

Caractérisation physique des sols par méthodes géophysiques et télédétection: bilan et perspectives

G. Grandjean⁽²⁾ et R. Guérin⁽²⁾

- 1) BRGM, Direction Risques et Prévention, av C. Guillemin, 45060 Orléans, France
- 2) UPMC, UMR 7619 Sisyphe, case 105, 4 PI Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

*: Auteur correspondant: g.grandjean@brgm.fr

RÉSUMÉ

La caractérisation physique des sols à partir de mesures proximales - de type géophysiques - ou plus distales - à partir de plateformes aéroportées ou spatiales - a donné lieu récemment à des avancées technologiques et scientifiques notables. La compréhension des processus qui affectent les sols s'appuie de plus en plus sur des modèles numériques généralement couplés et nécessitant en entrée de multiples paramètres physiques. L'utilisation de tels modèles nécessite donc de compléter les descriptions pédologiques par des variables d'état pouvant être, sur des courtes échelles de temps, stationnaires ou transitoires. Bien sûr, les techniques géophysiques utilisées pour cartographier ces paramètres, à plus ou moins grande échelle, évoluent rapidement, au grès de l'innovation technologique et informatique. Ces méthodes offrent en effet un réel intérêt par rapport aux méthodes pédologiques classiques car elles s'appuient sur des mesures physiques objectives dont les incertitudes peuvent être estimées. Cette réflexion a pour objectif de dresser un bilan des avancées qui ont permis d'améliorer la caractérisation physique des sols et d'en montrer la plus-value. Cette étude ne se veut pas exhaustive car le champ scientifique est très vaste et sortira du cadre demandé. En revanche, nous utiliserons des travaux récents pour illustrer la nature de ces avancées et évaluer leur potentialité à venir dans l'amélioration des connaissances.

Mots clés

Méthodes géophysiques, bilan, perspectives.

SUMMARY

PHYSICAL CHARACTERIZATION OF SOILS USING GEOPHYSICAL METHODS: review and perspectives

Physical soil characterization using proximal methods, i.e., geophysics, or more distal, i.e., airborne or spaceborne remote sensing, led to recent developments from a technical and a scientific point of view. Understanding the processes affecting soils needs more

and more to use numerical complex models based on multiple physical input parameters. Thus, using such models requires extensive soil description by a collection of state parameters that can be stationary or not over short periods of time. Of course, the methods for measuring and map them at different scales become more efficient thanks to the technological innovation and computing sciences. In particular, the interest of geophysical methods, compared to classical pedological ones, relies on the possibility to work with physical measurements and their associated uncertainties. The review presented here aims to report on this aspect by identifying the recent developments that really improved soil characterization techniques. Our review cannot be exhaustive, since the scientific domain concerned here is very huge to be entirely covered. Nevertheless, a large number of studies published recently show very interesting results and gains of knowledge that can be evaluated.

Key-words

Geophysical methods, review, perspectives.

RESUMEN**CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS SUELOS POR MÉTODOS GEOFÍSICOS Y TELEDETECCIÓN: BALANCE Y PERSPECTIVAS**

la caracterización física de los suelos a partir de medidas proximales – de tipos geofísicas – o más distales- a partir de plataformas aero-transportadas o espaciales – dio lugar recientemente a adelantos tecnológicos y científicos notables. La comprensión de los procesos que afectan los suelos se apoya más y más sobre modelos numéricos generalmente acoplados y que necesitan en entradas múltiples parámetros físicos. El uso de estos modelos necesita entonces completar las descripciones pedológicas por variables de estado que pueden estar, por cortas escalas de tiempo, estacionares o transitorias. Por supuesto, las técnicas geofísicas usadas para cartografiar estos parámetros, a más o menos grande escala, evolucionan rápidamente, a merced de la innovación tecnológica e informática. Estos métodos ofrecen en efecto un real interés en comparación con métodos pedológicos clásicos porque se apoyan sobre medidas físicas objetivas cuyas las incertidumbres pueden estar estimadas. Esta reflexión tiene con objetivo hacer un balance de avances que permitieron mejorar la caracterización física de los suelos y mostrar sus ganancias. Este estudio no se quiere exhaustivo porque el campo científico está muy amplio y saldría del cuadro definido. Sin embargo, usaremos trabajos recientes para ilustrar la naturaleza de estos avances y evaluar su potencialidad futura en el mejoramiento de los conocimientos.

Palabras clave

Métodos geofísicos, balance, perspectivas.

Le sol est un élément qui interagit à la fois avec la biosphère, l'hydrosphère et la géosphère. Issu des processus d'altération ou de transport-dépôt des sédiments, il offre un support au développement de la vie. Cet espace est le siège de réactions physico-chimiques plus ou moins complexes et de transferts latéraux et verticaux importants portés par les écoulements des eaux de surface. Ces processus permettent de stimuler l'activité microbienne et de développer la biomasse, assurant ainsi une production agricole nécessaire au développement de nos sociétés. En complément de ses fonctions de production au sein de toute la chaîne alimentaire, le sol admet aussi des fonctions support pour les bâtiments et les infrastructures urbaines. Le changement climatique et les pressions anthropiques créent un certain nombre de menaces sur les sols, bien identifiées par la Stratégie Thématique en faveur de la Protection des Sols (European Communities, 2002), les dégradations physiques dues par exemple aux processus d'érosion, de tassement ou de glissements de terrain, les contaminations diffuses ou concentrées comme la salinisation ou les épanchements d'agents chimiques industriels, la décroissance en matière organique générant fatalement un impact sur la biodiversité.

