

# Pédogenèse polyphasée et transferts de polluants métalliques contraints par des structures cryogéniques

## Le cas des sols sous épandages massifs d'eaux usées dans la plaine agricole de Pierrelaye

F. van Oort<sup>(1\*)</sup>, M. Thiry<sup>(2)</sup>, E. Foy<sup>(3)</sup>, K. Fujisaki<sup>(1)</sup>, et B. Van Vliet-Lanoë<sup>(4)</sup>

- 1) INRA, UR 251 Pessac, F-78026 Versailles Cedex, France
- 2) Mines ParisTech, Géosciences, 35, rue St Honoré, 77305 Fontainebleau, France
- 3) CEA Saclay, UMR 3299 SIS2M-LAPA, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
- 4) Université de Brest, UMR 6538 Domaines Océaniques, place Copernic, 29280 Plouzané, France

\* : Auteur correspondant : vanoort@versailles.inra.fr

### RÉSUMÉ

Des structures cryogéniques, organisées en réseaux polygonaux de 20 à 30 m, ont été mises en évidence dans les sols de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt. La présence de ces structures cryogéniques millénaires interroge sur les conditions hydrologiques locales qu'elles engendrent et le rôle de celles-ci sur le transfert des polluants accumulés dans les sols de la plaine suite aux épandages massifs, pendant un siècle, d'eaux usées de l'agglomération parisienne. Des réponses ont été cherchées par la combinaison d'études géophysiques et pédologiques (résistivité électrique, examen pédologique de tranchées, minéralogie, analyses pédogéochimiques, micromorphologie, microfluorescence-X), menées à différentes échelles (parcelle, solum, constituants).

Les structures cryogéniques correspondent à des affaissements/déformations des horizons E et BT et sont séparées du substrat calcaire par une "stone-line" de fragments calcaires. La concordance géométrique des horizons et du substrat témoigne d'une pédogenèse ancienne intervenue avant la mise en place des cryoturbations lors de la dernière période périglaciaire. L'ancienneté de cette pédogenèse est aussi attestée par la fragmentation et la déformation, par cryogénie, des illuviations argilo-ferrugineuses dans ces horizons. Par ailleurs, des revêtements minces d'argile limpides dans la partie supérieure du BT ainsi que des accumulations calcaires disposées en larges bandes horizontales, donc non affectées par la cryoturbation, témoignent eux d'une pédogenèse plus récente, post-cryogénies. Ces illuviations limpides et ces accumulations calcaires sont corrélatives de la décarbonatation qui a conduit à la formation de Néoluvissols durant l'Holocène.

Sous épandages d'eaux usées, les sols présentent des traits pédologiques spécifiques qui n'apparaissent jamais dans les sols hors du périmètre d'épandage : la dégradation des revêtements d'argile, la formation de ferranes et manganes, et le blanchiment de l'horizon E. Ces traits pédologiques témoignent d'une évolution pédologique récente, liée aux grands volumes d'eaux usées ( $\approx 2\,000$  mm par an), qui ont traversé ces sols durant le XX<sup>e</sup> siècle. Les analyses pédologiques montrent une évolution minéralogique de la smectite en minéral de type intergrade, une diminution importante (jusqu'à 50 %) de la CEC et une augmentation de la proportion d'aluminium

échangeable. Ces modifications minéralogiques et physicochimiques sont le résultat de la ferrolyse, un processus engendré par les alternances d'oxydo-réduction dues aux pratiques d'épandages massifs. Les manifestations de la dégradation des sols sont maximales au droit des invaginations, dans la partie supérieure de l'horizon BT. Les plus forts contrastes de couleur et de texture sont caractéristiques des Luvisols Typiques. A l'écart des structures invaginées, les sols sont peu épais et l'horizon de labour repose parfois directement sur le calcaire fragmenté.

La configuration des structures cryogéniques, avec d'épais niveaux argileux invaginés formant un réseau polygonal et des sols peu épais au centre des polygones, conduit à des conditions hydrodynamiques contrastées à l'échelle décimétrique. L'impact sur le transfert de métaux vers le substratum est attesté par des teneurs plus élevées en métaux dans la fraction réactive fine des substrats calcaires à l'écart des structures invaginées, notamment Zn et Cu, par rapport à celle des substrats à proximité de ces structures.

