

## Introduction

L'évaluation du potentiel agronomique des sols s'inscrit dans le cadre d'une agriculture raisonnée. La cartographie de la variabilité spatiale des propriétés du sol à l'échelle métrique est nécessaire pour adapter au milieu naturel les pratiques culturales telles que l'épandage de produits phytosanitaires ou d'engrais. Les méthodes classiques mises en œuvre pour l'étude des parcelles agricoles associent des observations pédologiques et des analyses chimiques. Ces travaux sont menés de façon stationnelle et ponctuelle sur des zones supposées représentatives des parcelles. Or nous savons qu'il existe une variabilité non négligeable intra parcellaire qui est rarement étudiée compte tenu des coûts. Plusieurs méthodes géophysiques sont actuellement employées pour permettre l'extension spatiale des connaissances acquises ponctuellement. Parmi ces méthodes, la résistivité électrique est la plus fréquemment utilisée. Toutefois, la nécessité de contacts entre les électrodes et le sol ralentit les investigations et rend fastidieuse toute cartographie haute résolution à l'échelle de la parcelle. De plus, les résultats sont fortement dépendants de l'état hydrique du sol lors des mesures. Ce mémoire est consacré à une méthode pouvant constituer une alternative à celles actuellement proposées. Les travaux correspondent à une étude prospective du potentiel d'une cartographie des anomalies magnétiques, de résolution métrique à inframétrique, pour aborder l'hétérogénéité pétrotexturale des sols. Ils ont pour objectif de tester la capacité de cet outil géophysique de surface à permettre, de façon non destructive, le passage de connaissances ponctuelles à l'échelle d'une parcelle. Cette étude est donc d'un intérêt méthodologique fondamental.

## Etat des connaissances

Les propriétés magnétiques (cf. Annexe A) des sols sont abordées par les méthodes du magnétisme des roches depuis plusieurs dizaines d'années (Maher, 1986; Verosub et Roberts, 1995). Elles dépendent de la nature, de la teneur et de la taille de grain des minéraux ferromagnétiques *s.l.*, et plus particulièrement des phases ferrimagnétiques, *i.e.* les oxydes et les sulfures de fer (Thompson et Oldfield, 1986). Les investigations des propriétés magnétiques des paléosols, notamment celles menées dans les loess quaternaires de Chine, sont à la base des études magnétiques des sols. Au sein des séquences loessiques, les paléosols se distinguent aisément par une forte augmentation de susceptibilité magnétique. Dans de tels milieux, de nombreux travaux ont montré les liens existant les teneurs en porteurs de l'aimantation et les variations climatiques (pour plus de détails voir Maher, 1998). Dans les sols, il est possible de définir une structure verticale par les mesures magnétiques (Hanesch et Petersen, 1999). Ces dernières peuvent permettre de révéler des sous-structures qui ne

sont pas distinguées par les horizons pédologiques. Sur un profil de sol, l'intensité et les variations des paramètres magnétiques sont notamment influencées par le mode d'exploitation anthropique. En effet, on note par exemple que le labour génère une troncature de la partie supérieure du profil magnétique (Hanesch et Petersen, 1999). Certaines grandes lignes peuvent également être définies en fonction de la nature des sols (Maher, 1986). La plus générale se traduit par un enrichissement de surface en minéraux ferrimagnétiques. Ceux-ci sont caractérisés par une forte susceptibilité magnétique et une capacité d'aimantation élevée. Le Borgne fut le premier à observer une augmentation de la susceptibilité magnétique de l'horizon supérieur de certains sols (Le Borgne, 1955). Depuis, cette tendance à un enrichissement de surface a été décrite dans de nombreuses études. Elle peut être généralisée à la plupart des sols développés sous un climat tempéré, à l'exception des podzols et des sols acides ou saturés en eau (Maher, 1998). Son origine est encore largement débattue, principalement du fait de la difficulté à trouver des arguments univoques. Plusieurs processus décrits en détail par différents auteurs (Cornell et Schwertmann, 1996; Maher, 1998) sont évoqués. Les processus purement physicochimiques sont distingués de ceux nécessitant une intervention biologique et plus particulièrement bactérienne :

- concentration de minéraux magnétiques primaires par les processus pédologiques et d'altération des roches (Singer et Fine, 1989).
- transformation thermique par combustion d'(hydr)oxydes faiblement magnétiques en magnétite ou maghémite, en présence de matière organique (Le Borgne, 1960). Le taux d'enrichissement dépend de la teneur en fer et en matière organique, de la température de chauffe, de la porosité du sol, etc.
- retombées atmosphériques de poussières magnétiques résultant de sources de pollution (Thompson et Oldfield, 1986). Une telle origine d'enrichissement en minéraux ferrimagnétiques est aisément mise en évidence par microscopie électronique à balayage (Hanesch et Petersen, 1999). En effet, elle correspond à une accumulation de particules sphériques de magnétite ou de maghémite de diamètre supérieur à 1  $\mu\text{m}$ .

