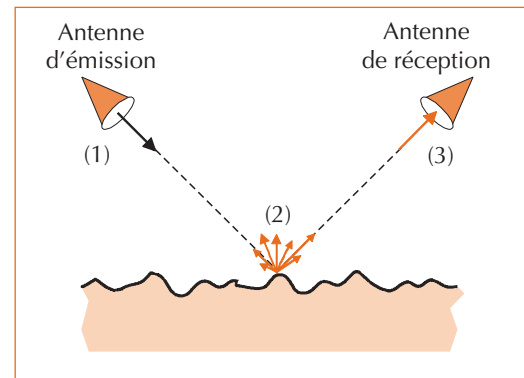
ont un point commun : elles sont embarquées sur un engin mobile et permettent de réaliser une cartographie « en continu » de la parcelle, libérant ainsi l'opérateur de fastidieuses opérations de prélèvements et d'échantillonnage. Ces travaux sont pour partie poursuivis en collaboration avec l'INRA d'Avignon et de Laon² dans le cadre d'une action scientifique structurante « Gestion spatialisée des agrosystèmes ».

La première méthode fait appel à l'utilisation des ondes électromagnétiques, grâce à la conception par le Cemagref d'un radar hyperfréquence embarqué (Rouveure, 2002). Les caractéristiques de l'onde rétrodiffusée sont analysées et mises en relation avec des paramètres biophysiques pertinents pour les opérations culturales, telle que la rugosité de surface pour la préparation d'un lit de semence. Nous exposons les résultats obtenus à l'issue de la phase de validation du capteur radar en laboratoire. Un aperçu des travaux de modélisation des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques dans les sols hétérogènes (Perov, 2000) sera également donné. Ils constituent une étape incontournable dans le processus de conception de nouveaux capteurs de terrain embarqués.

La seconde méthode a pour objectif de caractériser les phénomènes de compaction ou les hétérogénéités de structure au sein d'une parcelle agricole. Nous présentons l'outil de cartographie de dureté du sol (OCDS), un dispositif de mesure d'effort dynamique original qui a été mis au point au Cemagref. Nous détaillons également quelques résultats montrant les effets de compaction provoqués par les pneumatiques des machines agricoles ainsi que les évolutions de structures sous l'effet des agents climatiques ou des techniques culturales. Cette méthode offre l'avantage de réaliser des cartographies par couches du sol pouvant atteindre une profondeur de plusieurs dizaines de centimètres.

La caractérisation des sols par capteur radar hyperfréquence embarqué

Le principe d'une mesure radar est présenté sur la figure 1. Une onde électromagnétique est envoyée en direction du sol grâce à une antenne d'émission. Cette onde est rétrodiffusée par le sol puis captée par l'antenne de réception. Si la même antenne est utilisée à l'émission et à la réception, on parle de radar monostatique.



▲ Figure 1 – Principe d'une mesure radar.

- (1) Émission d'une onde électromagnétique en direction du sol.
- (2) Réflexion sur le sol.
- (3) Réception de l'onde rétrodiffusée.

Le radar est un capteur actif défini par un certain nombre de paramètres :

- la puissance d'émission, qui fixe la portée maximale ;
- la longueur d'onde ou fréquence du signal émis, qui va avoir une influence sur la profondeur de pénétration de l'onde dans le sol ;
- l'angle d'incidence par rapport au sol ;
- la polarisation, qui caractérise la direction du champ électrique toujours dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Elle peut être linéaire, circulaire ou elliptique.

Après réflexion sur le sol et si le radar est monostatique, la puissance P_r du signal reçu est régie par l'équation du radar (Barton, 1988), qui s'écrit :

$$P_r = \frac{P_e G^2 \sigma \lambda^2}{(4 \pi)^3 R^4} \quad (1)$$

où P_e est la puissance émise, G le gain de l'antenne, λ la longueur d'onde du signal émis, R la distance radar-sol et σ la surface équivalente radar de la cible, ici le sol. La surface équivalente radar σ caractérise la faculté qu'a la cible de capter l'onde incidente. Pour une même cible, elle dépend de la polarisation, de la fréquence de l'onde et de l'orientation. C'est une quantité indépendante de la distance R , et son évaluation permet d'obtenir des informations sur la nature de la cible. En effet lorsque les paramètres du radar sont fixés et si la distance R ne change pas, l'équation du radar montre que la puissance

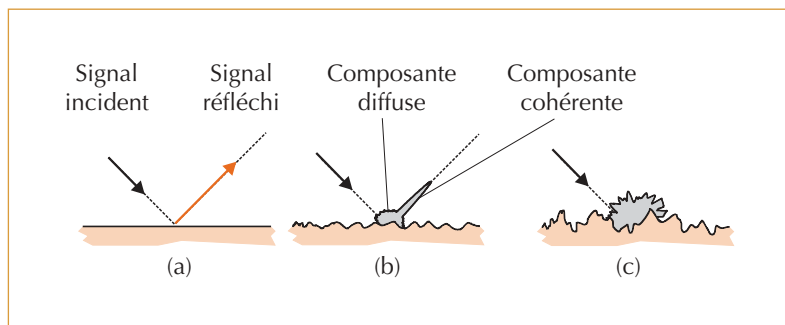
reçue après rétrodiffusion dépend uniquement de la nature de la cible, c'est-à-dire du sol. De nombreux paramètres interviennent dans le phénomène de rétrodiffusion (Ulaby, 1982). Ces paramètres peuvent être séparés en deux grandes classes : les paramètres *géométriques* comme la forme ou l'état de surface ; les paramètres *diélectriques* liés à la nature du sol comme l'humidité ou la conductivité par exemple.

Les figures 2 et 3 illustrent ce point. On observe sur la figure 2, l'influence d'une variation d'état de surface sur la réflectivité des ondes radar : lorsque la rugosité augmente, la composante cohérente du signal réfléchi dans la direction spéculaire diminue, au profit de la composante diffuse émise dans toutes les directions (Ogilvy, 1991).

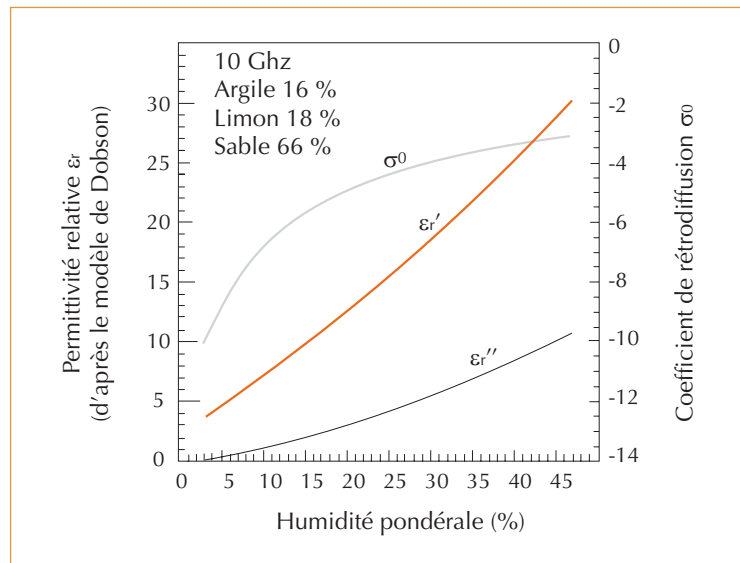
L'influence des propriétés diélectriques sur le phénomène de rétrodiffusion est illustrée sur la figure 3. Cette simulation est calculée pour une fréquence d'émission de 10 GHz, en considérant un angle d'incidence normal et un sol homogène lisse dont l'humidité pondérale évolue de 2,5 à 45 %. Les variations de permittivité du sol introduites par les variations d'humidité sont estimées à l'aide du modèle empirique de Dobson (Dobson, 1985) : on observe (courbes rouge et noire) que l'augmentation de l'humidité se traduit par un accroissement de la permittivité. Dans cette configuration de mesure, l'amplitude du champ réfléchi est donné par les lois de Snell appliquées aux équations de Maxwell (Jackson, 1999) :

$$\frac{E_0^r}{E_0^i} = \frac{\sqrt{\epsilon_r'} - 1}{\sqrt{\epsilon_r'} + 1} \quad (2)$$

avec E_0^i et E_0^r amplitude du champ incident et réfléchi (respectivement), et $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ permittivité relative du sol.