Depuis quelques années, des initiatives nationales (Citeau *et al.*, 2008) ou européennes (Eckelmann *et al.*, 2006) se sont emparées de ce sujet afin d'orienter les politiques publiques dans un souci de protection de ce patrimoine. Cela a permis de stimuler une large communauté scientifique au travers de projets collaboratifs pour le développement d'outils de métrologie (Grandjean *et al.*, 2010) et d'observation (Ben-Dor, 2002), la mise au point de méthodes de cartographie (McBratney *et al.*, 2003) et de consultation de données (Hollis *et al.*, 2006 ; Panagos *et al.*, 2011) en vue de cartographier ces menaces (Kirkby *et al.*, 2004). Parmi ces problématiques, celle de la caractérisation physique des sols à partir de mesures proximales - de type géophysiques - ou plus distales - à partir de plateformes aéroportées ou spatiales - a donné lieu à des avancées technologiques et scientifiques notables et reste promise à un bel avenir. En effet, la compréhension des processus qui affectent les sols s'appuie de plus en plus sur des codes numériques, basés sur des modèles souvent couplés, et nécessitant en entrée des paramètres physiques. L'utilisation de tels modèles nécessite donc de compléter les descriptions pédologiques par des variables d'état pouvant être, sur des courtes échelles de temps ou d'espace, stationnaires (densité, vitesse acoustique, susceptibilité magnétique, viscosité magnétique, etc) ou transitoires (teneur en eau, température, permittivité diélectrique, conductivité électrique, chargeabilité, pH, etc). Bien sûr, les techniques de mesure utilisées pour cartographier ces paramètres, à plus ou moins grande échelle, évoluent rapidement, au gré de l'innovation technologique (électronique et informatique). Ainsi la sensibilité des capteurs, la vitesse de numérisation des signaux, l'augmentation des supports de stoc-

kage, la puissance des unités de traitements et de visualisation sont autant de facteurs qui participent au développement de nouvelles méthodes d'auscultation géophysique et d'imagerie. De la même manière, les dispositifs de mesure s'adaptent à des résolutions latérales et verticales plus fines, les surfaces prospectées sont aussi souvent plus grandes dans le but de définir des typologies de reconnaissance des sols. En parallèle de ces travaux, des recherches sont menées pour comprendre les fonctions de transfert entre mesures géophysiques et paramètres pédologiques, pour aboutir à de meilleures interprétations intégrées.

Cette réflexion a pour objectif de dresser un bilan des dernières avancées méthodologiques qui ont permis d'améliorer la caractérisation physique des sols et d'en montrer la plus-value pour cette thématique. Cette étude ne se veut pas exhaustive car le champ scientifique est très vaste et sortirait du cadre demandé. En revanche, nous utiliserons des travaux récents pour illustrer la nature de ces avancées et évaluer leur potentialité à venir dans l'amélioration des connaissances. Nous passerons donc en revue les résultats majeurs récents ou publiés depuis quelques années en nous focalisant en particulier sur ceux qui ont été présentés lors des Journées d'Etude des Sols 2012 (JES, 2012) où une session sur le sujet a eu lieu. Notre analyse sera tout d'abord illustrée par des applications exploitant des mesures de géophysique au sol avant de considérer les techniques aéroportées et spatiales. Enfin, des perspectives sont données quant aux grands défis à venir.

MESURES AU SOL: VERS DES SYSTÈMES D'ACQUISITION RAPIDE

Depuis plusieurs années, la métrologie géophysique s'est fortement développée dans le secteur de la cartographie des formations superficielles. Intégrant la partie supérieure du régolithe, ces formations comprennent autant les sols que les différents niveaux d'altération sous-jacents. Cette organisation verticale, plus ou moins hétérogène, permet de comprendre pourquoi les méthodes de caractérisation développées récemment utilisent des approches aussi variées que les sondages verticaux 1D, les panneaux bidimensionnels (2D) verticaux ou cartographiques et les reconstructions tridimensionnelles (3D), et le suivi temporel des mesures réalisées à partir de ces différentes géométries (ajoutant une dimension supplémentaire à chacune des descriptions précédentes, i.e. 2D, 3D et 4D). C'est ainsi que des projets de recherche ont vu le jour pour étudier des systèmes intégrés de mesure au sol par différents capteurs (Grandjean *et al.*, 2010).

Ces systèmes mettent en œuvre diverses méthodes ayant bénéficié récemment d'avancées notables. La caractérisation des variabilités spatiales des sols par induction électromagnétique a montré toute sa pertinence. Ainsi, Brechet *et al.* (2012 ;

Figure 1 - Carte de la conductivité électrique apparente du sol krigée sur environ 1 ha pour réaliser un suivi temporel sur une saison des pluies (Brechet *et al.*, 2012).

Figure 1 - Map of apparent electrical conductivity of soil, kriged over about 1 ha to perform a temporal monitoring during a rainy season (Brechet *et al.*, 2012).