L'augmentation de la susceptibilité magnétique en surface d'un sol peut aussi être liée à la néoformation de minéraux ferrimagnétiques par des processus dépendant de l'activité de certaines bactéries. Un inventaire des processus de biominéralisation du fer est proposé par Konhauser (1997, 1998). La formation de ces phases biogénétiques est due à la réduction du fer par des processus soit intracellulaires (bactéries magnétotactiques) soit extracellulaires (dissimilatory iron-reducing bacteria : DIRB). Fassbinder et coll. ont été les premiers à mettre en évidence la présence de magnétosomes de magnétite dans les sols (Fassbinder et al., 1990). Les magnétosomes sont des particules magnétiques monodomaines stables (Moskowitz et al., 1989, 1993; Frankel et al., 1998a) enfermées au sein de membranes intracytoplasmiques et se présentant sous forme de chaînes (Hanzlik et al., 1996). Leur

taille est comprise entre 35 et 120 nm (Bazylinski et al., 1994). Les bactéries magnétotactiques se situent préférentiellement à la limite entre les zones oxiques et anoxiques (Schwartz et al., 1997; Passier et al., 2001; Robinson, 2001). Elles utilisent leurs magnétosomes composés de magnétite ou de greigite (Bazylinski et al., 1995) pour s'orienter et se déplacer selon les lignes de champ magnétique (Frankel et al., 1979). Des renseignements complémentaires pourront être trouvés dans différents articles de synthèse (Bazylinski, 1996; Frankel et al., 1998b; Schuler, 1999). La mise en évidence dans les sols de magnétite formée par des processus extracellulaires est plus récente (Hanesch et Petersen, 1999). Les grains caractérisés par microscopie électronique à transmission ont une taille moyenne de 5 nm. Ils peuvent former des clusters dans des zones localisées du sol où règnent des conditions anaérobies nécessaires au développement des DIRB. Ces conditions peuvent se trouver au sein de mottes, même dans des horizons très aérés tels que ceux de surface d'un sol cultivé (Morel, 1996; Gobat et al., 1998). Suivant les conditions biogéochimiques, les DIRB peuvent produire jusqu'à 5000 fois plus de magnétite qu'une biomasse équivalente de bactéries magnétotactiques (Frankel, 1987). Ce processus pourrait donc constituer la principale voie de production de phases magnétiques d'origine biologique. Il est abordé en détails dans plusieurs articles et ouvrages de synthèse (Pelmont, 1996; Lovley, 1997; Fredrickson et al., 1998; Dong et al., 2000; Straub et al., 2001).

En plus de la nature et des teneurs en minéraux magnétiques, la taille de leurs particules est le troisième facteur dont dépendent les propriétés magnétiques des sols (Thompson et Oldfield, 1986). Cette dépendance de taille de grain résulte de l'état des domaines magnétiques. La dimension des particules magnétiques est contrôlée par de nombreux paramètres tels que leur processus de formation ou la disponibilité en fer (Cornell et Schwertmann, 1996). Des études réalisées en laboratoire ont montré que la taille de grain est également fonction du pH et de l'Eh (Jolivet et al., 2000). Dans les sols le pH est plus particulièrement contrôlé par les équilibres acide-base et la pression partielle de CO<sub>2</sub>. L'Eh dépend quant à lui du pH, de l'abondance en donneurs-accepteurs d'électrons, en oxydes de fer et de manganèse et en matière organique, de l'accessibilité à l'oxygène de l'air, c'est à dire de l'aération du sol, etc. (Morel, 1996; Gobat et al., 1998). Le pH et l'Eh contrôlent en partie l'activité bactérienne. Toutefois, par rétroaction sur leur milieu, les bactéries réductrices peuvent à leur tour modifier notablement ces deux paramètres (Myers et Nealson, 1990; Gobat et al., 1998).

Jusqu'à présent, la susceptibilité magnétique est le seul paramètre utilisé pour la cartographie des propriétés magnétiques des sols. Elle est définie comme le rapport de l'aimantation induite sur un champ magnétique appliqué dont l'intensité est du même ordre que celle du champ terrestre. Sa mesure sur le terrain est obtenue à l'aide de capteurs fonctionnant en champ alternatif. La conception des capteurs actuellement disponibles sur le marché semble cependant limiter l'utilisation de la cartographie de susceptibilité. En effet, du fait de la dépendance de fréquence de la susceptibilité, deux

modèles de capteur peuvent mesurer des valeurs sensiblement différentes. De plus, la profondeur d'investigation de ces appareils est limitée à quelques centimètres (Dearing, 1994; Scholger, 1998a; Lecoanet et al., 1999). Par conséquent, les mesures dépendent des variations verticales de susceptibilité, influencées par l'épaisseur d'humus (diamagnétique) et par la rugosité de la surface du sol. Elles sont donc significatives et reproductibles seulement quand la dynamique du signal est élevée. C'est le cas notamment dans les zones exposées à d'intenses retombées de poussières atmosphériques, à proximité des villes et des centres industriels (centrales électriques, cimenteries, fonderies, aciéries, etc.). De nombreuses études ont été menées avec succès sur des sols où s'accumulent des particules émises par de telles sources de pollution (Durza et al., 1993; Durza, 1994, 1999; Hoffmann et al., 1999; Kapicka et al., 1999; Lecoanet, 2000; Petrovsky et al., 2000; Lecoanet et al., 2001; Strzyszc et Magiera, 2001).