◀ Figure 2 – Influence de l'état de surface sur la réflexion des ondes radar.
(a) Réflexion spéculaire dans le cas d'un sol lisse : l'onde réfléchie est entièrement cohérente.
(b) Apparition d'une composante diffuse lorsque la rugosité augmente et diminution de la composante cohérente.
(c) Le signal réfléchi est entièrement diffus lorsque le sol est fortement rugueux.



▲ Figure 3 – Influence des propriétés diélectriques sur la réflexion des ondes radar : simulation de la réflexion sur un sol homogène lisse à incidence normale.

Sur cette même figure, on constate que l'augmentation de la permittivité se traduit par une augmentation significative de champ réfléchi ce qui se traduit dans une augmentation du coefficient de rétrodiffusion³ (courbe grise, exprimée en dB).

L'évaluation d'un paramètre physique du sol à partir des données radar impose donc de prendre en compte l'ensemble des propriétés du sol (géométriques et diélectriques). Nous nous proposons d'aborder ce problème en combinant modélisation numérique et approche expérimentale basée sur des mesures de terrain. L'approche expérimentale est décrite dans les deux paragraphes suivants. Les travaux poursuivis dans le domaine de la modélisation des interactions ondes électromagnétiques-sol seront développés dans le paragraphe « Les travaux de modélisation » pages 13 à 15.

3. Le coefficient de rétrodiffusion est utilisé pour les cibles non ponctuelles : c'est une mesure de la surface équivalente radar exprimée par unité de surface.

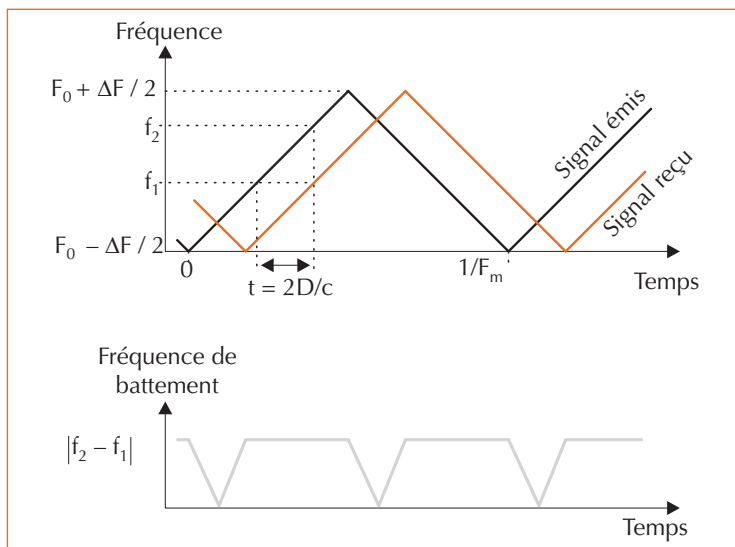
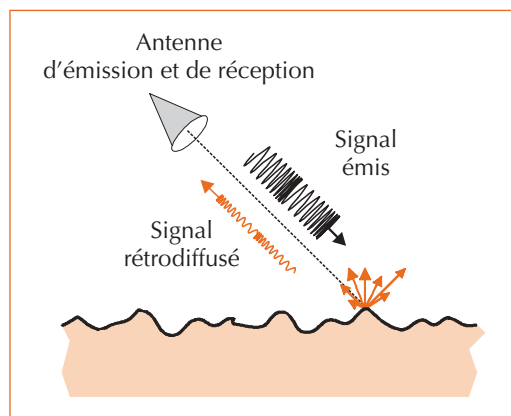
Le choix d'une architecture radar

Dans un radar classique à impulsions, c'est la mesure du temps de parcours t d'une impulsion de courte durée entre le radar et la cible qui fournit la mesure de distance. Sur de courtes distances (typiquement de l'ordre du mètre dans nos applications), ce temps de parcours est extrêmement bref, par exemple 6,6 ns pour une cible située à 1 mètre. L'électronique associée doit donc être cadencée à plusieurs centaines de MHz, sa réalisation est délicate et donc onéreuse.

4. FMCW : Frequency Modulated Continuous Wave.

Pour cette raison, nous avons adopté un principe différent : celui du *radar continu à modulation de fréquence* (Skolnik, 1980), ou radar FMCW⁴,

► Figure 4 – Principe du radar FMCW : émission continue d'une onde modulée en fréquence. Cas d'un radar monostatique.



▲ Figure 5 – Exemple de la modulation linéaire en triangle pour un radar FMCW en présence d'une seule cible (en haut). Évolution de la fréquence de battement correspondante (en bas).

qui consiste à émettre une onde continue que l'on module en fréquence selon une loi donnée (figure 4). Il cumule :

- les avantages du radar continu sur le radar à impulsion, c'est-à-dire une faible puissance d'émission (la puissance moyenne fixant la portée, la puissance crête est comparativement beaucoup plus élevée pour un radar à impulsions). La technologie associée est moins coûteuse et la sécurité de l'utilisateur est accrue ;

- les avantages de la modulation de fréquence, qui transpose dans le domaine fréquentiel les variables temporelles. Une faible variation de temps se traduit par une grande variation de fréquence, qui devient plus facile à mesurer.

Le principe du radar FMCW est le suivant : si une cible se trouve à la distance R , le signal émis à la fréquence f_1 revient au radar avec un retard $t = 2R/c$, avec c vitesse de la lumière, à l'instant où le radar émet la fréquence f_2 . Le radar FMCW permet d'isoler le signal de fréquence $f_1 - f_2$, appelé signal de battement. Dans la pratique, la fréquence évolue dans une plage ΔF autour d'une fréquence centrale F_0 . La loi de modulation est généralement une fonction linéaire, de type dent de scie ou triangle comme présenté sur la figure 5.

Dans le cas d'une modulation en triangle, le signal de battement S_b peut se mettre sous la forme (Monod, 1995) :

$$S_b = A \cos(2 \pi F_b t + \varphi_b) \quad (3)$$

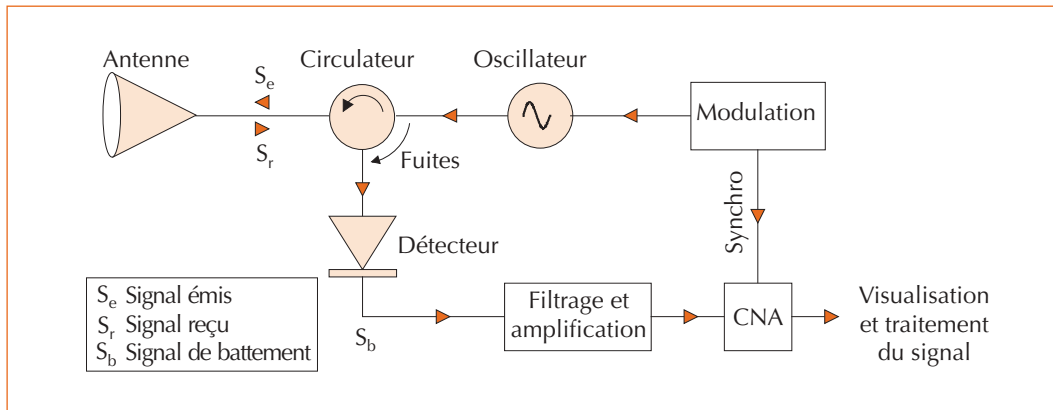
avec A amplitude, F_b fréquence et φ_b phase à l'origine du signal de battement. On montre notamment que la fréquence F_b est proportionnelle à la distance D , et que l'amplitude A est proportionnelle à l'amplitude du signal reçu.

L'architecture du radar développé est présentée sur la figure 6. L'un des intérêts de ce radar est de réaliser une transposition directe du signal d'émission haute fréquence vers un signal de battement basse fréquence, autorisant la mise en œuvre de chaînes d'acquisition et de traitement classiques.

