

Potentiel de la spectrométrie gamma aéroportée pour la cartographie des sols et du régolithe :

une mini-revue et des premiers exemples en régions Centre et Limousin

B. Laroche⁽¹⁾, A.C. Richer de Forges⁽¹⁾, N.P.A. Saby⁽¹⁾, G. Martelet⁽²⁾, B. Tourlière⁽²⁾, J. DeParis⁽²⁾, F. Messner⁽¹⁾, J. Wetterlind⁽³⁾, J. Moulin⁽⁴⁾, D. Froger⁽⁵⁾ et D. Arrouays⁽¹⁾

1) INRA, US 1106, unité InfoSol, F-45075 Orléans CEDEX 2, France

2) BRGM, Direction des Géoressources, 3 av. Claude Guillemin, BP36009, 45060 Orléans CEDEX 2, France

3) Swedish University of Agricultural Sciences, department of soil and environment, PO Box 234, SE-532 23 SKARA, Suède

4) Chambre d'Agriculture de l'Indre, Maison de l'Agriculture, 24 rue des Ingrains - 36022 Châteauroux, CEDEX, France

5) Chambre d'Agriculture de l'Indre et Loire, 38 rue Augustin Fresnel, 37170 Chambray Les Tours, France

* : Auteur correspondant : Dominique.Arrouays@orleans.inra.fr

RÉSUMÉ

Cet article fait une première analyse du potentiel de la spectrométrie gamma aéroportée (SGA) pour la cartographie des sols et du régolithe. On présente tout d'abord le principe de cette méthode de mesure, sa couverture du territoire et une courte revue des applications qui ont été déjà réalisées en France et dans le monde en ce qui concerne la cartographie des sols et du régolithe. On présente ensuite trois essais méthodologiques qui ont été récemment menés en France, dans les régions Centre et Limousin. Ces applications montrent le caractère prometteur de l'utilisation de cette technique pour la cartographie numérique. La mise en œuvre de ces données dans divers contextes géologiques, géomorphologiques ou d'occupation du sol mérite d'être plus amplement évaluée, comme outil d'aide à la cartographie des sols.

Mots clés

Gamma-ray, radiométrie, cartographie des sols, pédogenèse, cartographie numérique, France.

SUMMARY**POTENTIAL OF AIRBORNE GAMMA-RAY DATA FOR MAPPING SOILS AND REGOLITH :****A mini-review and some preliminary examples in the centre of france**

This paper draws a first assessment of the potential of airborne gamma-ray spectrometry for mapping soil and regolith. First, we explain the principles of this method of measurement, we show the present coverage of the data for France and we present a short review of the applications that have already been produced in France and in the World for soil and regolith mapping. Then we present three recent tests that have been recently conducted in the French regions "Centre" and "Limousin". These tests show that using this technique for digital soil mapping is promising. Further assessment of the potential of these data for soil mapping should be conducted in various geological, geomorphological and land-use contexts.

Key-words

Gamma-ray, radiometry, soil mapping, pedogenesis, digital soil mapping, France.

RESUMEN**POTENCIAL DE LA ESPECTROMETRÍA GAMMA AEROTRANSPORTADA PARA LA CARTOGRAFÍA DE LOS SUELOS Y DEL REGOLITO: Mini-revista y primerosejemplos en regiones Centro y Limosín**

Este artículo hace un primer análisis del potencial de la espectrometría gamma aerotransportada (SGA) para la cartografía de los suelos y del regolito. Se presenta primeramente el principio de este método de medida, su cobertura del territorio y una corta revista de las aplicaciones que se realizaron ya en Francia y en el mundo en lo que concierne la cartografía de los suelos y del regolito. Se presenta después tres ensayos metodológicos que recientemente se desarrollaron en Francia, en las regiones Centro y Limosín. Estas aplicaciones muestran el carácter prometedor de la utilización de esta técnica para la cartografía numérica. La aplicación de estos datos en diversos contextos geológicos, geomorfológicos, o de uso de la tierra merece estar ampliamente evaluada, como herramienta de ayuda a la cartografía de los suelos.

Palabras clave

Rayos gamma, radiometría, cartografía de los suelos, pedogénesis, cartografía numérica, Francia

Face à l'augmentation des pressions (changement climatique, sécurité alimentaire et changement des modes d'alimentation, urbanisation et artificialisation, etc.), une meilleure gestion des sols à des échelles allant de la parcelle à celle du globe est plus que jamais nécessaire. Il existe également un besoin fort de spatialiser les paramètres du sol essentiels au fonctionnement des modèles globaux (cycles de C, N, P, H₂O...). Or, tant en Europe qu'à l'échelle mondiale, les données sur les sols sont fréquemment manquantes. Leur coût d'acquisition sur le terrain étant très élevé, il existe donc la nécessité de développer des outils de cartographie numérique permettant de réaliser des prédictions spatialisées de paramètres du sol, assorties de leurs incertitudes (Sanchez *et al.*, 2009). A l'échelle de la France, 25 % du territoire n'est pas encore couvert par des bases de données d'échelle inférieure ou égale au 1/250 000. Afin d'accélérer les travaux des Référentiels Régionaux Pédologiques il apparaît donc indispensable de développer des outils permettant la production de cartographies prédictives.

L'utilisation de la cartographie numérique des sols (DSM), fondée sur la science de l'information géographique, la statistique et la pédologie (McBratney *et al.*, 2003 ; Grinand *et al.*, 2008 ; Lacoste *et al.*, 2011 ; Minasny *et al.*, 2012), augmente sans cesse. Divers types de sources d'informations numériques sont de plus en plus utilisées pour cartographier les propriétés du sol ou des classes de sol. Parmi ces sources possibles, les données aéroportées radiométriques (gamma-ray) ont été utilisées avec succès pour la cartographie numérique des sols en Australie (Cook *et al.*, 1996 ; McKenzie et Ryan, 1999 ; McKenzie et Gallant, 2006) et en Angleterre (Rawlins *et al.*, 2007). Cette technique a montré notamment son efficacité pour prédire la texture des sols (Mayr *et al.*, 2001), leur type et l'âge de leur roche mère (Wilford et Minty, 2006 ; Rawlins *et al.*, 2007) ou encore la profondeur des sols (Wilford et Thomas, 2012) et l'épaisseur des tourbes (Rawlins *et al.*, 2009). Elle a permis d'évaluer la redistribution des particules du sol par l'érosion (Martz et de Jong, 1990) et l'intensité de l'altération (Wilford et Minty, 2006. Martelet *et al.*, 2006). Dans cette note, nous présentons dans un premier temps les principes de la radiométrie gamma, dans un deuxième temps nous illustrons son potentiel et ses limites par quelques exemples de travaux réalisés ou en cours dans la Région Centre et dans le Limousin.

PRINCIPE DE LA MÉTHODE ET COUVERTURE EN FRANCE

La majeure partie des informations renseignant sur l'acquisition et le traitement des données gamma provient du guide technique de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA), qui a pour but de promouvoir les usages pacifiques de l'énergie nucléaire. La spectrométrie gamma

aéroportée est une méthode de télédétection passive, où le rayonnement qui est mesuré provient d'un émetteur naturel : le sol. Plusieurs synonymes sont employés pour désigner cette technique. On parle de spectrométrie gamma aéroportée (SGA), gammamétrie aéroportée, radiométrie spectrale aéroportée... En anglais, les termes airborne gamma-ray spectrometry, gamma radiometrics sont couramment employés.

Cette technique repose sur le principe de la détection de photons gamma émis par désintégration radioactive de radio-isotopes naturels présents dans les roches et les sols. Il s'agit donc d'une méthode d'acquisition géophysique qui renseigne sur une information géochimique. Cette information dérive des propriétés radioactives de certains éléments présents dans les sols et les roches. Nous en expliquons ci-après plus en détail le principe.