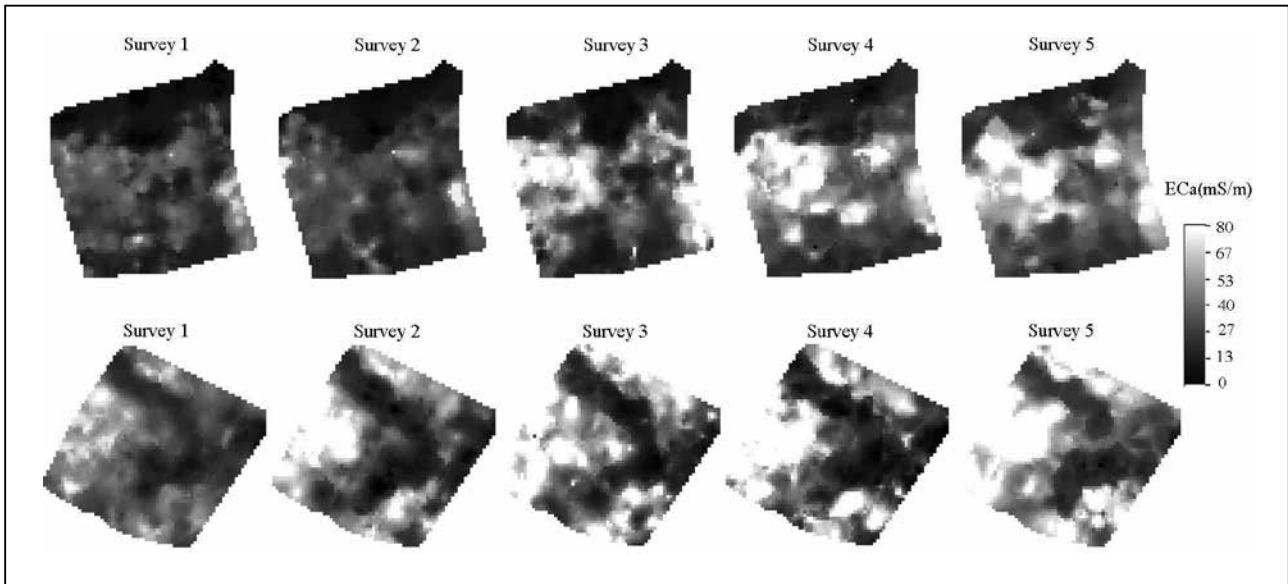


Figure 2 - Carte de la résistivité électrique obtenue entre 0,0 et 1,0 m de profondeur avec le dispositif ARP, montrant une texture en polygones réguliers d'environ 20-30 m de diamètre (Thiry *et al.*, 2012).

Figure 2 - Map of the electrical resistivity obtained between 0.0 and 1.0 m deep with the ARP device, showing regular polygons of about 20-30 m in diameter (Thiry *et al.*, 2012).

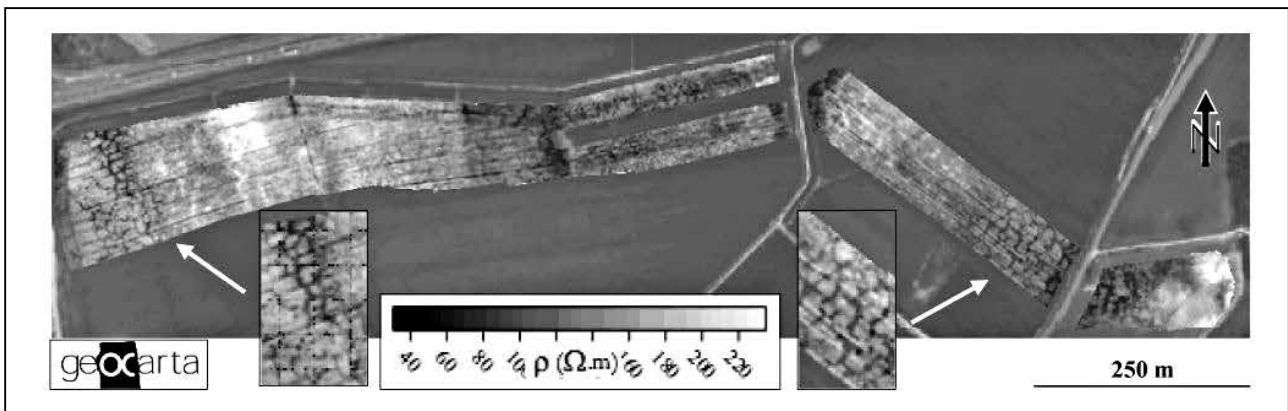


figure 1) et Thiesson *et al.* (2011, 2012) montrent que de fortes corrélations existent entre les anomalies magnétiques ou de résistivité électrique et des propriétés majeures (texture, saturation en eau) mais aussi secondaires (coefficient hydroscopique, rapport carbone/sulfure, taux d'oxydation du fer) d'un sol. Utilisée pour des besoins en cartographie (Morin *et al.*, 2011), cette méthode trouve toute son efficacité dans sa rapidité de mise en œuvre, puisque les antennes mesurent la résistivité apparente à partir de roues mobiles. Ce système a d'ailleurs été exploité

pour améliorer le rendement des méthodes électriques, ce qui a donné naissance à l'instrument MUCEP¹ (Panissod *et al.*, 1997 ; Tabbagh *et al.*, 2000) et sa version opérationnelle, l'ARP², utilisée dans Hirschberger *et al.* (2012) et à partir de laquelle Buvat (2012) a élaboré une méthode de délimitation des entités pédologiques basée sur une taxonomie des profils verticaux de

1 MULTipole Continuous Electrical Profiling

2 Automatic Resistivity Profiling

résistivité apparente issus des mesures spatialisées obtenues avec les différents écartements de l'ARP. Les méthodes électriques sont d'ailleurs très sensibles aux hétérogénéités du sol et du sous-sol, qu'elles soient naturelles, comme la présence de blocs rocheux (Rey *et al.*, 2006) ou issues de modification de la structure provenant d'activités anthropiques comme le labour (Séger *et al.*, 2009). Parmi ces hétérogénéités, les zones contaminées par des éléments métalliques peuvent être caractérisées efficacement (Thiesson *et al.*, 2010) tout comme le suivi de panaches s'infiltrant et migrant dans des aquifères et laissant des textures particulières (Vaudelet *et al.*, 2011 ; Thiry *et al.*, 2012 et *figure 2*). Certains dispositifs électromagnétiques aux basses fréquences (Bendjoudi *et al.*, 2002) et aux fréquences intermédiaires (Kessouri, 2012) permettent également de renseigner rapidement et sans contact avec le sol les variations spatiales de certaines propriétés (variations texturales, chenalisation, fissuration, etc.) ou les teneurs en différents éléments (eau, argile...).