La susceptibilité magnétique ne rend compte que d'une part de l'aimantation du sol (aimantation induite) et, par conséquent, n'exploite pas le signal lié à l'aimantation rémanente. Sur des sols dont la dynamique du signal magnétique est faible, nous proposons d'utiliser des magnétomètres qui sont quant à eux sensibles à l'aimantation totale. Ceux à vapeur de césium permettent une cartographie rapide (de l'ordre de la journée par hectare) avec une sensibilité potentielle de quelques centièmes de nanoteslas, soit un à deux ordres de grandeur supérieurs à celle des magnétomètres à proton. Ils sont classiquement utilisés dans le cadre de prospections archéologiques (McGovern, 1979; Breiner, 1984; Laroche et al., 1998; Menghini et al., 1999), géologiques (La Femina, 1998), ou encore dans la recherche de corps métalliques (Roberts et al., 1996; Coron et Sams, 1998; Bowers et Bidwell, 1999; Pierce et al., 2001). Leur utilisation dans le cadre de l'étude de sols est nouvelle, l'approche prospective n'ayant jamais été réalisée à notre connaissance.

Compte tenu de l'état des connaissances sur les propriétés magnétiques des sols, ce sujet a été bâti sur l'hypothèse suivante : l'hétérogénéité de texture d'un sol doit se traduire par des hétérogénéités spatiales de teneurs en minéraux magnétiques. Ces variations de concentration doivent créer des différences d'intensité des aimantations rémanentes et induites portées par les phases magnétiques néoformées ou accumulées. Ceci doit se manifester localement par des micro-anomalies magnétiques pouvant être abordées avec les magnétomètres à vapeur de césium. L'objectif de cette étude est de rechercher ce signal potentiel et d'en comprendre la signification.

## Plan du manuscrit

L'étude prospective du potentiel de la cartographie des anomalies magnétiques des sols est présentée en trois chapitres.

Le premier correspond à la cartographie magnétique haute résolution. Il est organisé autour de deux aspects majeurs ayant fait chacun l'objet d'un article. Les résultats des premières campagnes de prospection sont tout d'abord présentés sous forme d'un article publié dans *Earth and Planetary Science Letters*. Ces investigations ont été menées sur des parcelles cultivées et une prairie naturelle afin d'évaluer la variabilité spatiale et temporelle des anomalies magnétiques en fonction de l'histoire de chaque sol. Le protocole de mesure classiquement employé en prospection archéologique a été adapté à la problématique par l'utilisation d'un chariot et de rails. Cependant, la faible dynamique du signal enregistré nous a imposé par la suite d'apporter de nombreuses améliorations à ce protocole et de définir les limites de la méthode. Ceci a fait l'objet d'un second article soumis à *Journal of Applied Geophysics*.

Ensuite, afin d'interpréter les cartes d'anomalies magnétiques, une fosse pédologique a été creusée dans un sol ayant fait l'objet de prospections. La caractérisation de la minéralogie est présentée dans le deuxième chapitre. Les constituants majeurs ont tout d'abord été identifiés par une analyse de diffraction des rayons X sur échantillons discrets prélevés selon des profils verticaux. Les résultats sont exposés dans un article soumis à *Terra Nova*. Les mesures des propriétés magnétiques des échantillons ont ensuite permis de caractériser la minéralogie magnétique. Cette étude fait l'objet d'un article soumis à *European Journal of Soil Science*.

La troisième chapitre de ce mémoire est une synthèse proposant une interprétation minéralogique des cartes d'anomalies magnétiques. Les résultats exposés dans les deux premières parties sont confrontés et complétés par des données acquises par des méthodes géophysiques de surface. Une étude de porosimétrie mercure ainsi que l'observation et la mesure de diverses propriétés du sol sont également présentées afin de mieux appréhender les paramètres contrôlant le signal d'anomalie magnétique. Ce chapitre rédigé sous la forme d'un article en français doit servir de base à la rédaction d'un manuscrit destiné à une revue de science du sol.

Les résultats obtenus au cours de l'ensemble de l'étude sont synthétisés dans la conclusion où sont également évoquées quelques perspectives de ces travaux.

Cette étude a reçu le soutien financier de l'INSU dans le cadre de l'Action Concertée Incitative «Eau et Environnement » 2001. Elle est le fruit de la collaboration entre six laboratoires nationaux de recherche (CLDG-EA2612, LEPTAB-EA2119, La Rochelle ; Hydr'ASA-UMR6532, Poitiers ; IGP-UMR5831, LCABIE-UMR5034, Pau ; CEREGE-UMR6135, Aix en Provence) et une station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique (Saint Laurent de la Prée).