Les expérimentations mises en œuvre

EXPÉRIMENTATIONS EN CHAMBRE ANÉCHOÏDE

Le développement des activités hyperfréquences nécessite une infrastructure et l'acqui-



◀ Figure 6 – Architecture du radar FMCW du Cemagref. Les éléments grisés correspondent aux composants haute fréquence de cette architecture.

tion d'équipements scientifiques spécifiques (analyseur de spectre, mesureurs de champ, etc.). Une chambre anéchoïde⁵, comportant un blindage électromagnétique recouvert d'une couche de mousses de carbone absorbantes, a été construite en 1999. Ses dimensions (5 m × 4 m × 3 m) permettent de disposer d'un environnement maîtrisé et protégé dans la bande de fréquences 1 GHz – 40 GHz. Le rôle de cette structure est double :

– *protection contre les perturbations extérieures*. C'est la faradisation, blindage qui limite la pénétration dans la chambre des ondes électromagnétiques générées par les émetteurs extérieurs (radio, télévision, téléphones portables, etc.) ;

– *élimination des réflexions parasites, des parcours multiples*. C'est le rôle des absorbants qui recouvrent la totalité de l'intérieur de la structure. Il s'agit ici de reproduire autant que faire se peut les conditions dites de champ libre.

Un portique mobile piloté électriquement a également été installé, avec quatre degrés de liberté pour le contrôle de l'attitude du radar (angle d'incidence, hauteur). En disposant des bacs d'échantillons sur le sol de la chambre, ce portique autorise des simulations de déplacement sur un terrain.

Les expérimentations réalisées en chambre anéchoïde ont deux principaux objectifs. Il s'agit d'une part d'effectuer *l'étalonnage des systèmes hyperfréquences* que nous développons. Cette phase passe par la réalisation de séries de mesures sur cibles canoniques, c'est-à-dire des cibles dont on connaît le comportement radar théorique⁶. Sur la figure 7 (page 12) sont comparées les surfaces équivalentes radar σ théoriques et expérimentales dans le cas de plaques métalliques rectangulaires.

Pour ce type de réflecteur, σ se met sous la forme (Barton, 1988) :

$$\sigma = 4 \pi \frac{S^2}{\lambda^2} \quad (4)$$

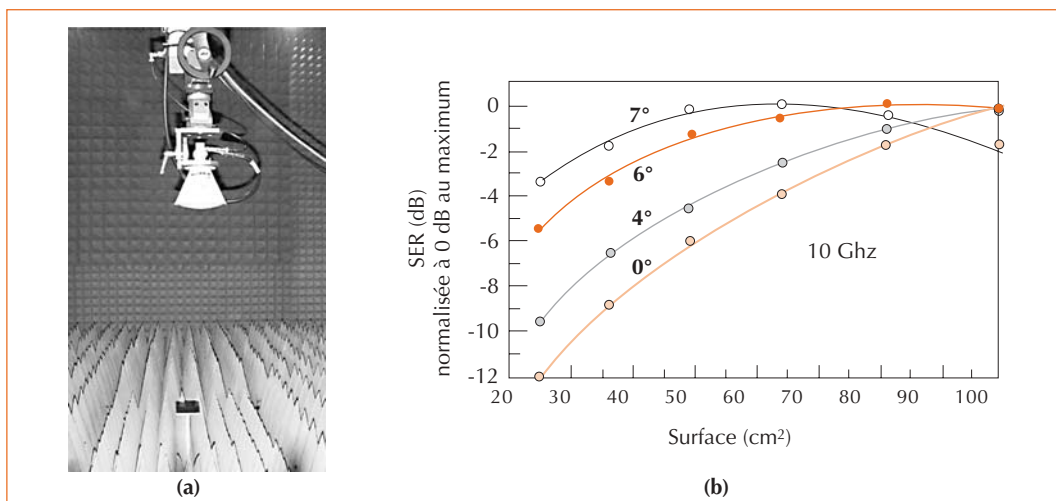
avec S surface de la cible et λ longueur d'onde du signal hyperfréquence. Les mesures sont effectuées à une fréquence de 10 GHz, et les comparaisons sont réalisées pour des cibles de différentes dimensions et pour plusieurs angles d'incidence.

Le second intérêt d'une chambre anéchoïde est de pouvoir réaliser des *mesures sur des cibles naturelles « contrôlées »*. Il s'agit ici d'utiliser des échantillons que l'on va rencontrer sur le terrain, tout en essayant de maîtriser le maximum de paramètres (pour un sol, il s'agira par exemple de faire varier son état de surface en maintenant une humidité constante). Cette étape est importante pour permettre de prévoir les résultats que l'on va rencontrer sur le terrain. La figure 8 (page 12) présente les résultats obtenus avec des échantillons de terre agricole. Ces échantillons ont été séchés afin de maîtriser le paramètre humidité, et un tri à l'aide de tamis a permis d'isoler sept classes de granulométrie, utilisées pour générer différents états de surface. Les données radar (mesurées à 10 GHz) sont exprimées sous la forme d'un coefficient de rétrodiffusion. Elles sont réalisées à incidence normale, ce qui signifie que le radar détecte la composante spéculaire du signal rétrodiffusé. Le niveau le plus élevé est obtenu pour la rugosité la plus faible, c'est-à-dire lorsque la composante cohérente du signal rétrodiffusé (émise dans la direction spéculaire à incidence normale) est maximale. Lorsque la rugosité croît, la composante diffuse du signal rétrodiffusé augmente au détriment de la composante cohérente,

5. Une chambre anéchoïde permet l'étude et la mesure des émissions électromagnétiques d'un système en l'isolant de toutes autres sources électromagnétiques environnantes.

6. Les cibles canoniques les plus connues sont des réflecteurs métalliques, de type plaque, dièdre ou trièdre. On peut également utiliser des cibles plus complexes comme des lentilles de Luneberg.

► Figure 7 – Étalonnage sur cible canonique. (a) Vue générale du radar positionné sur le portique mobile et de la cible utilisée, ici un réflecteur plan métallique. (b) Comparaison entre réponses théorique (trait plein) et expérimentale (marqueur) pour des cibles de différentes dimensions et pour différents angles d'incidence.



ce que traduit la décroissance du signal détecté par le radar (Rouveure, 2001).

LES EXPÉRIMENTATIONS SUR PARCELLE RÉELLE

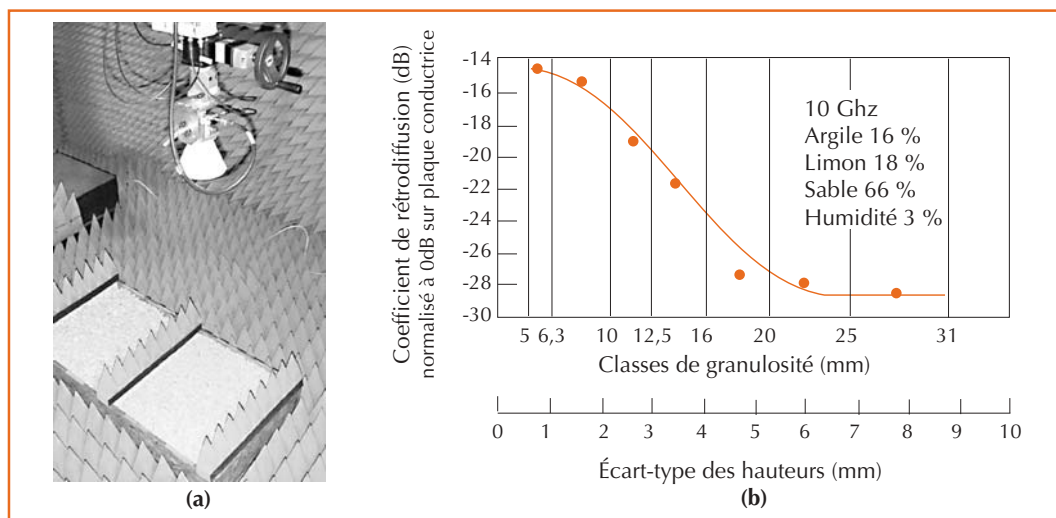
Les travaux présentés ici ont été développés dans le cadre de l'action scientifique structurante « Gestion spatialisée des agrosystèmes », en collaboration avec l'équipe *Climat, sol et environnement* de l'INRA d'Avignon. L'objectif de cette expérimentation était de comparer différents moyens de mesure :

- moyens terrestres, avec notamment le radar FMCW du Cemagref,
- moyens aéroportés, avec le radar RAMSES de l'ONERA embarqué à bord d'un avion.