Les propriétés hydrodynamiques du régolithe, en tant que telles, peuvent donc être étudiées par moyens géophysiques. Plus précisément, Guérin *et al.* (2005) montrent une application d'hydrogéophysique exploitant une combinaison surface-forage permettant de gagner en résolution verticale ; Grandjean *et al.* (2009) combinent plusieurs types de données d'imagerie pour suivre les transferts hydriques dans un versant montagneux ; Besson (2007) étudie les variations temporelles de résistivité électrique sur un parcellaire afin d'en caractériser les différents fonctionnements hydriques. Le suivi temporel des anomalies, liées à la présence d'eau ou de polluants, constitue l'une des applications phare de ces dernières années en matière de géophysique appliquée. Le développement des technologies multicapteurs et le besoin de caractériser les zones exposées aux risques naturels ou industriels devraient multiplier ces applications. Mais, outre les méthodes électriques et électromagnétiques, le radar géologique peut aussi aider à cartographier l'humidité d'un sol (Huisman *et al.*, 2003). Ainsi, Minet *et al.* (2010) ont particulièrement travaillé à l'élaboration d'un système radar permettant de cartographier l'humidité de surface d'un sol à partir d'un algorithme d'inversion en forme d'onde. La carte d'humidité du sol ainsi réalisée à l'échelle parcellaire permet de discriminer les zones de la parcelle ayant un besoin hydrique spécifique, ce qui permet une gestion raisonnée de la ressource en eau.

Pour aller vers des modèles 3D, ou appréhender la dimension verticale des sols, il convient d'estimer l'épaisseur de ce dernier. Coulouma *et al.* (2012) proposent d'utiliser les méthodes sismiques basées sur la dispersion des ondes de surface pour reconstituer les variations de l'épaisseur d'un sol le long d'une toposéquence. Outre cette application agronomique, la méthode excelle dans la caractérisation géotechnique des sols pour l'aménagement (Bitri *et al.*, 2011). Rochat *et al.* (*in press* ; *figure 3*), utilisent la même approche pour

spatialiser l'épaisseur du sol sur de grands domaines afin d'y étudier la susceptibilité à l'érosion en Normandie. Plus rapide qu'un sondage à la tarière, cet exemple montre que le développement d'une méthode permettant une acquisition et un traitement des données rapide peut servir à dériver des produits nouveaux comme des cartes de susceptibilité à l'érosion.

Peu développées actuellement dans les travaux de recherche mais offrant de réelles perspectives technologiques, les propriétés thermiques (Lejour, 2012) permettent de voir le sol comme un espace qui interagit avec les infrastructures énergétiques enfouies. Mais devant les difficultés de mesurer la conductivité ou la diffusivité thermique de façon non intrusive, des études sont en cours pour relier ces paramètres à d'autres quantités géophysiques, plus faciles à estimer à distance comme la résistivité électrique (Ma *et al.*, 2011). Cette problématique, très actuelle, reste un problème difficile si l'on veut réduire les incertitudes des estimations dans des gammes opérationnelles.