Enfin, les alternances des conditions redox induites par les irrigations ont des incidences sur la géochimie des polluants dans les sols, comme en témoignent la coprécipitation d'éléments majeurs (Fe, Mn) et de métaux (Zn, Cu, Pb) sous forme de ferranes et manganes dans les horizons profonds.

### Mots clés

Cryoturbation, sols polygonaux, paléo-pédogenèse, traits pédologiques, pédogenèse, eaux usées, polluants métalliques, transfert.

### SUMMARY

#### **SOIL FORMATION AND TRANSFER OF METAL POLLUTANTS GOVERNED BY CRYOGENIC STRUCTURES - An example of soils impacted by long-term spreading of urban wastewater in the Pierrelaye area (NW of Paris)**

*In the Pierrelaye-Bessancourt area (figure 1), polygonal patterns of deep cryoturbated structures of 20 - 30 m wide (figure 2) were demonstrated at depth in the soil cover. The occurrence of such millennial polygonal structures raises questions about the local hydrodynamic conditions and their impact on migration of pollutants accumulated during one century of intensive spreading urban waste water in the area. To unravel such complex environmental issues, we used a combined geophysical and pedological approach including electric resistivity mapping, pedological survey in deep trenches, mineralogical and geochemical analyses, micromorphology and X-ray microfluorescence applied to different study scales : irrigation fields, soil profiles and soil constituents.*

*The polygon structures contained 1 - 2 m deep and 3 - 5 m large infoldings of the E and BT horizons, delimited from the calcareous substrate, i.e. calcareous greenish glauconitic sands (Cs) and fragmented limestone (Rca) by a continuous limestone clast layer forming a stone-line (figure 3, figure 4). Such a concordant geometry of deformed soil horizons and carbonate substrates points to a paleopedogenesis developed before the latest periglacial period. Several pedofeatures originating from frost activity in the infolded BT horizon were observed in soil thin sections (figure 5), such as infillings of former ice lenses by large and thick laminated clay coatings, vertically oriented carbonate clasts due to frost jacking, frost folded and shattered thick clay coatings, as well as frost shattered glauconite grains. However, secondary carbonate layers (figure 3), occurring in the substrate as horizontally extended bands were unaffected by cryoturbation, indicating that decarbonation of the soil cover occurred a posteriori, likely concomitant with the development of Néoluvisols during the Holocene. During this second stage of pedogenesis, thin, yellow-orange, limpid and translucent clay-iron coatings were formed around sand grains and in pores in the upper part of the BT horizon (figure 7).*

*Remarkable macromorphological characteristics and microscopic pedofeatures were detected in soils under long-term wastewater irrigation, but such features were absent in soils outside the wastewater irrigation area, pointing to an anthropogenic induced origin. They illustrate major pedological modifications that took place during the 20th century : a) bleaching of the E horizon (figure 6) with a local occurrence of thin, bow-like iron-accumulation bands (figure 6) ; b) geochemical degradation of clay-iron coatings (figure 7) ; c) redistribution of iron compounds and formation of pure iron coatings (ferrans, figure 7) ; d) redistribution of manganese ascribed to fungal activity, leading to dark opaque manganese deposits, occasionally in the form of coatings (mangans) ; e) dissolution of smectite, decreasing CEC, increasing proportions of exchangeable Al, and formation of Al-interlayered smectite and intergrade minerals (Table 2). All these features are main steps of a hydromorphic soil forming process, ferrolysis, initiated by repetitive and long-term alternating redox conditions in these soils. Ferrolysis is predominantly active above the deeply infolded clay-rich structures, where drainage water stagnates, thus affecting predominantly the upper part of the BT horizon, and leading to formation of a transitional, more sandy-textured Eg/BT horizon (figure 6). Away from these infolded structures, in the central parts of the polygons, soils are shallow and locally the plough horizon may directly overly the fragmented carbonate substrate (figure 6, figure 8).*