Les mesures à l'aide du radar FMCW hyperfréquence ont été réalisées sur une parcelle comportant des placettes de différentes rugosités (repérées R1 à R4) et sur une parcelle de blé. Les états de surface des placettes R1 à R4 ont été qualifiés à l'aide d'un rugosimètre à aiguilles.

L'électronique d'émission, de réception, d'amplification/filtrage et d'acquisition des signaux radar a été réalisée à l'aide d'équipements de laboratoire et implantée sur un petit engin mobile agricole (figure 9). Ce véhicule est muni d'un récepteur GPS cinématique qui autorise un positionnement centimétrique des données acquises. L'antenne du radar est placée au bout d'un portique fixé sur le toit du véhicule (hauteur 2 m). Cette antenne est pointée dans un

► Figure 8 – Mesure sur échantillon de sol. (a) Vue générale du radar et de la cible utilisée, ici un échantillon de terre agricole. (b) Coefficient de rétrodiffusion pour des cibles de différents états de surface. La courbe en trait plein est une approximation sinusoïdale des mesures (marqueur).





◀ Figure 9 – Implantation du système de mesure hyperfréquence sur un engin mobile. L'antenne du radar se trouve sur un portique à l'avant du véhicule, à une hauteur de 2 m. Le véhicule dispose d'un système de localisation absolu (GPS cinématique Dassault-Sercel) autorisant un positionnement centimétrique.

plan parallèle à l'avancement du véhicule, avec trois angles d'incidence possibles : 0° (normal), 8° et 20° . Pour les parcelles rugosité, il n'a pas été possible de réaliser des mesures dans la parcelle R1 (la plus rugueuse) en raison de l'instabilité du véhicule.

Le radar utilisé possède les principales caractéristiques suivantes :

- fréquence centrale d'émission F_0 10 GHz
- polarisation HH
- puissance d'émission P_e 18 dBm

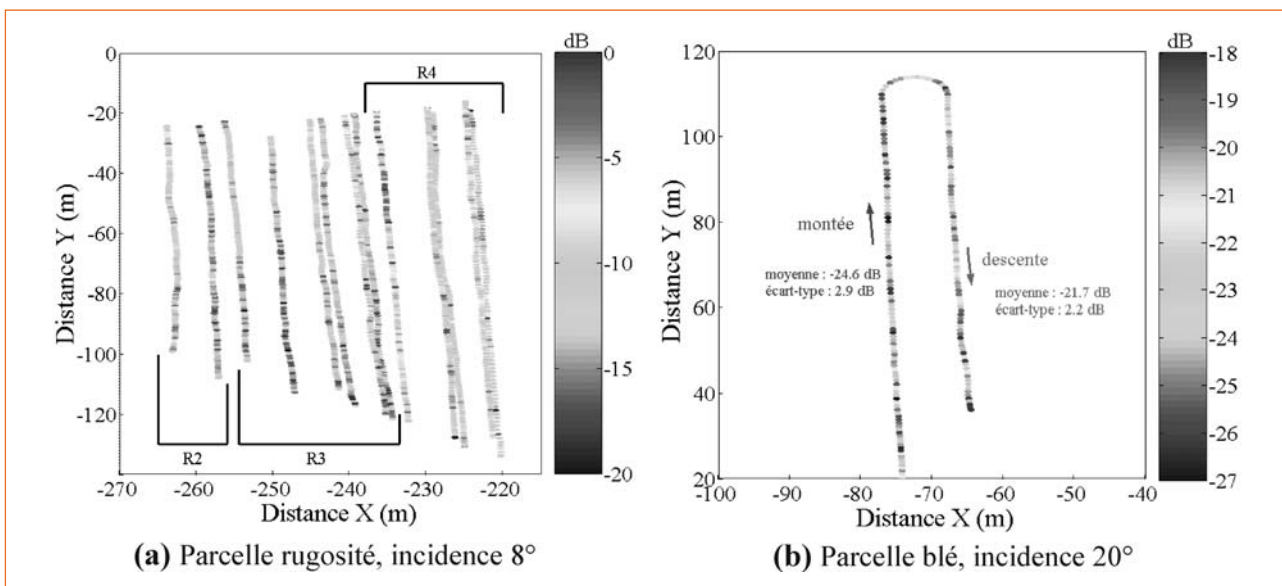
- excursion en fréquence ΔF 1 GHz
- fréquence de modulation F_m 400 Hz

Des exemples de mesures réalisées avec le radar sont présentés sur la figure 10 : mesures sur les parcelles R2, R3 et R4 avec un angle d'incidence de 8° (a) ; mesure sur la parcelle blé avec une incidence de 20° (b).

Les travaux de modélisation

L'interaction des ondes électromagnétiques avec le sol demeure un problème très complexe en raison du nombre élevé de paramètres entrant en

▼ Figure 10 – Exemple de mesure radar enregistrée sur la parcelle rugosité (a) et sur la parcelle blé (b).



jeu dans le phénomène de rétrodiffusion du signal radar, et les travaux poursuivis par les différentes équipes à travers le monde ont mis en évidence la nécessité de prendre en compte l'ensemble des propriétés du sol (géométriques et diélectriques) afin d'envisager l'évaluation d'un paramètre du sol à partir des données radar. Pour cette raison nous avons entrepris des travaux sur la modélisation des interactions entre les ondes électromagnétiques et le sol. La modélisation numérique de la propagation d'une onde électromagnétique a des enjeux importants : la compréhension des interactions entre onde et milieu traversé, c'est le *problème direct* ; et le développement d'algorithmes reliant les propriétés diélectriques aux propriétés physico-chimiques, on parle alors de *problème inverse*.

Le modèle de propagation électromagnétique utilise un modèle numérique du milieu à étudier, dans lequel se propage l'onde électromagnétique. Pour notre application, ce modèle du milieu est composé de deux éléments distincts : l'air, dans lequel est positionnée la source du rayonnement ; le sol, décrit par ses propriétés géométriques (état de surface) et diélectriques (volume). Une présentation générale de cette approche est présentée sur la figure 11.

Les problèmes d'interaction onde-milieu sont abordés selon une complexité croissante : milieu homogène avec interface air-sol variable (lisse à fortement rugueux) ; milieu inhomogène (avec différentes modalités) et interface air-sol lisse ; milieu inhomogène avec interface air-sol variable.

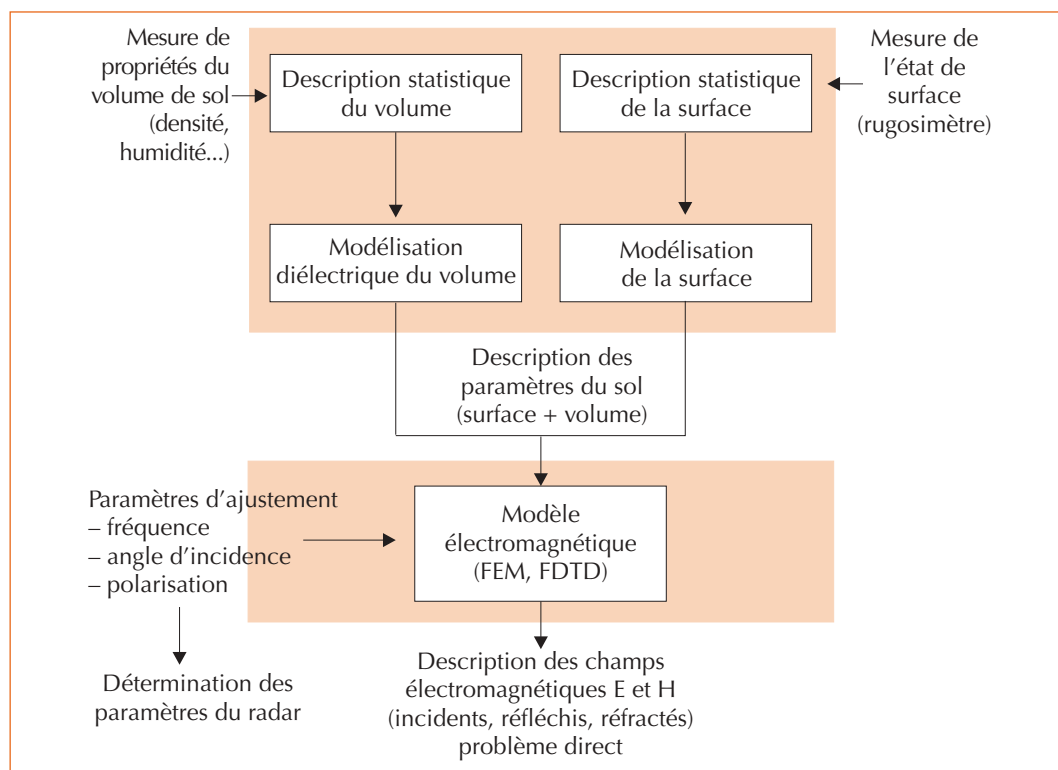
MILIEU HOMOGÈNE – DESCRIPTION DE LA SURFACE