VOLS AÉROPORTÉS ET TÉLÉDÉTECTION SPATIALE: VERS PLUS DE RÉOLUTION SPATIALE ET SPECTRALE

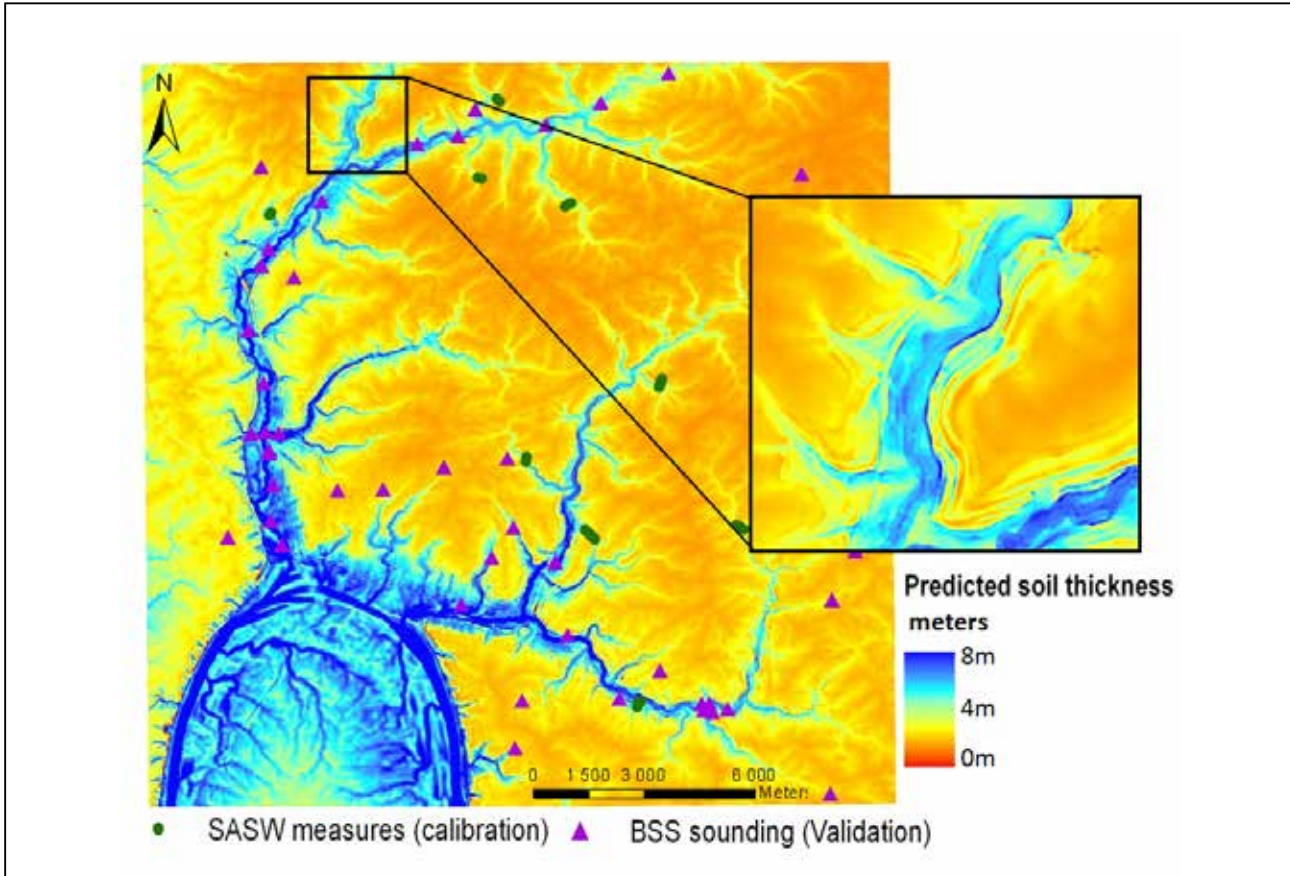
Devant l'intérêt grandissant de caractériser quantitativement de grandes surfaces afin d'y chercher des solutions globales en matière d'environnement, d'aménagement ou de risque, les techniques de mesure distales, et notamment aéroportées, ont pris beaucoup d'essor. Si les vecteurs se sont démocratisés, rendant les plateformes plus accessibles, les capteurs ont eux aussi subi des innovations notables. Ainsi, la gamme spectrale des caméras s'est vue élargie à l'infrarouge jusqu'à 2.5 μm , rendant possible la caractérisation minéralogique. Ce genre d'application s'est étendu à la cartographie des argiles (Gomez *et al.*, 2012 ; *figure 4*) et à l'estimation du contenu en matière organique (Vaudour *et al.*, 2012 ; Stevens *et al.*, 2006). L'utilité de la spectroscopie pour des problèmes environnementaux a aussi été démontrée par Kopacková *et al.* (2011), surtout en matière de caractérisation d'anciens sites miniers. Tous ces travaux ont pour but de mieux connaître les performances des techniques spectroscopiques, ainsi que leurs divers champs d'application, de façon à préparer l'arrivée du prochain capteur satellitaire hyperspectral.

Dans le domaine des mesures aéroportées, nous pouvons aussi citer des projets ayant pu déboucher sur l'acquisition de données gammamétriques et électromagnétiques à l'échelle régionale. Ainsi, le projet Guyane³ a permis d'explorer les capacités de la méthode pour une aide à la cartographie géologique, grâce notamment au développement de méthodes de classification élaborées (Viscarra -Rossel *et al.*, 2006). Depuis

3 http://gisyuyane.brgm.fr/sig_geophysique96.htm

Figure 3 - Carte de l'épaisseur de sol dans la région Nord de Rouen (Normandie) prédite à partir d'un modèle utilisant des mesures sismiques et des données auxiliaires spatialisées (BSS: Banque du Sous-Sol) comme le modèle numérique de terrain et ses dérivées (Rochat et al., in press).

Figure 3 - Map of soil depth in the northern region of Rouen (Normandy) predicted from a model using seismic measurements and other spatial data (from a data base BSS) as the digital terrain model and its derivatives (Rochat et al., in press).



plusieurs autres initiatives ont vu le jour, notamment en région Centre et en Bretagne (Martelet et al., 2006).