*The spatial arrangement of cryogenic structures, with thick clay-rich layers forming the polygonal patterns and thin soils in the centre of the polygons, leads to contrasting hydrodynamic conditions at a decametric scale. Such geometry implies rapid water drainage conditions in the centre of the polygons, favourable for the transfer of metal pollutants into the substrate (figure 9), notably Zn and Cu. By contrast, the clay-rich infolded structures imply a low permeability, limiting the downward movement of drainage water and, consequently, protec-*

ting the surrounding substrate from inflow of metal pollutants (figure 9). Finally, mapping by X-ray microfluorescence of the distribution patterns of major (K, Fe, Mn) and trace elements (Zn, Pb, Cu) on selected thin sections demonstrated how the pedological pedofeatures closely interact with migrating metal pollutants. A part of dissolved or colloid-associated trace metals are intercepted from draining soil solution and trapped within iron or manganese precipitates (figure 10, figure 11).

### Key-words

Crioturbation, polygon soils, paleo-pedogenesis, soil formation, urban wastewater, trace metals, metal transfer.

## RESUMEN

### **PEDOGÉNESIS POLIFÁSICA Y TRANSFERENCIAS DE CONTAMINANTES CONSTREÑIDOS POR ESTRUCTURAS CRIOGÉNICAS - El caso de los suelos bajo esparcimientos masivos de aguas usadas en la planicie agrícola de Pierrelaye**

Se observó estructuras criogénicas organizadas en redes poligonales de 20 a 30 m en los suelos de la planicie de Pierrelaye-Bessancourt. La presencia de estas estructuras criogénicas milenarias interroga sobre las condiciones hidrológicas locales que engendran y el papel de estas sobre la transferencia de los contaminantes acumulados en los suelos de la planicie debidos a los esparcimientos masivos, durante un siglo, de aguas usadas de la aglomeración parisina. Se buscaron contestas por la combinación de estudios geofísicos y pedológicos (resistividad eléctrica, examen pedológico de trincheras, mineralogía, análisis pedogeoquímicos, micromorfología, microfluorescencia-X), realizados a diferentes escalas (parcelas, solum, constituyentes).

Las estructuras criogénicas corresponden a hundimientos / deformaciones de horizontes E y BT y están separadas del substrato calcáreo por una "stone-line" de fragmentos calcáreos. La concordancia geométrica de los horizontes y del substrato muestra una pedogénesis antigua que intervino antes de las crioturbaciones durante el último periodo periglacial. La antigüedad de esta pedogénesis está también atestada por la fragmentación y la deformación, por criogenia, de las iluviaciones arcillo-ferruginosas en estos horizontes. De otra manera, los revestimientos delgados de arcilla límpidos en las partes superiores del BT así que acumulaciones calcáreas dispuestas en largas bandas horizontales, por lo tanto no afectadas por la crioturbación, muestran una pedogénesis más reciente, post-criogenias. Estas iluviaciones límpidas y estas acumulaciones calcáreas están correlativas de la descarbonatación que dio la formación de Neoluvissols durante el Holoceno.

Bajo esparcimientos de aguas usadas, los suelos presentan rasgos pedológicos específicos que nunca aparecen en los suelos fuera del perímetro de esparcimiento : la degradación de los revestimientos de arcilla, la formación de cutanes ferruginosos y mangánicos (ferranes y de manganes), y el blanqueamiento del horizonte E. Estos rasgos pedológicos muestran una evolución pedológica reciente, ligada a los grandes volúmenes de aguas usadas ( $\approx 2\ 000$  mm por año), que atravesaron estos suelos durante el siglo 20. Los análisis pedológicos muestran una evolución mineralógica de la esméctita en mineral de tipo intergrado, una disminución importante (hasta 50 %) de la CIC y un aumento de la proporción de aluminio intercambiable. Estas modificaciones mineralógicas y fisicoquímicas están el resultado de la ferrolisis, proceso generado por las alternancias de oxido-reducción debidas a las prácticas de esparcimientos masivos. Las manifestaciones de la degradación de los suelos están máximas al nivel de las invaginaciones, en la parte superior del horizonte BT. Los más fuertes contrastes de color y de textura están característicos de los Luvisols Típicos. Aparte de las estructuras invaginadas, los suelos están poco espesos y el horizonte arado descansa a veces directamente sobre el calcáreo fragmentado.