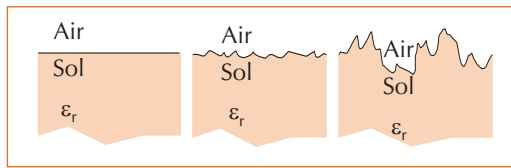
Dans un premier temps on considère deux milieux homogènes (l'air et le sol), séparés par une interface dont on fait varier la géométrie, c'est-à-dire la rugosité de surface (figure 12). On réalise une description statistique de l'état de surface du sol à partir de :

- données simulées, comme la longueur de corrélation et l'écart-type des hauteurs,
- données réelles, obtenues à partir de mesures effectuées sur des terrains agricoles (rugosimètre à aiguilles, télémètre laser).

MILIEU INHOMOGÈNE – DESCRIPTION VOLUMIQUE
On aborde maintenant le cas d'un sol non homogène, plus représentatif d'un sol agricole réel. On considère dans un premier temps une interface air-sol lisse, et enfin le cas général d'un milieu non homogène avec une interface air-sol rugueuse.

► Figure 11 – Présentation générale de la modélisation. Le modèle de propagation électromagnétique (éléments finis ou différences finies) utilise une représentation numérique du milieu à étudier, décrit par deux composantes : surface (description géométrique) et volume (description diélectrique).





▲ Figure 12 – Exemples d'interface air-sol avec un milieu homogène. Variation de la rugosité de surface.

Les variations de permittivité sont définies à l'aide de modèles de sol comme le modèle de Dobson (Dobson, 1985), qui utilise les paramètres d'entrée tels que la texture, la densité, l'humidité, la température, la salinité. Ce type de modèle fournit la permittivité apparente du sol utilisée par le modèle de propagation électromagnétique. Différents cas d'inhomogénéité peuvent être traités, toujours avec une démarche qui aborde les problèmes avec une complexité croissante (figure 13) :

- un milieu stratifié, c'est-à-dire la superposition de couches homogènes mais de permittivités différentes ;
- un milieu à gradient de permittivité, c'est-à-dire un milieu dans lequel la permittivité évolue dans le sens vertical mais sans discontinuité (approche intéressante par exemple pour simuler la migration de l'eau dans le sol suite à une irrigation) ;
- une représentation volumique « complexe » de la permittivité, se rapprochant plus fidèlement de la description d'un sol naturel. Des campagnes de mesures terrains peuvent être nécessaires afin de déterminer les paramètres statistiques nécessaires à la génération de ces représentations volumiques complexes : mesure d'humidité, de densité, etc.

Jusqu'à présent, nos travaux dans ce domaine ont porté sur le développement de codes numériques

permettant de simuler la propagation d'une onde électromagnétique en espace libre. Il a fallu pour cela s'intéresser aux conditions limites imposées sur les bords du domaine de calcul afin de le rendre fini, ainsi qu'à la modélisation de sources rayonnantes capables de simuler les antennes radar que nous utilisons. Maintenant, nous allons aborder la description surfacique et volumique du sol comme précisé aux paragraphes précédents. Cette nouvelle étape fait l'objet d'un travail de thèse cofinancée par l'INRA et le Cemagref.

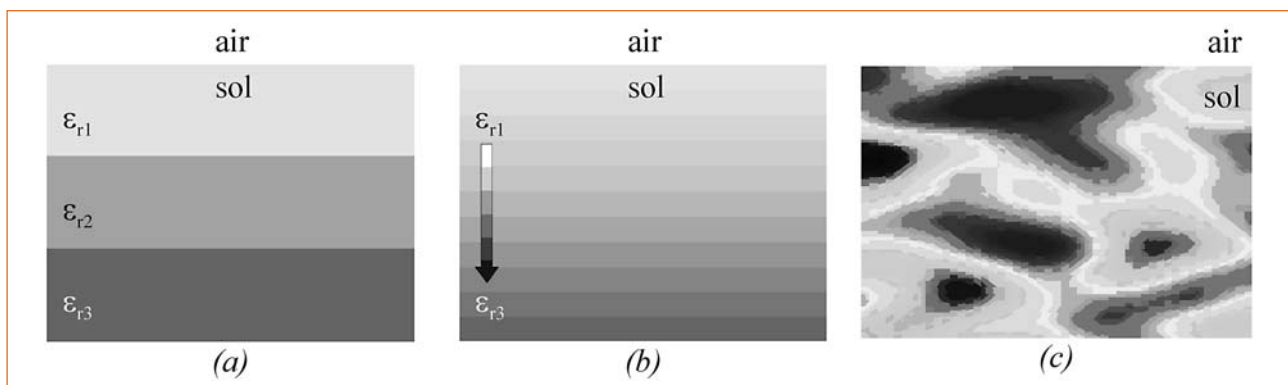
L'utilisation d'un modèle de permittivité tel que le modèle de Dobson n'est pas la seule solution pour obtenir une description des propriétés diélectriques d'un sol. Il est possible d'accéder directement à ces propriétés par des mesures d'impédance électrique⁷. Cette technique a été mise en œuvre en laboratoire sur différents échantillons de sol dont on a fait varier l'humidité et la densité (Chanet, 2003). On a ainsi montré l'influence de la connaissance de la densité sur la détermination de l'humidité d'un sol : les précisions obtenues vont de $\pm 1\%$ si la densité est connue, jusqu'à $\pm 5\%$ si la densité demeure un paramètre indéterminé. La suite de ces travaux va porter sur les potentialités de la spectrométrie d'impédance électrique, c'est-à-dire sur l'exploitation de plusieurs fréquences de mesure pour séparer les effets de la densité de ceux de l'humidité, et sur le passage à une mesure dynamique.

La caractérisation du sol par mesure des efforts résistants du sol

La structure du sol est en partie liée à la texture et au taux de matière organique présent dans les couches de surface, mais elle est aussi fortement liée à l'action des machines. Certaines de ces machines exercent une action bénéfique en

7. L'impédance électrique est la propriété d'un matériau à s'opposer à la circulation d'un courant injecté à l'aide d'électrodes d'apport. Elle se calcule par le rapport entre la différence de potentiel mesurée aux bornes d'électrodes de mesure et le courant. Contrairement au radar, il s'agit d'une mesure avec contact.

▼ Figure 13 – Exemples de description de la permittivité de milieux inhomogènes. (a) Milieu avec permittivité stratifiée. (b) Milieu avec gradient de permittivité. (c) Milieu complexe.



décompactant le sol, mais peuvent aussi avoir une action de compactage par l'intermédiaire des pneumatiques, en particulier au moment de la récolte ou pendant les différentes opérations de traitement et d'épandages.

Ce type de compactage causé par le passage des engins agricoles sur les parcelles constitue une dégradation du sol. Ses conséquences sont multiples : le sol est plus dense, plus difficile à travailler, moins perméable à l'air et à l'eau et donc moins favorable au développement racinaire ainsi qu'à l'infiltration de l'eau. Le compactage modifie la structure en tassant les particules et en créant des agrégats plus denses. Il réduit le volume des pores dans le sol et augmente la densité apparente du sol. En rendant plus difficile le travail du sol, le compactage tend vers l'emploi de matériels de plus en plus puissants. Cette course à la puissance va de pair avec l'augmentation du poids des machines, ce qui aggrave encore le compactage et accroît la consommation d'énergie.

Outil de cartographie de dureté du sol (OCDS)

Dans le but de caractériser l'évolution de la structure ainsi que les hétérogénéités (en particulier celles liées aux phénomènes de compaction) dans une parcelle agricole, le Cemagref a mis au point un dispositif appelé outil de cartographie de dureté du sol (OCDS) présenté sur la figure 14.