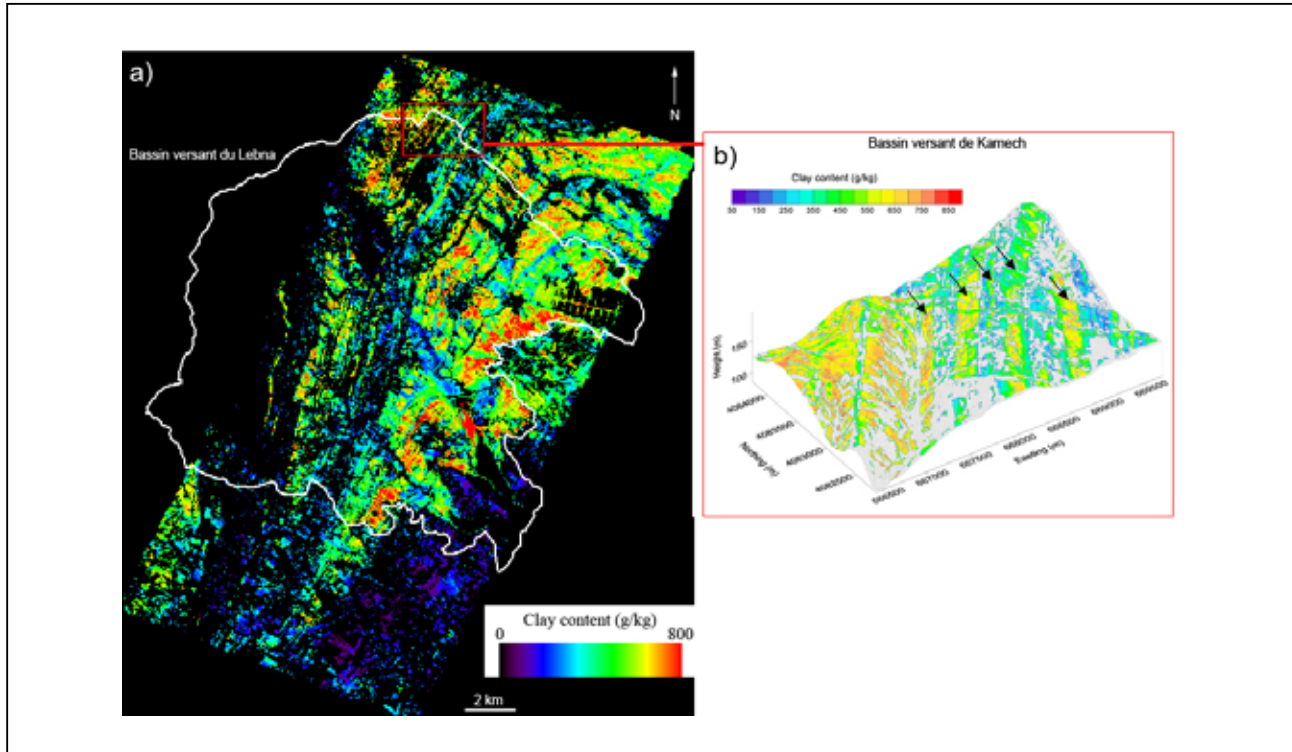
Ces différents travaux de recherche mettent en avant des besoins d'observation et de caractérisation sur des zones étendues, tout en gardant une résolution compatible avec les problèmes à traiter: sub-kilométrique pour la cartographie géologique, pluri à infra-décamétrique pour les applications risque et environnement. Cette recherche en résolution spatiale s'accompagne (i) d'une amélioration technologique des capteurs, qui voient augmenter leur nombre de bande ou de fréquence, (ii) d'une combinaison des sources débouchant sur un mode d'acquisition multi-capteur permettant de combiner les informations lors des traitements.

PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS

Suivant les problématiques traitées, la caractérisation des sols par méthodes géophysiques s'opère depuis l'échelle locale de l'échantillon, jusqu'à l'image de télédétection en passant par différentes tailles de dispositifs au sol. De même, les modèles issus des protocoles d'inversion ou d'imagerie peuvent être bi ou tridimensionnels et intégrer ou pas la composante temporelle. Cette diversité dans les échelles d'étude, la complexité des dispositifs de mesure et des modèles soumis aux interprétations peuvent apparaître comme autant de difficultés que seuls les spécialistes peuvent résoudre; mais cette haute technicité offre aussi des avantages notables comme la possibilité de réaliser des sauts d'échelle dans les modèles, de valider des anomalies avec différentes méthodes, de les suivre dans le temps, d'intégrer des observations de différentes natures dans des modèles cohérents, etc.

Figure 4 - a) Carte globale du taux d'argile (g kg^{-1}) prédit par spectrométrie aéroportée VNIR avec délimitation du bassin versant du Lebna (ligne blanche). b) Carte en 3D du taux d'argile (g kg^{-1}) prédit par spectrométrie aéroportée sur le bassin versant élémentaire de Kamech. Les flèches localisent la succession d'affleurements de marne (Gomez et al., 2012).

Figure 4 - a) Global map of clay content (g kg^{-1}) predicted by airborne VNIR spectrometry with boundary of the watershed of Lebna (white line). b) 3D map of clay content (g kg^{-1}) predicted by the airborne spectrometry of the elementary watershed of Kamech. The arrows locate the succession of outcrops of marl (Gomez et al., 2012).



Ces diverses approches restent scientifiquement intéressantes si l'on n'ignore pas les incertitudes liées aux capteurs, aux conditions de mesure, aux traitements des données et à la chaîne d'inversion qui produit l'information exploitable. En effet, beaucoup des protocoles utilisés couramment ne restituent pas les erreurs qui sont alors reprises dans les interprétations et mettent ainsi à mal les hypothèses finalement soutenues. Bien que certains résultats soient déjà présentés en prenant en compte ces aspects, un effort reste à faire pour qu'ils soient intégrés systématiquement dans les futures études et projets de recherche.

Une fois les modèles établis et qualifiés en matière d'incertitude, il peut s'avérer important de les combiner pour en tirer la meilleure interprétation. La fusion de données multicapteurs reste encore peu développée en géophysique bien que des travaux récents aient montré toute leur pertinence pour traiter des interprétations thématiques complexes (Grandjean, 2012). Le lien de ces modèles avec les nombreuses bases de données pédologiques reste aussi un challenge en termes d'assimilation de données: ici, la difficulté n'est plus de ne pas avoir

assez d'information, mais de savoir comment la combiner pour en tirer un diagnostic le plus fiable possible; outre l'intégration des incertitudes, la nature très différente de ces données dans le processus de fusion ouvre un immense pan de recherche.