La configuración de las estructuras criogénicas, con espesos niveles arcillosos invaginados que forman una red poligonal y suelos poco espesos al centro de los polígonos, conduce a condiciones hidrodinámicas contrastadas a escala decamétrica. Se atesto el impacto sobre la transferencia de metales hacia el substrato por contenidos más elevados en metales en la fracción reactiva fina de los substratos calcáreos aparte de las estructuras invaginadas, especialmente Zn y Cu, en comparación con las de los substratos a proximidad de estas estructuras.

En fin, las alternancias de las condiciones redox inducidas por las irrigaciones tienen incidencias sobre la geoquímica de los contaminantes en los suelos, como lo muestran la coprecipitación de elementos mayores (Fe, Mn) y de metales (Zn, Cu, Pb) bajo forma de cutanes ferruginosos y mangánicos (ferranes y manganes) en los horizontes profundos.

### Palabras clave

Crioturbación, suelos poligonales, paleo-pedogénesis, rasgos pedológicos, pedogénesis, aguas usadas, contaminantes metálicos, transferencia.

Les recherches environnementales menées en sols pollués se focalisent généralement sur l'évaluation des impacts liés à la présence de polluants (l'écotoxicité). Elles cherchent plus rarement à évaluer les impacts des pratiques polluantes anthropiques sur la nature et les propriétés des sols. De même, les paramètres intrinsèques à la couverture pédologique (horizons imperméables en profondeur, discontinuités dans le substrat) qui influencent localement les conditions hydrodynamiques, et donc le transfert des micropolluants, ne sont souvent pas considérés. Pourtant, l'évaluation des risques de mobilité et de biodisponibilité des polluants nécessite une connaissance exhaustive de la couverture pédologique, y compris du sous-sol, et de la gestion historique des sols. En effet, restreindre la collecte des échantillons à la surface des sols fortement anthropisés, peut aisément conduire à des interprétations erronées du devenir des polluants (Thiry et van Oort, 1999 ; van Oort *et al.*, 2007, 2009). Si, au-delà de l'inventaire des pollutions, on veut prendre en compte leur gestion sur le moyen et le long terme, les horizons profonds doivent être reconnus, et cela passe par la mise en œuvre d'une stratégie d'échantillonnage adaptée et pertinente. Ces aspects ont été abordés dans un projet de recherche "Etude d'évaluation du risque de mobilité des métaux dans l'agrosystème contaminé de Pierrelaye-Bessancourt : prospection du site, fonctionnement des sols et tests de lixiviation" avec un soutien financier du Conseil Régional Ile de France (CRIF), du Conseil Général (95), de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) et du Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), entre 2008 et 2011.

## INTRODUCTION - CONTEXTE HISTORIQUE ET CONTAMINATIONS DES SOLS

### Historique des épandages

Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la plaine de Pierrelaye-Bessancourt, située à environ 20 km au NO de Paris, a été un des champs d'épandage d'eaux usées de l'agglomération parisienne (figure 1). Au début du XX<sup>e</sup> siècle, environ 4 000 l/m<sup>2</sup>/an étaient apportés sur les sols, et environ 2 000 l/m<sup>2</sup>/an dans les années 1980 (Védry *et al.* 2001). Ces épandages visaient à épurer les eaux avant leur retour dans le réseau hydrographique, le caractère sableux des horizons de surface des sols étant favorable à l'infiltration rapide des lames d'eau apportées. L'amélioration agricole des sols sableux, considérés comme marginaux, était également visée dans le projet initial d'épandage (Risler, 1897). Dès lors, ce périmètre d'irrigation a acquis une vocation de production maraîchère, les épandages apportant l'eau et des éléments nutritifs N, P et K en grandes quantités. Mais ces pratiques ont également introduit des quantités considé-

rables de micropolluants dans les sols, notamment métalliques (Zn, Pb, Cu, Cd). Après 100 ans d'épandages massifs, la forte accumulation de métaux dans les sols a conduit à une contamination notable des cultures. En 1999, un arrêté préfectoral a interdit les cultures maraîchères sur la plaine et les épandages ont cessé au début des années 2000.