Tout échantillon radioactif suit une loi statistique de décroissance radioactive au cours du temps. On parle de demi-vie d'un élément radioactif, qui exprime la période au cours de laquelle l'isotope radioactif a perdu la moitié de son activité par désintégration naturelle. Lors de sa désintégration, le noyau perd de la masse et cela s'accompagne d'un dégagement d'énergie sous forme de rayonnement. En fonction de la transformation du noyau mise en jeu, se dégage un rayonnement α , β ou γ . Les rayonnements α et β , relativement peu énergétiques, sont très rapidement atténués et ne peuvent donc être mesurés qu'à quelques millimètres à centimètres des sources. Le rayonnement γ en revanche, beaucoup plus énergétique, peut traverser plusieurs dizaines de mètres d'air et peut ainsi être mesuré depuis un avion volant à basse altitude – classiquement inférieure à 150 m.

Potassium, Uranium et Thorium sont les seuls éléments naturels qui, par leurs désintégrations, produisent des rayons gamma avec suffisamment d'énergie et d'intensité pour être mesurés. La teneur en potassium est mesurée directement par la désintégration radioactive de ⁴⁰K à 1,46 MeV. La mesure de l'uranium et du thorium est réalisée sur des raies spectrales dérivant d'éléments fils dans leurs chaînes de désintégrations respectives : le Thallium (²⁰⁸Tl) et le Bismuth (²¹⁴Bi). Pour cette raison, on parle d'équivalent Thorium (eTh) et d'équivalent U (eU). Étant donné que les rayons gamma sont fortement atténués dans l'air et encore plus dans le sol et les roches, le rayonnement mesuré provient pour 90 % environ des 30 à 40 premiers centimètres de la surface (). Les données sont ensuite corrigées des effets perturbateurs, entre autres l'effet du rayonnement cosmique (γ supérieurs à 3 MeV), et celui du radon atmosphérique (calibration par survol au-dessus d'étendues d'eau, qui écrantent le signal). Le bruit statistique des spectres est également atténué, par traitement du signal en composantes principales (méthode NASVD) (Hovgaard et Grasty, 1997). Ces techniques maximisent le rapport signal/bruit et permettent de récupérer l'essentiel du spectre utile.

Le potassium est présent en grande quantité dans les sols,

sous forme adsorbée, ou bien inclus dans des minéraux (par exemple illite, feldspaths potassiques, micas, etc.). On conçoit donc aisément que sa signature radiométrique puisse traduire diverses propriétés (par exemple la teneur en argile), divers mécanismes de pédogenèse (illuviations, appauvrissements absolus, enrichissements absolus ou relatifs...), ou diverses caractéristiques des matériaux parentaux (minéralogie, superposition de matériaux aux signatures contrastées, etc.). L'uranium et le thorium, essentiellement portés par des minéraux accessoires ou en inter-foliaires argileux, sont également susceptibles de traduire une nature minéralogique ou une origine des matériaux ; ils peuvent également migrer sous l'effet de lessivages ou au contraire présenter des accumulations relatives.

D'une manière générale, il est ainsi admis que la source du rayonnement gamma provenant de la surface terrestre peut être décrite suivant 2 composantes, primaire et secondaire (Wilford et al., 1997). La source primaire est reliée à la géochimie et la minéralogie de la roche mère ; il s'agit de la concentration « native » issue de la roche saine. La source secondaire est associée à la modification de la réponse γ de la roche sous l'effet de l'ensemble des phénomènes de surface tels que l'altération, les redistributions et la pédogénèse, cette modification pouvant traduire plus spécifiquement les variations des types de sols.

A partir de ces informations, il est possible de supposer l'intérêt de l'insertion des données de SGA dans un modèle chorologique de prédiction des sols. En effet, les sources de rayonnement gamma fournissant à la fois des informations sur la distribution des radioéléments dans le sol proprement dit ainsi que sur le matériau parental, plus ou moins altéré, et donc plus ou plus moins similaire à la roche originelle. Cette approche est ainsi adoptée par McBratney et al. (2003) qui considèrent la spectrométrie gamma aéroportée comme un outil particulièrement intéressant pour la cartographie numérique des sols. Ils assimilent les données de radiométrie gamma à un substitut du matériau parental dans lequel le sol s'est développé (facteur P du modèle SCORPAN, McBratney et al., 2003), ou à une information relative sur la composition minéralogique et texturale du sol lui-même (facteur S).

Un autre grand intérêt de la spectrométrie gamma réside dans le fait que les rayons gamma ne sont que modérément atténués par le couvert végétal (Wilford et al., 1997 ; IAEA, 2003) Cette propriété permet de « lire » le sol à travers la végétation et ainsi d'accéder directement à une information pédo-lithologique quelle que soit la couverture végétale. Elle est soulignée par les travaux de Martelet et al., (2006) qui ont utilisé des données de radiométrie γ pour effectuer une cartographie géologique d'une portion de la Guyane française (forêt équatoriale). Cet accès direct à la signature radiométrique des sols dans un contexte de couvert végétal dense n'est pas permis par les capteurs optiques (Landsat, Spot, hyperspectral...).

L'ensemble de ces considérations montre bien que la SGA constitue une source d'information spatialement exhaustive sur une région d'étude, qui présente *a priori* un intérêt certain pour être employée en tant que variable auxiliaire pour la cartographie numérique des sols.

La couverture actuelle des levés aéroportés en France métropolitaine est présentée ci-dessous (figure 1). Les 2/3 nord de la Guyane sont également couverts. Le BRGM a réalisé l'intégralité de ces acquisitions depuis 1996, pour ses besoins propres de connaissance géologique, cartographie du régolithe et diverses applications de reconnaissance des ressources minières et en matériaux du proche sous-sol. Le BRGM promeut une poursuite de ce programme d'acquisitions, mené en concertation avec les organismes et universités, désormais principalement à l'échelle régionale.

LES LEVES AEROPORTES UTILISES

Dans les exemples qui suivent, nous utilisons deux levés aéroportés.