Cet outil est constitué de 4 lames équipées de capteurs permettant de mesurer les efforts résistants du sol. Chaque lame travaille à une profondeur différente afin d'explorer le sol par couches de 10 cm jusqu'à 40 cm de profondeur. Les informations fournies par les capteurs sont liées aux contraintes exercées par le sol sur les lames. Un modèle semi-empirique a été développé pour déterminer la densité du sol en fonction des don-

nées fournies par les capteurs d'effort (Chaigneau, 2000). En utilisant une approche micro-mécanique, on montre que dans un milieu granulaire, il existe un lien fort entre les propriétés physiques et mécaniques (Biarez, 1989). Dans un sol connu, la densité ρ et l'humidité w sont suffisantes pour prédire les propriétés mécaniques. Le modèle est de la forme :

$$\rho = a \log(p) + b/w + c \quad (5)$$

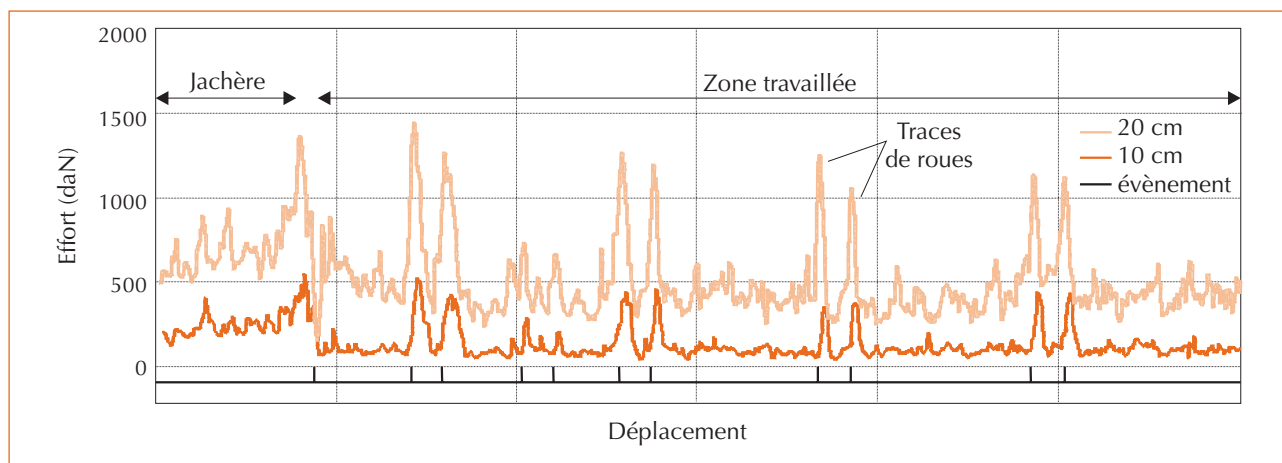
où p représente les données d'effort, et a , b , c des paramètres liés à la texture du sol.

Ce modèle initialement développé pour le contrôle de la qualité des remblais en génie civil a été utilisé avec succès sur les sols de surface. Étant donné qu'il est sensible à l'humidité, il est nécessaire d'introduire cette information dans le modèle ou de considérer un taux d'humidité constant.

Un premier exemple de représentation sous forme de courbes est présenté sur la figure 15. Il permet de comparer et d'évaluer les phénomènes de compaction provoqués par des passages de pneumatiques agricoles. On a ici l'exemple d'une parcelle après labour (Palaquins, Cemagref) sur laquelle on a effectué un passage dans le sens transversal à la circulation des machines avec l'OCDS. Le schéma montre deux courbes d'efforts mesurés sur les lames de l'OCDS, à 10 cm et 20 cm de profondeur. En ordonnée sont portés les efforts (en daN) et en abscisse la distance transversale synchronisée par les impulsions « événement », marquant chaque passage des roues du tracteur qui a travaillé la parcelle (à l'exception de la première impulsion qui indique la limite entre la jachère et la zone travaillée). On remarque *a priori* une grande similitude de forme entre la courbe des efforts à 10 cm et celle à 20 cm de profondeur, seule la valeur moyenne (100 daN à 10 cm et 400 daN à 20 cm) variant en raison de la profondeur de pénétration. En revanche, de grandes variations d'effort – jusqu'à 800 daN sur la courbe à 20 cm – apparaissent entre les zones compactées par les roues comparativement aux zones non compactées, indiquant une dureté du sol très importante sous les roues de l'engin. Sur les cinq passages de l'engin que l'on peut visualiser par deux impulsions consécutives sur la courbe événement, quatre ont fait l'objet de passages répétés du tracteur dans les mêmes traces, un seul (en seconde position sur la courbe) traduit, par la valeur de l'effort mesuré (650 daN), un passage unique.

► Figure 14 – Outil de cartographie de dureté du sol (OCDS) développé par le Cemagref.





On comprend tout l'intérêt des mesures OCDS pour mettre en évidence les effets de compaction du sol sous l'action des pneumatiques des machines agricoles, et par voie de conséquence la possibilité de comparer les effets produits par différents types de pneumatiques.

Par ailleurs, en équipant l'OCDS de lames de mesure de plus grande longueur (par exemple 40 cm), il est possible d'observer l'influence du tassement en dessous de la semelle de labour et ainsi d'évaluer l'impact des outils très lourds comme les machines de récolte sur les couches plus profondes. En effet, le compactage du sol au-dessous de la partie travaillée provoque des semelles hermétiques à la circulation verticale de l'eau, ainsi qu'à la pénétration des racines en profondeur. En diminuant la percolation de l'eau, le compactage favorise le ruissellement ce qui engendre les phénomènes d'érosion et de transport de particules dans les cours d'eau. En effet, lorsque l'eau ne peut plus s'infiltrer verticalement, une circulation horizontale s'installe et l'érosion du sol commence.

Réalisation de cartes de dureté du sol

Les données fournies par les capteurs d'effort de l'OCDS sont associées à celles d'un système de localisation GPS de précision centimétrique permettant d'établir des cartographies de dureté des sols avec une grande précision. Ainsi apparaît la possibilité de caractériser les compactations provoquées par les pneumatiques des machines lors des différentes opérations culturales, mais aussi de suivre les évolutions de structures sous l'effet des agents climatiques ou des techniques culturales. La réalisation de cartes de dureté du sol offre un élément de compréhension supplémentaire

pour expliquer le développement de la plante, par exemple au niveau de la levée ou des différents stress subis durant le cycle cultural. Ces cartes constituent donc un outil de plus pour l'exploitant au service de l'agriculture de précision.

▲ Figure 15 – Mesure avec l'OCDS de la compaction provoquée par des pneumatiques agricoles.

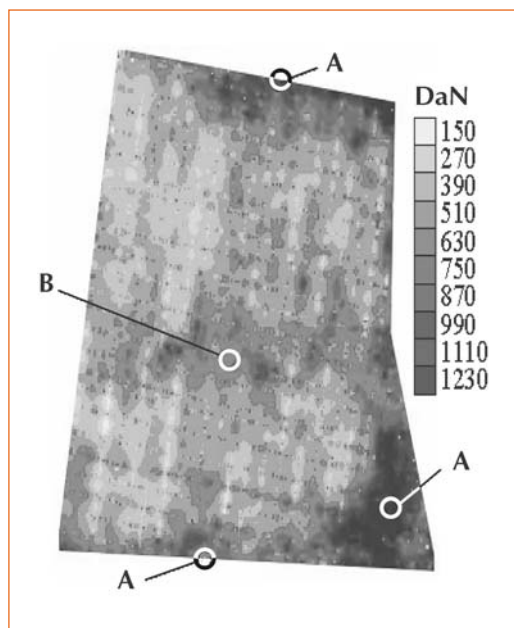
CARTOGRAPHIE PERMETTANT D'ÉVALUER L'ACTION DE L'HOMME SUR LA STRUCTURE DU SOL

Un premier exemple illustre l'utilisation de l'OCDS dans la réalisation de cartes de dureté pour évaluer l'action de l'homme et de la machine sur les parcelles agricoles. La parcelle représentée sur la figure 16 (page 18) est située sur le domaine des Palaquins du Cemagref (Montoldre, Allier). Sa texture est sablo-limoneuse et la carte fait apparaître une distribution de zones de duretés différentes :

- la partie gauche de la parcelle, la plus claire, correspond à une prairie qui a restructuré le sol ;
- la partie droite, plus foncée est une zone cultivée en culture annuelle ;
- les pourtours et les pointes (repérées A), plus sombres, sont des zones de concentration de manœuvres qui augmentent le tassement du sol ;
- au centre une bande plus tassée (repérée B) témoigne de la présence d'un ancien fossé comblé depuis 20 ans.