Enfin, ces modèles, aussi complexes soient-ils, méritent d'être exploités à leur juste valeur. En effet, il convient de livrer aux thématiques l'information adaptée à leur problème. Que ce soit par le biais de fonction de transfert - qui peut transformer une carte géophysique (de résistivité par exemple) en carte thématique (d'humidité par exemple) directement exploitable - ou d'actions de sensibilisation visant à expliciter les concepts géophysiques de base à des communautés non spécialistes, l'appropriation de ces techniques, et de ce fait leur démocratisation, permettra de faire en sorte que leurs futurs développements restent en phase avec les besoins.

BIBLIOGRAPHIE

- Ben-Dor, E., 2002. Quantitative remote sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*, 75, pp. 173-243.
- Bendjoudi, H., Weng, P., Guérin, R. and Pastre, J.F., 2002. Riparian wetlands of the middle reach of the Seine River (France): historical development, investigation and present hydrologic functioning, a case study. *Journal of Hydrology*, 263, pp. 131-155.
- Besson, A., 2007. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de résistivité électrique. Thèse de l'Université d'Orléans.
- Bitri, A., Brûlé, S., Javelaud, E. and Samyn, K., 2011. Assessment of soils compaction using multichannel analysis of surface waves. *Colloque GFHN Geofcan*, Orléans, 4 p.
- Brechet, L., Oatham, M., Wuddivira, M. et Robinson, D., 2012. Détermination de la variabilité spatiale d'un sol de forêt tropicale non-perturbée et d'une plantation de tecks basée sur l'induction électromagnétique. 11eme Journées d'Etude des Sols, 19-23 mars 2012, Versailles, France.
- Buvat, S., 2012. Caractérisation de l'organisation spatiale de la couverture pédologique par mesure de la résistivité électrique. Application à la cartographie des sols en contexte agricole. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie-Paris 6.
- Citeau, L., Bispo, A., Bardy, M. and King, D., 2008. Gestion durable des sols. Quae Ed., Versailles, France, 319 p.
- Coulouma, G., Samyn, K., Grandjean, G., Follain, S. and Lagacherie, P., 2012. Combining seismic and electric methods for predicting bedrock depth along a Mediterranean soil toposequence. *Geoderma*, 170, pp. 39-47.
- Eckelmann, W., Baritz, R., Bialousz, S., Bielek, P., Carré, F., Houšková, B., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M., Kozak, J., Le Bas, C., Tóth, G., Tóth, T., Várallyay, G., Yli Halla, M., Zupan, M., 2006. Common Criteria for Risk Area Identification according to Soil Threats. European Soil Bureau Research Report N° EUR 22185 EN, 94 p.
- European Communities, 2002. Communication of 16 April 2002 from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Towards a Thematic Strategy for Soil Protection. COM 2002, 179 final. At <http://www.europa.eu.international/scadplus/printversion/en/lvb/l28122.htm> (last accessed 11 November 2004).
- Gomez, C., Lagacherie, P. et Bacha, S., 2012. Spatialisation de propriétés de sols par données aéroportées hyperspectrales sur le bassin versant du Lebna (Tunisie). 11eme Journées d'Etude des Sols, 19-23 mars 2012, Versailles, France.
- Grandjean, G., Hibert, C., Mathieu, F., Garel, E. and Malet, J.P., 2009. Monitoring water flow in a clay-shale hillslope from geophysical data fusion based on a fuzzy logic approach. *C. R. Acad. Sci.*, 341, pp. 937-948.
- Grandjean, G., Cerdan, O., Richard, G., Cousin, I., Lagacherie, P., Tabbagh, A., Van Wesemael, B., Stevens, A., Lambot, S., Carré, F., Maftei, R., Hermann, T., Thörnölöf, M., Chiarantini, L., Moretti, S., McBratney, A.B. and Ben Dor, E., 2010. DiGISOIL: An Integrated System of Data Collection Technologies for Mapping Soil Properties. *Proximal Soil Sensing, Progress in Soil Science*, 1, pp. 89-101.
- Grandjean, G., 2012. A multi-method geophysical approach based on fuzzy logic for an integrated interpretation of landslides: application to the French Alps. *Near Surface Geophysics*, 10, 6, 601-611.
- Guérin R., 2005. Borehole and surface-based hydrogeophysics. *Hydrogeology Journal*, 13, 1, pp. 251-254.
- Hinschberger, F., Chartin, C., Bourennane, H., Salvador-Blanes, S. et Macaire, J.J., 2012. Caractérisation géoélectrique des sols sur substrat hétérogène: application sur le site de Seully (France). 11eme Journées d'Etude des Sols, 19-23 mars 2012, Versailles, France.
- Hollis, J.M., Jones, R.J.A., Marshall, C.J., Holden, A., Van de Veen, J.R. and Montanarella, L., 2006. SPADE-2: The soil profile analytical database for Europe, version 1.0. European Soil Bureau Research Report No.19, EUR 22127 EN, 38 p.
- Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D. and Annan, A.P., 2003. Measuring soil water content with Ground Penetrating Radar a review. *Vadose Zone Journal*, 2, pp. 476-491.
- Journées d'Etude des Sols, 2012. Le sol face aux changements globaux. Actes du Colloque, Versailles, France, 444 p.
- Kessouri, P., 2012. Mesure simultanée aux fréquences moyennes et cartographie de la permittivité diélectrique et de la conductivité électrique du sol. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie-Paris 6.
- Kirkby, M.J., Jones, R.J.A., Irvine, B., Gobin, A., Govers, G., Cerdan, O., Van Rompaey, A.J.J., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., Grimm, M., Vieillefont, V., Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., Van Lynden, G.J. and Huting, J., 2004. Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, Version 1 October 2003. Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.73 (S.P.I.04.73). European Soil Bureau Research Report No.16, EUR 21176, 18 p.
- Kopacková, V., Chevrel, S. and Bourguignon, A., 2011. Spectroscopy as a tool for geochemical modeling. *Proc. SPIE 8181, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II*, 818106 (October 26, 2011); doi:10.1117/12.898404.
- Lejour, V-A., 2012. Résistivité thermique des sols: influence sur le dimensionnement thermique des liaisons souterraines. 11^{es} Journées d'Etude des Sols, 19-23 mars 2012, Versailles, France.
- Ma, R., McBratney, A., Whelan, B., Minasny, B., Short, M., 2011. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement. *Precision Agric*, 12, pp. 55-66.
- Martelet, G., Trufert, C., Tourliere, B., Ledru, P. and Perrin, J., 2006. Classifying airborne radiometry data with Agglomerative Hierarchical Clustering: A tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana). *Int. J. applied Earth Obs. and Geoinformation*, 8, 3, 208-223.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L. and Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 1-2, pp. 3-52.
- Minet, J., Lambot, S., Slob, E.C. and Vanclooster, M., 2010. Soil surface water content estimation by full-waveform GPR signal inversion in the presence of thin layers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 48, 3, pp. 1138 - 1150.
- Morin, M., Macaire, J.J., Hinschberger, F., Gay-Ovéjéro, I., Rodrigues, S., Bakyono, J.P. and Visset, L., 2011. Spatio-temporal evolution of the Choisille River (southern Parisian Basin, France) during the Weichselian and the Holocene as a record of climate trend and human activity in north-western Europe. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3-4, 347-363.
- Panagos, P., van Liedekerke, M. and Montanarella, L., 2011. Multi-scale European Soil Information System (MEUSIS): A multi-scale method to derive soil indicators. *Computational Geosciences*, 15, 3, pp. 463-475.
- Panissod, C., Dabas, M., Jolivet, A. and Tabbagh, A., 1997. A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: the "Vol-de-canards" array. *Geophysical Prospection*, 45, 6, pp. 983-1002.
- Rey, E., Jongmans, D., Gotteland, P. and Garambois, S., 2006. Characterisation of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 58, 3, pp. 188-201.
- Rochat, A., Grandjean, G., Cerdan, O., Samyn, K., *In press*. Large-scale soil thickness prediction using digital terrain modelling and seismic data: application to erosion hazard mapping. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Séger, M., Cousin, I., Frison, A., Boizard, H. and Richard, G., 2009. Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil and Tillage Research*, 103, 2, pp. 387-398.
- Stevens, A., van Wesemael, B., Vandenschrack, G., Touré, S. and Tychon, B.,