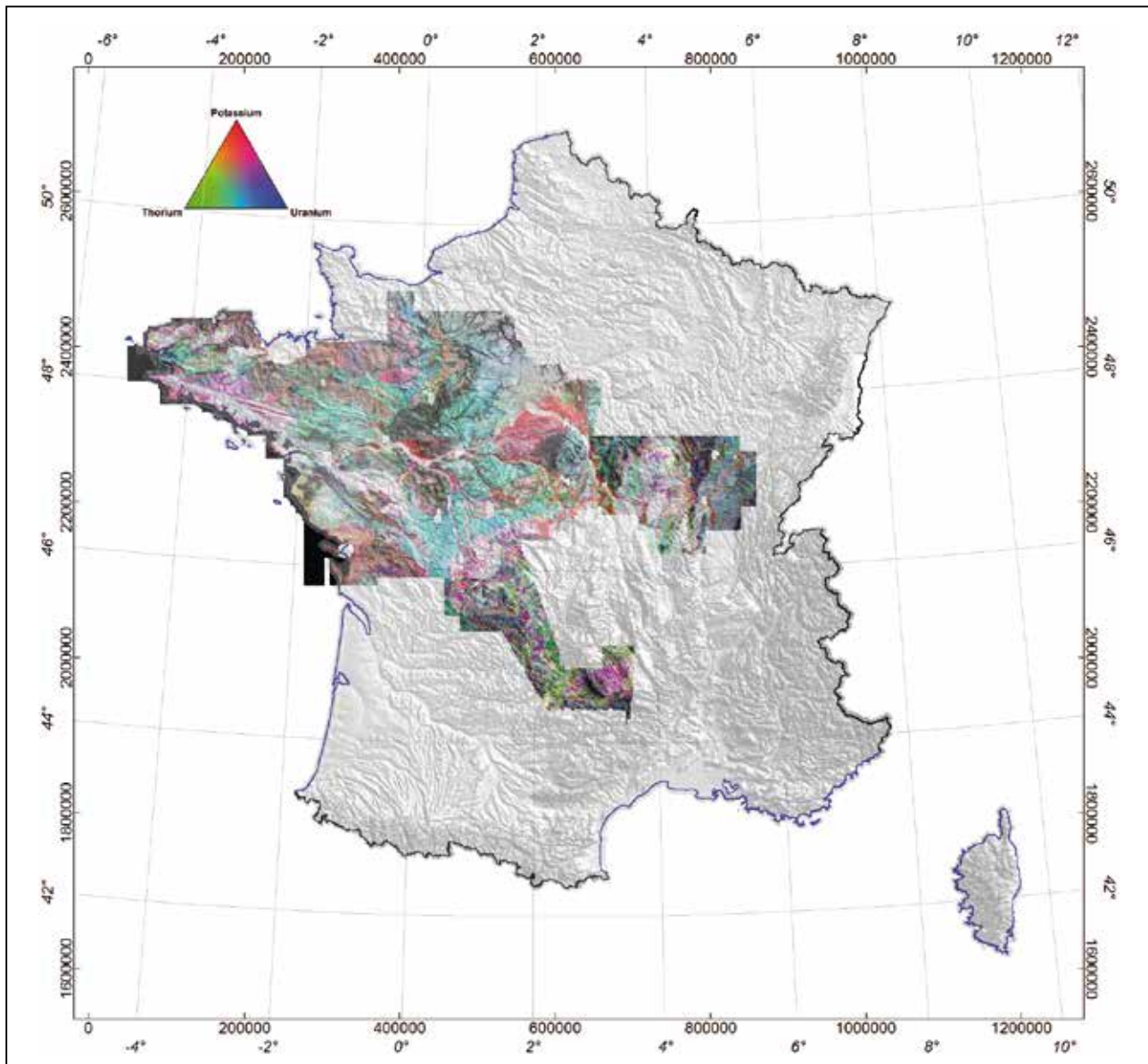
Un levé radiométrique aéroporté à haute résolution a été réalisé au cours du deuxième semestre de 1999, couvrant les bordures ouest et sud du Massif central. Le levé a été réalisé durant l'été, avec un plan de vol à 100 m d'altitude et des lignes de vol espacées de 1 000 m. Les mesures ont été interrompues durant les jours pluvieux. L'ensemble des pré-traitements a été effectué par le BRGM selon les recommandations de l'IAEA (IAEA, 1991 ; IAEA, 2003).

Le deuxième levé aéroporté concerne la région Centre et a été réalisé durant l'automne et l'hiver 2008-2009, avec des lignes de vol espacées de 1 000 m. Comme il était attendu un signal faible dans ce contexte sédimentaire, les vols ont été réalisés à très basse altitude (80 m) et avec un détecteur de gros volume (50 litres) pour en augmenter la sensibilité.

Pour ces deux levés, les spectres d'énergie gamma-ray ont été acquis à l'aide d'un détecteur constitué de cristaux de NaI et avec un taux d'échantillonnage d'un enregistrement par seconde, ce qui permet d'obtenir une résolution spatiale d'un enregistrement chaque 70 m le long des lignes de vol. Les données de SGA ont été traitées selon les recommandations de l'IAEA (IAEA, 1991 ; IAEA, 2003). Enfin, les données ont été maillées avec un espacement de 250 m, à l'aide d'un algorithme standard quadrillant bidirectionnel, afin de minimiser les effets parasites induits par l'anisotropie de répartition des données. Quatre grilles de données en sont issues : K, eTh, eU et le comptage total.

LES SECTEURS ÉTUDIÉS

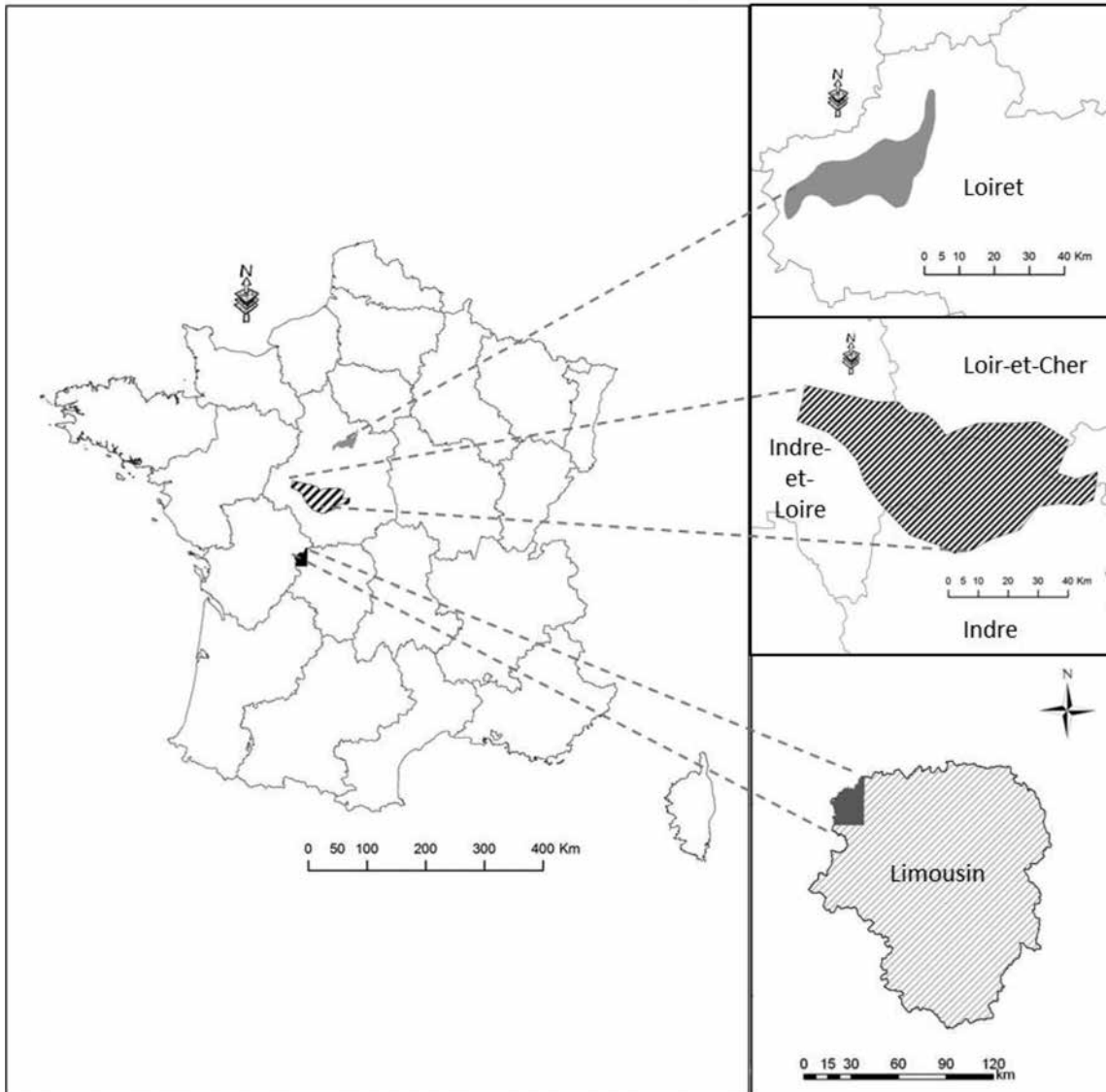
Dans les exemples présentés, nous nous concentrons sur trois zones test (figure 2).