La carte de dureté OCDS met en évidence la variabilité du sol de la parcelle représentée par des zones de dureté faibles et plus élevées correspondant en grande partie à l'action de l'homme (ancien fossé), de l'engin (zones de manœuvres des machines pendant les opérations culturales) ainsi qu'à l'historique (assolements différents suivant les zones de la parcelle). La mémoire de certains sols fait apparaître ainsi les traces laissées par les actions de l'homme.

► Figure 16 – Carte de dureté du sol mettant en relief les actions de l'homme (Palaquins, Cemagref de Montoldre, Allier). Les zones plus dures repérées A correspondent aux zones de manœuvre des tracteurs ; la zone centrale repérée B correspond à un ancien fossé comblé il y a vingt ans.



soumise à deux techniques culturales différentes : une bande sur la partie de droite a été travaillée avec une technique classique de labour (zone claire) ; le reste de la parcelle (à gauche) étant travaillé pour la quatrième année consécutive en semis direct.

La carte de dureté OCDS met en évidence dans la zone de labour (partie droite) un sol de structure très homogène et meuble, excepté aux extrémités où se situent les zones de manœuvres plus tassées par les pneumatiques. Dans le reste de la parcelle qui n'a pas subi le labour (à gauche), il existe deux zones pédologiques différentes qui sont détectées sur la carte de dureté : une zone centrale plus sablonneuse, de moindre dureté (zone claire) et une zone à gauche de la parcelle plus riche en éléments fins, beaucoup plus compacte (zone sombre). La carte réalisée représente donc l'évolution de la dureté du sol en fonction d'une part de la technique culturale utilisée ; et d'autre part de la variabilité de texture au sein même de la parcelle.

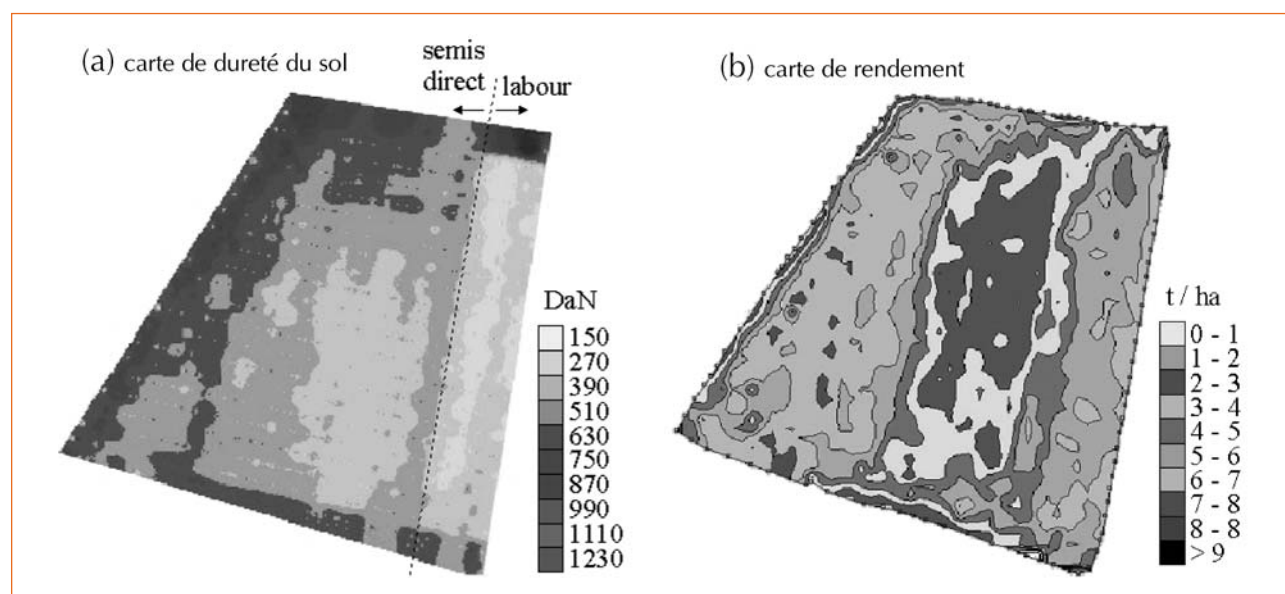
▼ Figure 17 – Comparaison entre une carte de dureté du sol (a) et une carte de rendement (b). Acquisitions réalisées en 2002 sur une parcelle des Palaquins au Cemagref de Montoldre.

CARTOGRAPHIE PERMETTANT D'ÉVALUER L'ÉVOLUTION DANS LE TEMPS EN FONCTION DE LA TECHNIQUE CULTURALE UTILISÉE, ET LA VARIABILITÉ INTRA PARCELLAIRE EN FONCTION DE LA TEXTURE

Sur la figure 17 sont représentées une carte de dureté du sol (a) réalisée en 2002 sur une parcelle des Palaquins à Montoldre, et une carte de rendement (b) réalisée la même année. La parcelle a été

On peut voir que l'on retrouve globalement les mêmes zones sur la carte de rendement :

- la partie labourée à droite, correspond à une zone de rendement moyen (40-50 Q/ha) ;
- la zone centrale moins dure, avec un faible potentiel hydrique montre des rendements très faibles (20-30 Q/ha) ;
- la partie de gauche, la plus dure, présente les rendements les plus élevés (60-70 Q/ha).



La mise en correspondance de ces deux types de représentation permet d'établir des liens entre rendement et dureté du sol associée à la texture mais aussi au passé cultural de la parcelle. La technique OCDS ne remplace pas les mesures pédologiques, mais présente l'avantage par son aspect dynamique, de pouvoir définir de façon plus précise les zones de duretés différentes, ce qui aurait nécessité un maillage très fin avec une technique classique de prélèvements.

Dans cet exemple, les mesures de dureté du sol sont révélatrices d'un potentiel de production différent en fonction de la texture, mais aussi du type de technique de travail du sol choisi.

Remarques

Ces quelques exemples montrent l'intérêt de la mesure dynamique d'effort offerte par l'OCDS pour suivre l'évolution de la structure d'un sol en fonction de l'action de l'homme, mais elles peuvent être utiles dans d'autres cas :

- connaissance de la répartition spatiale de la dureté du sol avant l'implantation d'un essai comparatif (variétés, fumures, techniques culturales, etc.) ;
- développement de capteurs intégrés aux machines pour obtenir en continu des informations de dureté du sol pendant les opérations culturales ;
- suivi de l'évolution de la structure du sol en fonction des techniques culturales utilisées, du taux de carbone présent dans le sol et des amendements organiques.

Dans ce type d'utilisation, si le niveau de dureté mesuré est fortement corrélé à la densité, il est aussi dépendant de l'humidité du sol. Aussi les informations fournies ne doivent-elles être considérées que comme des informations de comparaison à humidité équivalente, mais en aucun cas comme des données absolues. Nous avons cependant envisagé de faire évoluer le dispositif pour obtenir une information sur l'humidité en continu en utilisant les lames comme des électrodes. Une mesure d'impédance électrique permettrait alors d'évaluer en continu l'humidité et la densité du milieu. Les principales limites actuelles du système concernent donc l'interprétation des données (i.e. résolution du problème inverse), mais également la mise en œuvre de ce système qui est invasif et sensible aux conditions atmosphériques.

Conclusion

La gestion du sol, d'un point de vue agricole ou environnemental, passe par la disponibilité d'indicateurs pertinents et fiables, mais aujourd'hui les outils permettant la collecte et le traitement de données terrain font fortement défaut⁸. Les travaux de recherche présentés ici s'inscrivent dans ce contexte, à savoir le développement de nouveaux outils pour la mesure de paramètres physiques du sol.