2006. Detection of carbon stock change in agricultural soils using spectroscopic techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 3, pp. 844-850.
- Tabbagh, A., Dabas, M., Hesse, A. and Panissod, C., 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizon. *Geoderma*, 97, 3-4, pp. 393-404.
- Thiesson, J., Tabbagh, A., Guérin, R., Dabas, M., Thiry, M. and van Oort, F., 2010. Geophysical assessment of soil volumes polluted with metal elements accumulated from long-term waste water irrigation, 16th meeting European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Near Surface - EAGE), Zurich (Suisse), 6-8 September.
- Thiesson, J., Rousselle, G., Simon, F.X. and Tabbagh, A., 2011. Slingram emi prospection: are vertical orientated devices a suitable solution in archaeological and pedological prospection? *Journal of Applied Geophysics*, 75, 4, pp. 731-737.
- Thiesson, J., Boulonne, L., Buvat, S., Jolivet, C., Ortolland, B. and Saby, N., 2012. Magnetic properties of the French soil monitoring network: first results, 18th meeting European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Near Surface - EAGE), Paris (France), 3-5 September.
- Thiry, M., Van Oort, F., Thiesson, J., Guérin, R. et Van Vliet-Lanoe, 2012. Morphologies périglaciaires de la plaine de Pierrelaye (95) : apports de la géophysique et impact sur la migration des polluants. 11^{es} Journées d'Etude des Sols, 19-23 mars 2012, Versailles, France.
- Vaudelet, P., Schmutz, M., Pessel, M., Franceschi, M., Guérin, R., Atteia, O., Blondel, A., Ngomseu, C., Galaup, S., Rejiba, F. and Begassat, P., 2011. Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods. A case study in urban context, *Journal of Applied Geophysics*, 75, 4, pp. 738-751.
- Vaudour, E., Gillot, J.M., Bel, L., De Junet, A., Michelin, J., Hadjar, D., Cambier, P., Houot, S. et Coquet, Y., 2012. Prédiction régionale des teneurs superficielles en carbone organique de sols cultivés périurbains au moyen de spectres de réflectance au champ mesurés en laboratoire et d'images satellitaires multispectrales. 11^{es} Journées d'Etude des Sols, 19-23 mars 2012, Versailles, France.
- Viscarra Rossel, R.A., Taylor, H.J., McBratney, A.B., 2006. Multivariate calibration of hyperspectral γ-ray energy spectra for proximal soil sensing. *European J. of Soil Science*, Volume 58, Issue 1, pp. pp. 343-353.