Figure 1 - Etat de la couverture de SGA en France.**Figure 1** - Current coverage of airborne gamma-ray surveys in France.

En Limousin, nous avons choisi une surface de 38 375 ha (*figure 2*), où une carte de sol traditionnelle au 1 : 50, 000 était disponible (Carte de Bellac (Blaskiewicz, 1992)). Nous nous sommes concentrés sur les types de sols rencontrés sur les deux des principaux matériaux parentaux rencontrés dans ce secteur : gneiss et schistes. Même s'ils sont développés sur ces matériaux parentaux différents, les sols présentent dans les deux cas divers degrés de développement en fonction de leurs conditions édaphiques. Les sols ont été classés selon le Référentiel Pédologique (AFES, 2008), avec une correspondance dans la base de référence mondiale pour

les sols (SISSM Working Group WRB, 2006), en 5 grands types montrant un gradient dans l'intensité de la pédogenèse (LITHOSOL (Nudilithic Leptosols), RANKOSOL (Leptosols (Dystric), BRUNISOL DYSTRIQUE (Cambisols (Dystric)), NEOLUVISOL (Cambisols Luvic), LUVISOL (Haplic Luvisols). D'autre part, en se fondant sur des zones d'apprentissage sélectionnées sur les cartes existantes, nous avons mené un exercice de cartographie numérique prédictive en utilisant des arbres de régression (voir par exemple, Grinand *et al.*, 2008 ; Lemerrier *et al.*, 2011). Cette approche est fondée sur la reconnaissance de signatures caractéristiques établies sur

Figure 2 - localisation des études
Figure 2 - Location of the studies



des secteurs d'apprentissage et recherchées dans un jeu de données constitué des variables classiquement utilisées dans ce type de démarche (cartes géologiques numérisées, dérivées du MNT...).

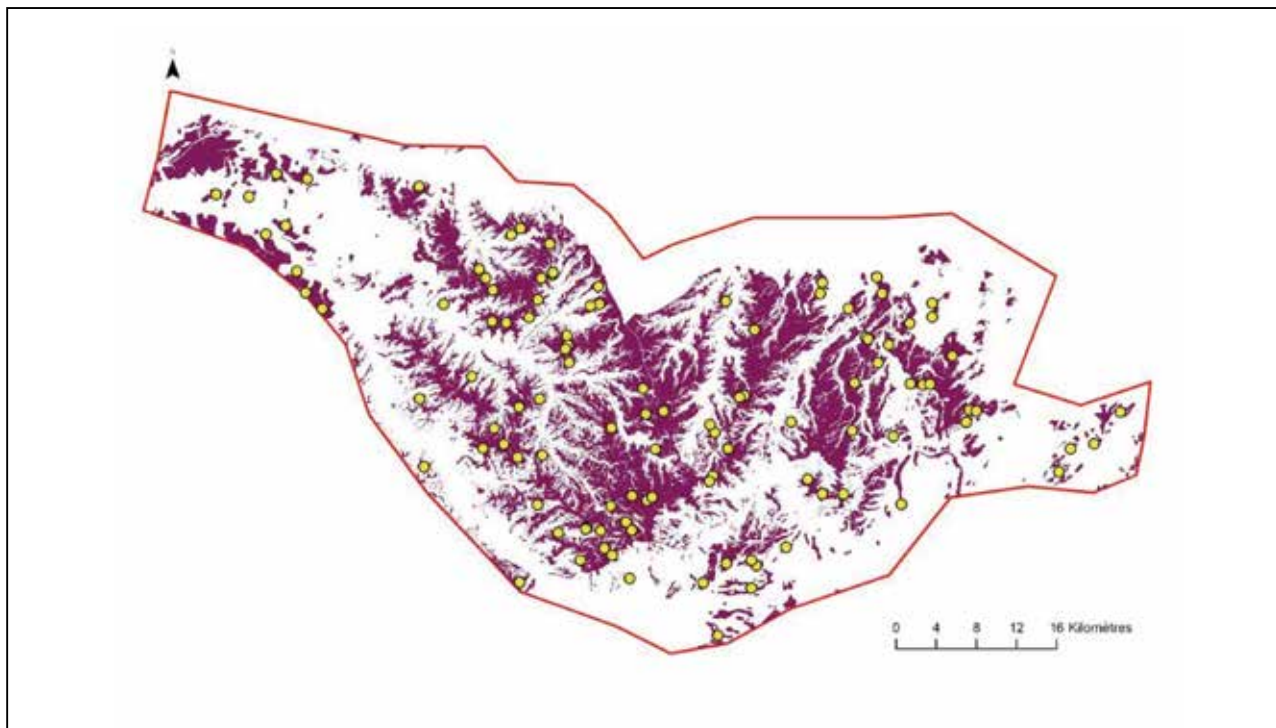
En région Centre, nous avons étudié dans le Loiret une zone d'environ 54 170 ha correspondant principalement à la région de « petite Beauce » sur laquelle une carte des sols à 1 : 50 000 est également disponible (Richer de Forges et Verbèq, 2003). Cette dernière a été utilisée pour établir le Référentiel Régional Pédologique du Loiret (Richer de Forges *et al.*, 2008). Cette information sera mobilisée sur des travaux en cours à

l'échelle du département. Nous avons sélectionné cette zone car, d'une part, nous pensions que les signatures spectrales permettraient d'aider à la discrimination de superpositions de limons éoliens peu épais reposant sur le calcaire de Beauce et, d'autre part, nous voulions mener un travail d'échantillonnage couplé entre des sols de la forêt d'Orléans et ceux de sa lisière afin de mettre en évidence un effet éventuel de la couverture ou des usages du sol sur le signal radiométrique.

Nous nous sommes par ailleurs concentrés sur une autre surface d'environ 283 600 ha localisée sur les départements de l'Indre et de l'Indre-et-Loire, présentant de forts contrastes

Figure 3 - Carte de localisation des profils utilisés avec en violet la localisation des plateaux limoneux étudiés.

Figure 3 - Location of the profiles (in yellow) and of the loessic plateaus (in violet).



d'intensité de la pédogenèse en contexte limoneux recouvrant les faciès à silex du Crétacé (Turonien et Sénonien), et pour laquelle des données surfaciques et ponctuelles étaient également disponibles (couche graphique de la base 1/50 000 de l'Indre et de l'Indre-et-Loire).

ECHANTILLONNAGE ET TRAITEMENTS

Les données radiométriques et les cartes des sols ont été traitées dans un logiciel SIG : ArcGis. Pour chaque combinaison de type de sol et matériel parental, les données radiométriques ont été extraites. Une valeur moyenne et un écart-type du signal radiométrique de chaque combinaison de type de matériau de sol parental ont été calculés. Des moyennes et des écarts-types des ratios d'éléments ont été également calculés.

Pour le secteur du Loiret, 26 couples de points situés de part et d'autre de la lisière de la forêt ont été prélevés, en s'assurant par description pédologique *in situ* et par analyse en laboratoire qu'ils correspondaient bien à des textures, des types de sol et des matériaux parentaux identiques. Ces couples ont également été analysés en laboratoire pour déterminer K, U et Th totaux sur une couche correspondant à une profondeur fixe de 0 à 30 cm.

Pour le secteur situé en Indre et Indre-et-Loire, 112 profils pédologiques présents sur les plateaux limoneux ont été sélectionnés (*figure 3*) et classés en catégorie d'intensité de pédogenèse croissante (BRUNISOL luviqque > NEOLUVISOL > LUVISOL > LUVISOL dégradé rédoxique > LUVISOL dégradé rédoxique à fonctionnement planosolique > REDOXISOL et REDUCTISOL > PLANOSOL). Ils ont ensuite été renseignés par la signature radiométrique des pixels au sein desquels ils étaient localisés. De la même façon qu'en Limousin, une valeur moyenne et un écart-type du signal radiométrique de chaque combinaison de type de sol ont été calculés. Des moyennes et des écarts-types des ratios d'éléments ont été également calculés (*figure 4*).