Le premier de ces outils est un radar hyperfréquence, capteur sans contact qui à partir des phénomènes d'interactions entre une onde électromagnétique et le sol, donne accès aux propriétés diélectriques et géométriques de ce dernier. Le second est un capteur avec contact, basé sur la mesure des efforts résistants du sol travaillé par une lame. L'intérêt commun de ces outils est d'être embarquables sur des engins mobiles, et couplés à un système de localisation absolu type GPS, ils autorisent une cartographie des parcelles, éliminant les problèmes liés à l'échantillonnage des points de mesures des systèmes statiques. On notera que ces deux systèmes réalisent *des mesures indirectes* de paramètres physiques du sol, et la résolution du problème inverse (i.e. détermination des paramètres physiques du sol à partir des informations fournies par les capteurs) reste aujourd'hui un problème complexe très partiellement résolu : ainsi la mesure de la dureté du sol ne donne pas directement accès à sa densité, car celle-ci dépend également de la nature et de l'humidité du sol.

Le premier champ d'application de ce type de système de mesure concerne la gestion spatialisée des agrosystèmes, c'est-à-dire la prise en compte dans la réalisation des opérations culturales des hétérogénéités intra-parcellaires du sol. On s'intéresse par exemple à la rugosité de surface lors des phases de préparation des lits de semences (le taux de mortalité des plantules en phase de levée est pour partie fonction de la taille des fragments terreux présent à la surface du sol) : la mesure sur l'outil du résultat du travail du sol pourra être utilisée pour ajuster en temps réel les réglages de l'outil comme la vitesse d'avancement, la vitesse de rotation des pièces travaillantes ou leur profondeur.

Le second champ d'application vise plus particulièrement le domaine de la métrologie environnementale, notamment pour évaluer l'impact des activités humaines sur l'environnement. On s'intéresse ici au sol comme à une ressource natu-

8. Ce volet est parfaitement identifié dans l'appel à propositions de recherche sur les sols GESSOL 2, lancé en février 2004, par le ministère de l'Écologie et du Développement durable.

9. Le sol est une ressource limitée, dont la vitesse de formation est aujourd'hui inférieure à sa vitesse de dégradation : elle peut donc être considérée comme une ressource naturelle non renouvelable.

relle non renouvelable⁹ : gestion de la ressource, détection et suivi de ses évolutions spatiales et temporelles. On connaît par exemple l'impact des outils agricoles lourds sur la structure du sol : la détection et le suivi des zones fortement compactées situées sous la zone de travail des outils est un point qui apparaît de plus en plus important, car ce facteur favorise le ruissellement, précurseur des problèmes d'érosion des sols et de transfert des polluants.

Lorsque les bases de données à l'échelle de l'exploitation seront opérationnelles, les informa-

tions collectées par ces capteurs pourront être exploitées selon un format conforme au cahier des charges des outils de communication. L'agriculteur disposera d'un ensemble cartographique, qui l'aidera non seulement à accroître sa compétitivité économique, mais aussi à assurer un suivi environnemental précis et quantifié de son exploitation. Il pourra ainsi répondre aux nouvelles attentes des consommateurs et de l'opinion publique en général vis-à-vis de la qualité et de la traçabilité des produits de son exploitation, mais également vis-à-vis du respect de l'environnement. □

Résumé

L'objectif des travaux présentés est la mise au point d'outils de caractérisation dynamiques des sols agricoles à l'échelle de la parcelle. Deux technologies sont développées : la première est une méthode électromagnétique, basée sur l'utilisation d'un radar hyperfréquence ; la seconde est mécanique, avec la mesure des efforts de lames travaillant le sol à différentes profondeurs. Ces capteurs sont implantés sur des engins mobiles. Couplés à un système de localisation absolu (GPS), ils permettent la construction de cartographies des hétérogénéités du sol au sein des parcelles.

Abstract

The main objective of the presented researches is to develop in-field dynamic methods for soil characterization. Two technologies are developed: the first one is an electromagnetic method, based on the use of a microwave radar; the second one is mechanical, with the measurement of the soil mechanical resistance (steel blades plough the soil at different working depths). These sensors are implemented on mobile engines. Combined with a global positioning system (GPS), they allow to create in-field maps of soil's heterogeneities.

Bibliographie

- BARTON, D.-K., 1988, *Modern radar system analysis*, Ed. Artech House.
- BIAREZ, J. ; FAVRE, J.-L. ; HICHER, P.-Y. ; RAHMA, A., 1989, Correlations for granular media, classification logic and connections between classes, *Proceedings of International Conference on Micromechanics of Granular Media*, Clermont-Ferrand (France), p. 201-209, 1989.
- BRUANDA A. ; PÉREZ-FERNANDEZ, P. ; DUVAL, O. ; QUÉTIN, P. ; NICOUILLAUD, B. ; GAILLARD, H. ; RAISON, L. ; PESSAUD, J.-F. ; PRUD'HOMME, L., 2002, Estimation des propriétés de rétention en eau des sols. Utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale, *Étude et Gestion des Sols*, vol. 9, n° 2, p. 105-125.
- CHAIGNEAU, L. ; GOURVÈS, R. ; BACCONNET, C., 2000, *Penetration test coupled with a geotechnical classification for compaction control*, *International conference on geotechnical and geological engineering (GEOENG2000)*, Melbourne (Australia).
- CHANET, M. ; ORAISON, S. ; ROUVEURE, R. ; FAURE, P. ; MONOD, M.-O., 2003, Regression analysis of electric impedance spectroscopy for soil electrical properties measurements, *Measurement Science and Technology*, article soumis.
- CHAPLOT, V.-A.-M. ; LE BISSONNAIS, Y., 2003, Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 67, n° 3, p. 844-851.
- CHEN, K.-S. ; WU, T.D., 2001, A model-based inversion of rough soil surface parameters from radar measurements, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 15, n° 2, p. 173-200.
- DOBSON, M.-C. ; ULABY, F.-T. ; HALLIKAINEN, M.-T. ; EL-RAYES, M., 1985, Microwave dielectric behavior of wet soil – Part I: Empirical models and experimental observations, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, vol 23, n° 1, p. 25-35.
- Ecrin, 2003, Actes de la Journée Ecrin Environnement « *Enjeux de l'utilisation des sols* », Paris.
- JACKSON, J.-D., 1999, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed., J. WILEY, New York.
- MONOD, M.-O., 1995, *Radar à modulation de fréquence : un nouveau capteur pour l'environnement et la robotique mobile d'extérieur*, thèse de doctorat, université Paris VI.
- OGILVY, J.-A., 1991, *Theory of wave scattering from random rough surfaces*, Ed. Institute of Physics Publishing.
- PEROV, A.-O. ; SIRENKO, Y.-K. ; YASHINA, N.-P. ; CHANDEZON, J. ; MONOD, M.-O. ; ROUVEURE, R., 2000, *Soil characteristics study: models and algorithms*, PIERS'2000, Progress In Electromagnetics Research Symposium, Cambridge.
- RICHARD, G. ; Roger-Estrade, J. ; Cousin, I. ; Labreuche, J., 2001, *Fonctionnement physique des sols cultivés : labour, non-labour, structure et érosion*, Actes de la Conférence « Du labour au semis direct : enjeux agronomiques », Salon International du Machinisme Agricole, Paris.
- ROUVEURE, R., 2001, *Caractérisation de l'état de surface du sol à courte distance par des techniques micro-ondes. Application à la mesure de la rugosité d'un sol agricole*, thèse de doctorat, université Clermont II.
- ROUVEURE, R. ; FAURE, P. ; MONOD, M.-O. ; CHANET, M., 2002, *A microwave sensor for agricultural implements*, IEEE International Geoscience and remote Sensing Symposium (IGARSS'02), Toronto, Canada.
- ROUVEURE, R. ; BACCONNET, C. ; CHANET, M. ; MONOD, M.-O., 2003, *Simulation of Realistic Soils for 3-D Computational Models*, IEEE International Geoscience and remote Sensing Symposium (IGARSS'03), Toulouse, France.
- SKOLNIK, M.-I., 1980, *Introduction to radars systems*, Ed. McGraw-Hill International.
- ULABY, F. ; MOORE, R. ; FUNG, A., 1982, Radar remote sensing and surface scattering and emission theory, in *Microwave remote sensing: active and passive*, Ed. Artech House, vol 2/3.