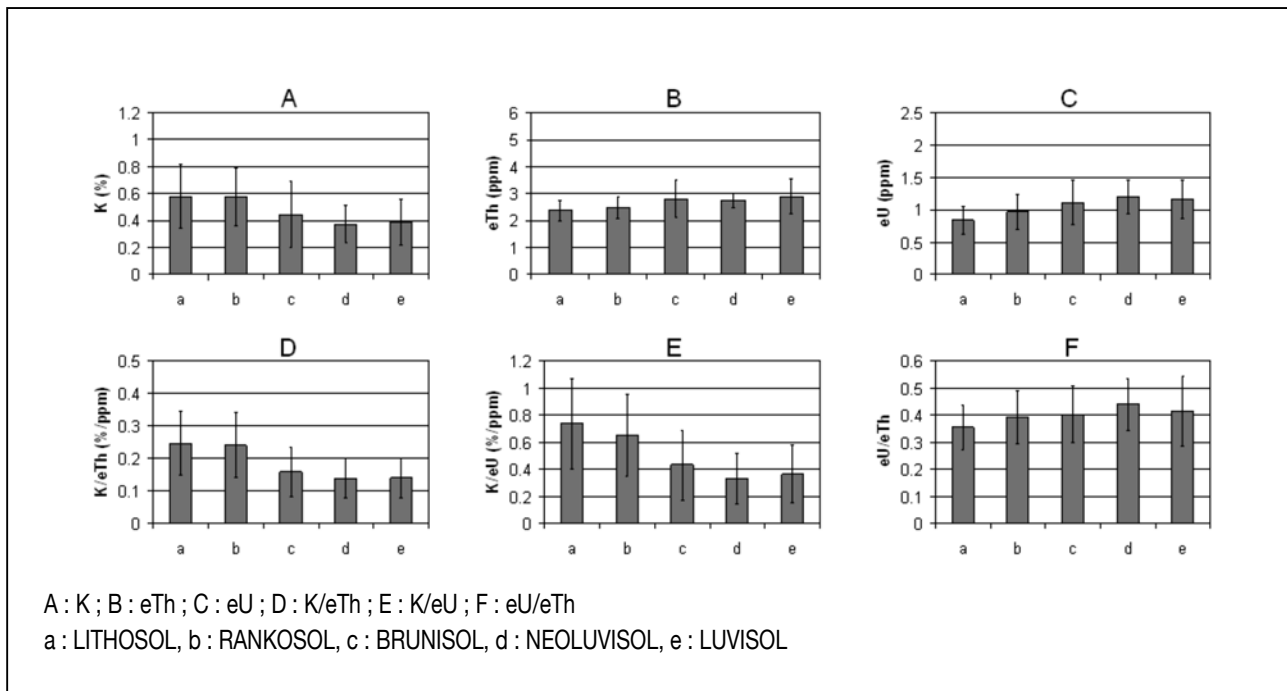
EXEMPLES DE RÉSULTATS ET DISCUSSION

Exemple de la carte de Bellac

Les résultats qui suivent se basent sur l'utilisation des statistiques zonales que l'on peut définir comme une méthode d'analyse spatiale faisant ressortir des caractéristiques

Figure 4 - Histogrammes des différents paramètres suivant l'évolution de sols développés sur Schistes.

Figure 4 - Histograms of the gamma-ray measurements according to the soil evolution on Schist parent material.



statistiques. Plus précisément, il s'agit d'une opération qui extrait une statistique pour une zone donnée, à partir des valeurs des pixels se trouvant à l'emplacement de cette zone sur une couche matricielle. Chaque unité cartographique définie sur Bellac est caractérisée par un seul type de sol : nous sommes dans le cas d'UCS dites simples. Nous présentons ici des résultats obtenus sur deux formations géologiques : les gneiss et les schistes.

Pour réaliser ce travail, nous nous sommes focalisés sur la relation pouvant lier les ratios γ à l'évolution pédogénétique. Cette évolution a été appréhendée au travers d'une succession de types de sols, développés sur le même substrat géologique, et exprimés selon la terminologie du Référentiel Pédologique (Afe, 2008). L'ordre de la séquence de types de sols suit le degré d'évolution croissante suivant : LITHOSOL, RANKOSOL, BRUNISOL, NEOLUVISOL, LUVISOL. Les Figures 4 et 5 présentent différents histogrammes de la distribution des données radiométriques en fonction des différents types de sols.

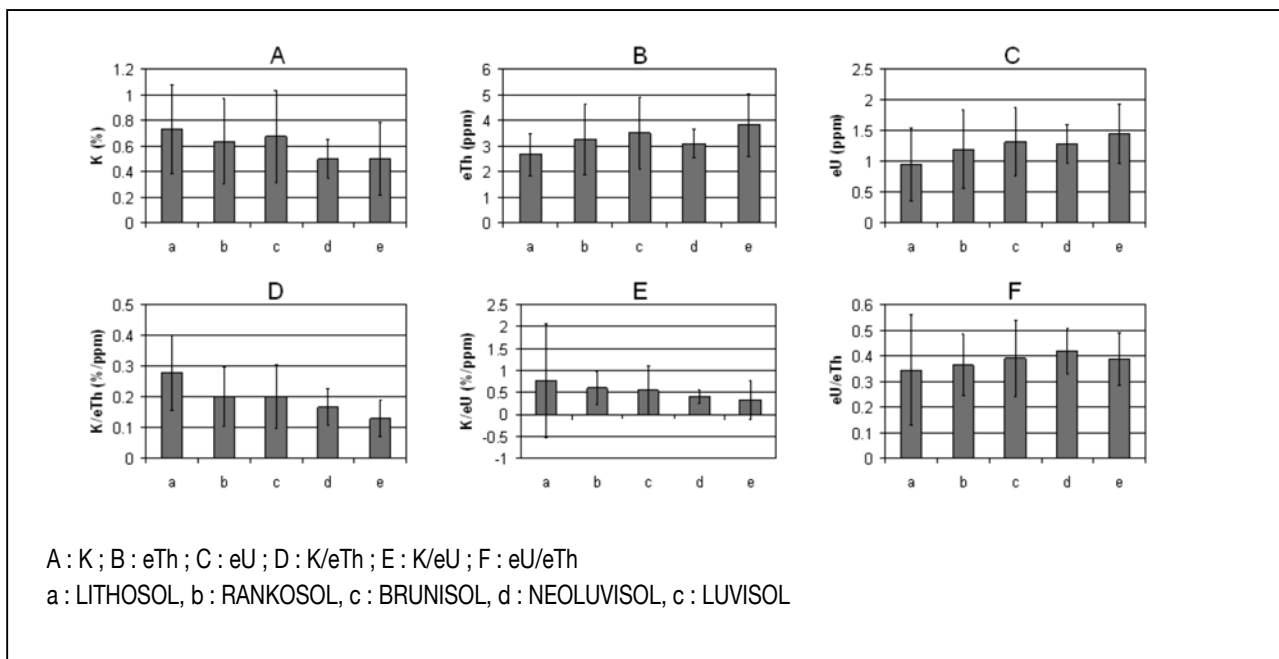
Le potassium montre généralement des valeurs plus faibles sur les sols évolués que sur les sols peu évolués, ce qui confirme ce qui avait été montré par Dickson et Scott (1997), et qui traduit très probablement l'effet de l'appauvrissement progressif en argile.

Les histogrammes D représentent la moyenne et l'écart-type du ratio K/eTh suivant l'évolution des types de sols développés dans un matériau parental donné. Il met en évidence la variation

progressive de ce ratio suivant un degré d'évolution croissant. L'évolution de ce ratio témoigne des comportements généraux affectant chacun des radionucléides soumis à des conditions d'altération ou de différenciations pédologique. On observe que le contraste géochimique est accentué au fur et à mesure de l'évolution du sol (K/eTh diminuant). La figure 5 suggère que cette phase de différenciation se produit principalement pour les stades ultimes de l'évolution, allant du BRUNISOL au LUVISOL, en passant par le NEOLUVISOL.

En dehors du fait qu'ils présentent la même évolution générale du contraste géochimique, l'intérêt de la présentation des 2 séries d'histogrammes se justifie par la différence entre les 2 substrats (Schistes et Gneiss) dans la manière dont s'effectue la dispersion des valeurs autour de la moyenne. Les signatures au sein d'un même type de sol peuvent fluctuer considérablement et être plus ou moins variables selon le matériau original. Ces variations importantes peuvent s'expliquer par la complexité des phénomènes à l'origine de la formation des sols, et également par la diversité texturale et structurale pour un même type de sol. De plus, des apports allochtones locaux (apports éoliens, de matière organique, d'engrais...) peuvent éventuellement modifier la réponse géochimique.

Les essais de cartographie numérique montrent le poids que peuvent représenter les données SGA dans la prédiction des types de sol dans cette région (figure 6). Comme attendu eu

Figure 5 - Histogrammes des différents paramètres suivant l'évolution de sols développés sur Gneiss.**Figure 5** - Histograms of the gamma-ray measurements according to the soil evolution on Gneiss parent material.

égard aux résultats précédents, le rapport K/Th et la variable K arrivent en premières positions des variables radiométriques discriminantes.

Les essais menés en enlevant ou en ajoutant les variables géologiques et les variables radiométriques (non présentés ici, Messner 2008) ont montré que l'apport de la radiométrie gamma et de la carte géologique harmonisée avaient dans ce cas des poids sensiblement similaires. Par rapport à la situation générale en France et dans le monde, la radiométrie gamma présente cependant l'avantage d'être *a priori* harmonisée et non subjective, et de donner des résultats quantifiés pouvant traduire des gradients ou des variations qu'une carte fondée sur une discrétisation en polygones ne peut mettre en évidence.

Exemple dans le Loiret

Les travaux menés dans le Loiret ont permis de montrer une des limites à l'utilisation de ces données, ou du moins l'existence d'un biais lié aux usages et à l'occupation du sol, et qu'il convient donc de prendre en compte lors de l'utilisation de la radiométrie gamma aéroportée.

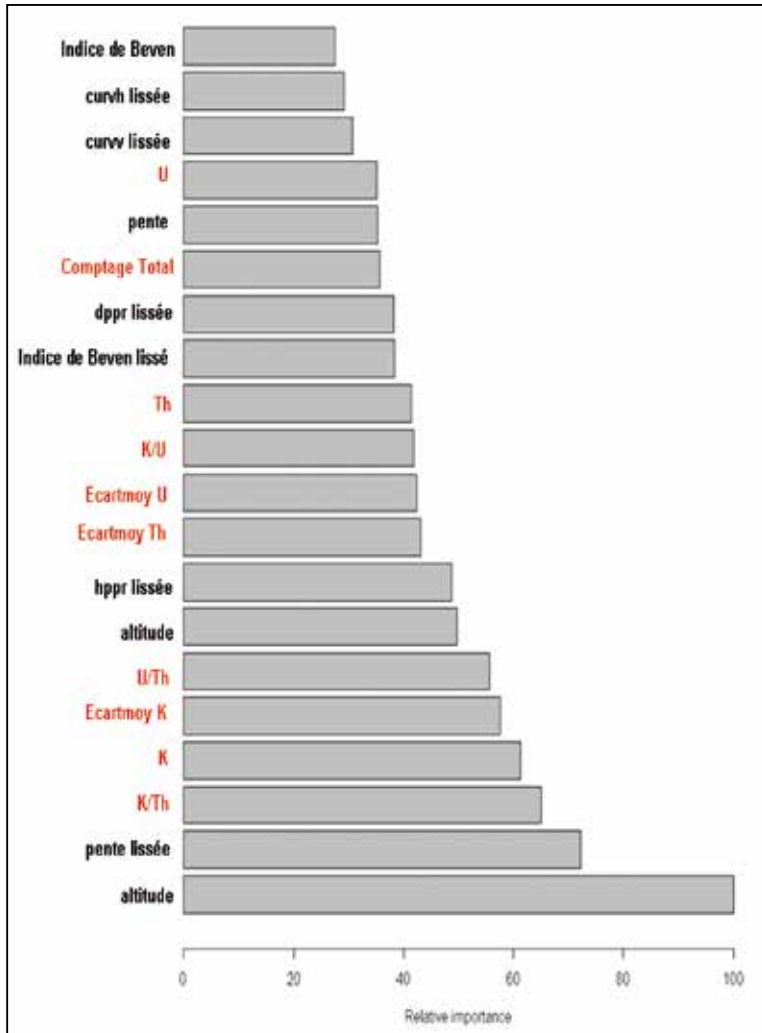
Un enrichissement en uranium a pu être montré dans les sols agricoles par rapport aux sols forestiers (Wetterlind *et al.*, 2012a). Cet enrichissement a été observé à la fois dans les mesures de SGA (en moyenne +0,16 mg.kg⁻¹) et dans les analyses de sol (en moyenne +0,19 mg.kg⁻¹) et ce avec des ordres de grandeur tout à fait similaires. Cet enrichissement

n'a par contre pas été observé pour le thorium et le potassium, ce qui suggère un effet des usages du sol (en particulier au travers de l'utilisation de phosphates naturels, dont on sait qu'ils contiennent des quantités non négligeable d'uranium). Un effet complémentaire d'atténuation par le couvert forestier n'a pas pu être totalement exclu, mais n'a pu être démontré. Afin de vérifier l'hypothèse d'un enrichissement *via* les engrais phosphatés, trois séquences d'essais de fertilisation phosphatée de longue durée ont été sélectionnés, dont deux en région Centre et un dans la Vienne, et nous avons eu recours aux échantillons archivés afin d'y analyser ces éléments et le P total. Les résultats (Wetterlind *et al.*, 2012b) ont confirmé des enrichissements en P et en U corrélatifs à des doses d'apport croissantes. Dans les données radiométriques et analytiques du Loiret, une forte variabilité au sein même d'un usage et d'un type de sol uniques a toutefois été observée. Ceci montre que des facteurs locaux de caractéristiques des sols (par exemple, faibles variations locales des textures, variation des épaisseurs de la litière ou des horizons O, teneur en matière organique...) ou plus conjecturaux (humidité, structure) peuvent aussi influencer sur le signal.

En ce qui concerne l'épaisseur des limons éoliens reposant sur le calcaire de Beauce, de premières observations (non publiées) semblent montrer une relation entre le signal SGA et cette épaisseur, ainsi que son potentiel pour détecter les sols caillouteux ou à calcaire sub-affleurant. Cette étude devra être approfondie et le signal SGA devra être combiné à

Figure 6 - Importance relative des variables auxiliaires de prédiction des unités typologiques de sol lors d'un des essais de cartographie prédictive (Curvh, Curvv, dppr, hppr et Indice de Beven Lissés sont issus de dérivées du MNT SRTM : courbures horizontales et verticales, distance et hauteur par rapport au plus proche réseau de drainage et indice de Beven respectivement, lissés sur une fenêtre de 300 m de diamètre ; Ecartmoy : écart moyen en valeurs issues de la SGA par rapport aux grands ensembles géologiques.).

Figure 6 - Relative importance of the ancillary variates used to predict soil units by digital soil mapping.



d'autres variables auxiliaires (comme par exemple l'intensité de la pente et son orientation (Bourennane et King, 2003) afin de tenter d'optimiser la prédiction de ces caractéristiques).

Exemple de l'Indre et de l'Indre-et-Loire

En classant les profils étudiés par degré d'intensité de la pédogenèse, nous observons des différences significatives dans le signal SGA (figure 7).

On note en particulier une tendance à l'augmentation des signaux, très marquée pour U et Th, des sols les moins évolués vers les luvisols. A l'inverse, lorsque la pédogenèse devient dominée par l'hydromorphie ou des phénomènes d'appauvrissement latéraux, le signal radiométrique est systématiquement plus faible. Les travaux en cours tentent de séparer l'effet des autres facteurs (occupations du sol notamment), afin de mieux mettre en évidence la part de la réponse du signal SGA liée à la pédogenèse.

CONCLUSIONS

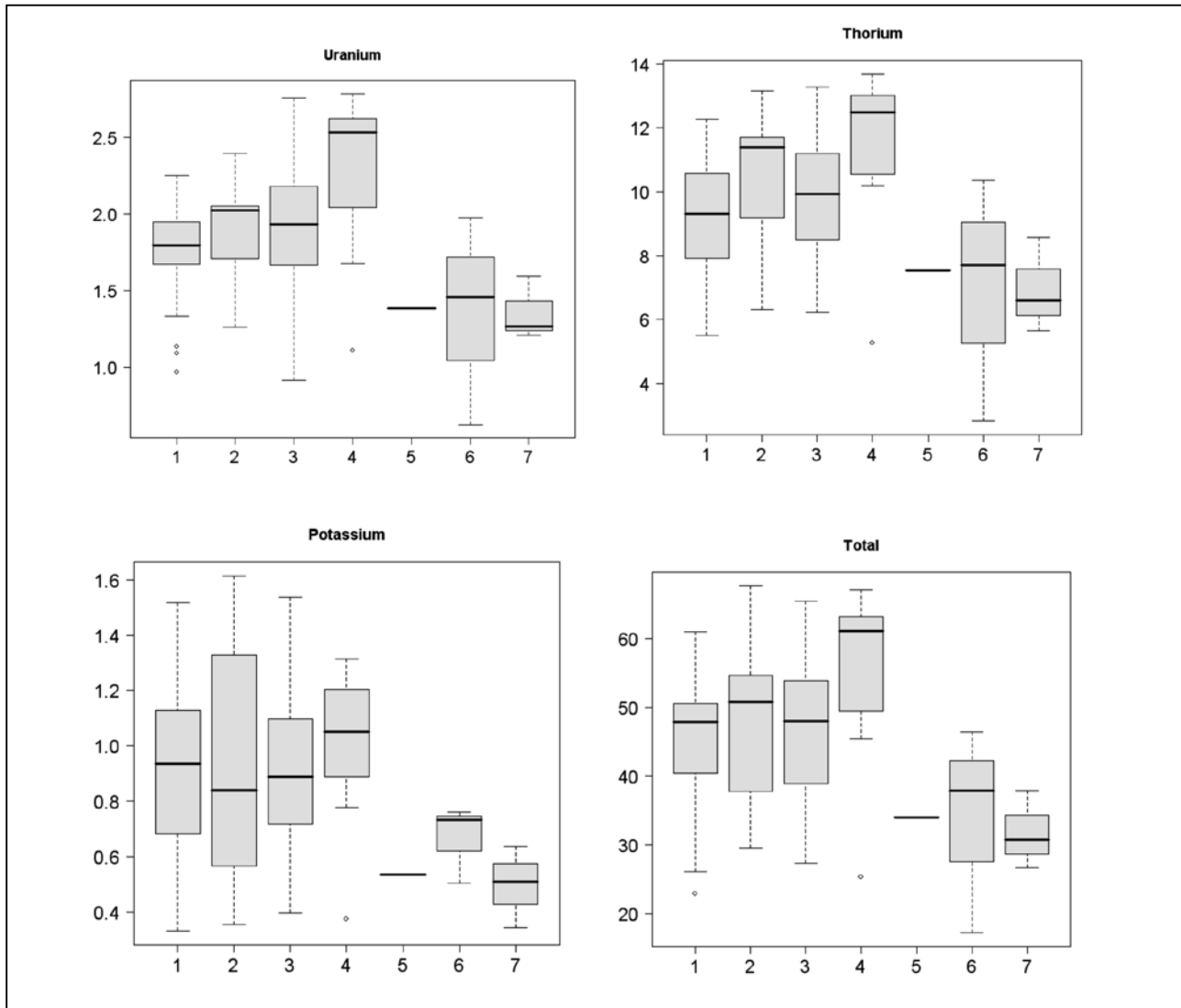
Le signal SGA présente un potentiel certain pour la cartographie des sols ou du régolithe. Une de ses limitations est toutefois sa faible profondeur d'investigation. Un autre résultat de la complexité et de l'imbrication des différents facteurs susceptibles d'affecter sa réponse. Toutefois, on peut considérer que la source primaire de variation, qui s'exprime sur de larges surfaces, provient de la géochimie et de la minéralogie du matériau parental (cas des sols dont la pédogenèse est peu évoluée (BRUNISOL à NEOLUVISOL)), soit de la concentration native de chacune des roches-mères. La source secondaire est liée à la modification de cette concentration originelle sous l'effet, tout d'abord, des phénomènes géomorphologiques qui initialisent la différenciation (composante secondaire géomorphologique), puis par la poursuite de cette différenciation sous l'effet des processus de la pédogenèse (composante « pédologique » secondaire). Des sources tertiaires peuvent être induites par des effets anthropiques ultérieurs, avec des apports historiques d'amendements calciques à base de scories de fonderies en sols acides.

L'intégration de ce type de données à d'autres types de données auxiliaires exhaustives, dans une démarche de cartographie numérique des sols, devrait contribuer ainsi logiquement à en améliorer la précision et la pertinence.

On peut supposer que cette affirmation prendrait encore plus de poids, si les données de SGA étaient acquises à des résolutions plus fines, qu'elles soient spatiales ou spectrales.

Figure 7 - Box plot des valeurs d'Uranium, de Thorium, de Potassium et du comptage total en fonction de l'intensité de la pédogenèse (1- brunisol, 2- neoluvisol, 3- luvisol, 4- luvisol dégradé rédoxisol, 5- luvisol à fonctionnement planosolique, 6- rédoxisol et rédoxisol, 7- planosol).

Figure 7 - Box-plot of values of U, Th, K, and total counts vs pedogenesis intensity. (1. Cambisol, 2) Luvic Cambisol. 3) Haplic Luvisol. 4) Albeluvisol. 5) Luvic Planosol. 6) Stagnosol-Gleysol. 7) Haplic Planosol.



En ce qui concerne ce dernier point, la spectroscopie γ offre le potentiel de caractériser des propriétés de sol en utilisant l'intégralité du spectre, soit l'ensemble des 256 canaux (Viscarra Rossel *et al.*, 2007). Investiguer l'utilisation des données gamma en conservant l'intégralité du spectre, comme en hyperspectral, discriminerait potentiellement mieux les propriétés, voire les types de sols.

Enfin, il est possible d'envisager la combinaison entre différents types de capteurs aéroportés et/ou satellitaires, afin d'en évaluer la complémentarité pour la détermination d'entités

pédologiques. Des applications de ce genre d'approche multi-capteurs ont déjà été publiées dans le domaine de la géologie (Schetselaar *et al.*, 2000). Pourquoi ne le seraient-elles pas dans celui de la pédologie ? Ainsi, il serait intéressant d'essayer de comparer la prédiction d'une propriété du sol (par exemple : la teneur en argile) dérivée de données gamma, à celle obtenue par les capteurs hyperspectraux optiques, qui ont déjà montré leur intérêt pour ce type d'approche dans le cas de sols nus.

REMERCIEMENTS

L'acquisition des données SGA utilisées dans ce travail a été co-financée par la Région Centre, le BRGM et des fonds européens FEDER. L'échantillonnage et la caractérisation des sols résulte de campagnes de cartographies menées dans le cadre du programme « Carte des sols de la Région Centre » (et de la Vienne) ainsi que dans le cadre du programme « Référentiel Régional Pédologique du Loiret », co-financés par les collectivités territoriales et les Chambres d'Agriculture des départements concernés, l'agence de bassin Loire-Bretagne, l'INRA et le ministère en charge de l'agriculture. Nous remercions tous les cartographes et tous les techniciens impliqués dans les campagnes de description et d'échantillonnage des sols, dans la préparation des échantillons et dans la réalisation des analyses. Les travaux sur la Région Centre ont également bénéficié de financements de la Région Centre, de la Direction Régionale de la Recherche et de la Technologie (DRRT), de l'INRA et de fonds européens FEDER. Ces travaux s'inscrivent également dans le cadre de l'Axe 2 du Réseau Mixte Technologique (RMT) Sols & Territoires.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 2008 - Référentiel Pédologique. Baize D et Girard MC (Coords.), Editions Quae, Paris, France, 405 p.
- Blaskiewicz, J., Cam, C., Courbe, C., 1992 - Feuille de Bellac : Carte des sols de la Vienne coupure 1929. Echelle : 1/50000. Chambre d'Agriculture de la Vienne.
- Bourennane H., King D., 2003 - Using multiple external drifts to estimate a soil variable. *Geoderma*, pp. 114,1-18.
- Cook S.E., Corner R.J., Groves P.R. and Grealish G.J., 1996 - Use of airborne gamma radiometric data for soil mapping. *Australian Journal of Soil Research* 34, pp. 183-194.
- Dickson B.L. and Scott K.M., 1997 - Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (2) : 187-200.
- Grinand C., Arrouays D., Laroche B., Martin M.P., 2008 - Extrapolating regional landscapes from an existing soil map : sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma* 143 (1-2), 180-190.
- Hovgaard, J. and Grasty R.L., 1997 - Reducing Statistical Noise in Airborne Gamma-Ray Data through Spectral Component Analysis. In : Proceedings of Exploration 97 : Four Decennial International Conference on Mineral Exploration, pp. 753-764.
- IAEA, 1991 - Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying. Technical Reports Series n° 323.
- IAEA, 2003 - Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363.
- Lacoste M., Lemerrier B. and Walter C., 2011 - Regional mapping of soil parent material by machine learning based on point data, *Geomorphology*, 133 (1) : 90-99.
- Lemerrier B., Lacoste M., Loum M., Walter C., 2011 - Extrapolation at regional scale of local soil knowledge using boosted classification trees : A two step approach, *Geoderma*, doi :10.1016/j.geoderma.2011.03.010
- Martelet G., Truffert C., Tourlière 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). *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation*, 8 (3) : 208-223.
- Mayr E., Dobos F., Carre T., Hengl (Eds.), 2006 - In Digital Soil Mapping as a Support to Production of Functional Maps, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, EUR 22123 EN, 68 p.
- Martz LW et de Jong E., 1990 - Radionucléides naturels dans les sols d'un petit bassin agricole dans les prairies canadiennes et leur association avec la topographie, les propriétés du sol et l'érosion. *Catena*, 17 : 85-86.
- McBratney AB, Mendonça Santos ML, Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, pp. 3-52.
- McKenzie, N.J. and Ryan P.J., 1999 - Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89 (1-2) : 67-94.
- McKenzie NJ, Gallant JC, 2006 - Digital soil mapping with improved environmental predictors and models of pedogenesis. In 'Advances in digital soil mapping.' (Eds P Lagacherie, ABMcBratney and M Voltz.) Developments in soil science series (Elsevier : Amsterdam).
- Messner F., 2008 - Apport de la Spectrométrie Gamma Aéroportée pour la cartographie numérique des sols. Rapport de Master 2, Département des sciences de la terre et de l'environnement, Université d'Orléans, 52 p.
- Minasny B, Malone BP, McBratney AB. (Eds) 2012 - Digital soil assessments and beyond. CRC Press, Taylor and Francis, 466 p.
- Minty B.R.S. 1997 - Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (2) : 39-50.
- Rawlins, B.G., B.P. Marchant, D. Smyth, C. Scheib, R.M. Lark and C. Jordan. 2009. Airborne radiometric survey data and a DTM as covariates for regional scale mapping of soil organic carbon across Northern Ireland. *European Journal of Soil Science*, 60 (1) : 44-54.
- Rawlins, B.G., R.M. Lark and R. Webster. 2007. Understanding airborne radiometric survey signals across part of eastern England. *Earth Surface Processes And Landforms*, 32 : 1503-1515.
- Richer de Forges, A. C. 2008. Référentiel régional pédologique de la région Centre, Notice explicative de la carte des pédopaysages du Loiret à 1/250 000, Institut National de la Recherche Agronomique, France, 278 p.
- Richer de Forges A. C. et Verbèqque B., 2003 - Notice explicative de la carte des sols de Patay au 1/50 000, Chambre d'Agriculture du Loiret, 142 p. et annexes.
- Sanchez PA., Ahamed S., Carré F., Hartemink A.E., Hempel J., Huising J., Lagacherie P., McBratney A.B., McKenzie N.J., Lourdes Mendonça-Santos M. de, Minasny B., Montanarella L., Okoth P., Palm C.A., Sachs J.D., Shepherd K.D., Vågen T.-G., Vanlauwe B., Walsh M.G., Winowiecki L.A., Zhang G.-L., 2009. Digital soil map of the World. *Science*, 7 : 680-681.
- Schetselaar E.M., Chung C.F. and Kim K.E., 2000 - Integration of Landsat TM, gamma-ray, magnetic and field data to discriminate lithological units in vegetated granite-gneiss terrain. *Remote Sens. Environ.*, 71 : 89-105.
- Viscarra Rossel, R. A., Taylor H. J. and McBratney A. B., 2007 - Multivariate calibration of hyperspectral γ -ray energy spectra for proximal soil sensing. *European Journal of Soil Science*, 58 (1) : 1365-2389.
- Wetterlind J., Tourlière B., Martelet G., Deparis J., Saby N.P.A., Richer de Forges A.C. and Arrouays D., 2012a - Are there any effects of the agricultural use of chemical fertiliser on elements detected by airborne gamma-spectrometric surveys ? *Geoderma*. 173-174 : 34-41.
- Wetterlind JM, Richer de Forges A.C., Nicoulaud B., Arrouays D., 2012 - Changes in U and Th content in topsoil after long term phosphorous fertilization. *Soil Use and Management* : 28, 101-107.
- Wilford, J.R., Bierwirth P.N. and Craig M.A., 1997 - Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied

geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (2) : 201-216.

Wilford, J.R. and Minty B.. 2006 - Chapter 16 - The Use of Airborne Gamma-ray Imagery for Mapping Soils and Understanding Landscape Processes, *In* : P. Lagacherie, A.B. McBratney and M. Voltz, Editor(s), *Developments in Soil Science*, Elsevier, 31, pp. 207-218, pp. 609-610.

Wilford, J. and Thomas M.. 2012 - Modelling soil-regolith thickness in complex weathered landscapes of the central Mt Lofty Ranges, South Australia. *In* : *Digital Soil Assessments and Beyond* - Minasny, Malone & McBratney (eds) – © Taylor and Francis Group, Londres, UK, pp. 69-75.