### La contamination des sols

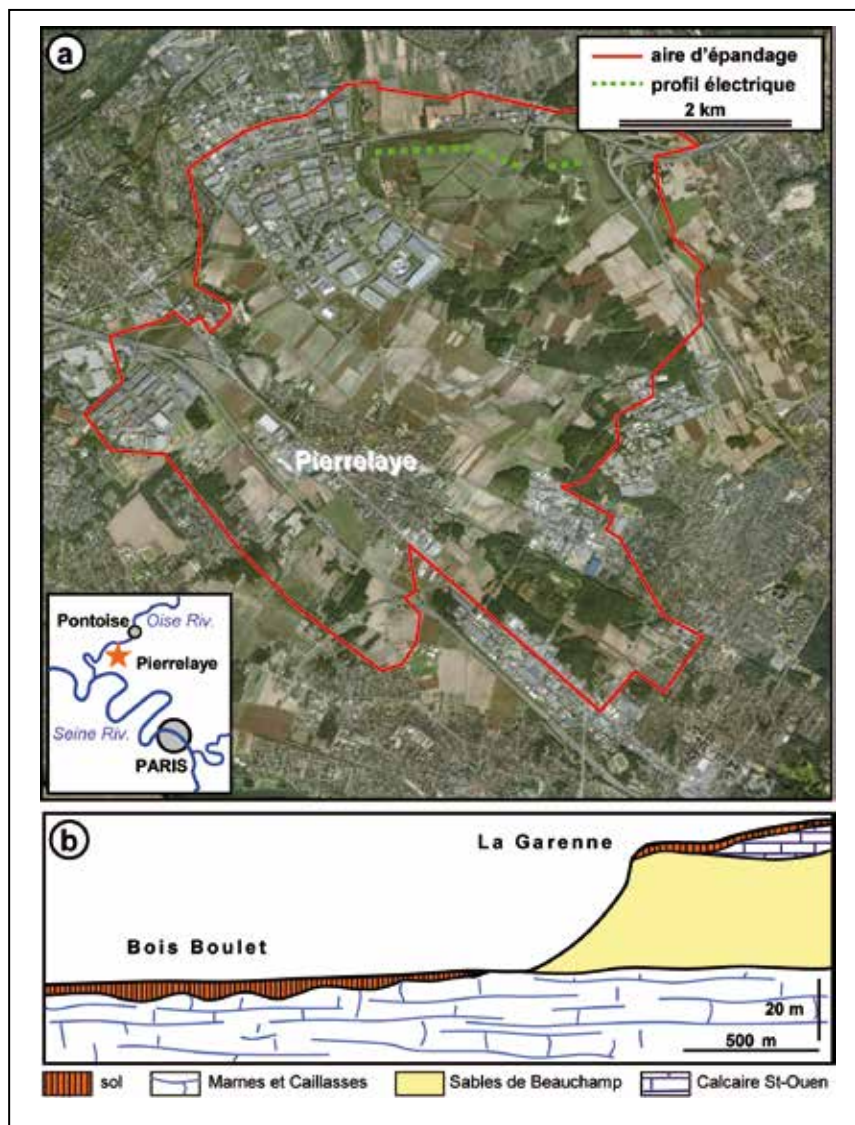
Les sols sous épandages se distinguent par une couleur particulièrement sombre (10YR 2/1 - 10YR 3/2) de l'horizon de surface comparée aux sols non-irrigués environnants (10YR 4/4) (van Oort *et al.*, 2008). Cette couleur noire est due à l'apport de grandes quantités de matières organiques par les eaux usées. Des teneurs de 20 à > 80 g kg<sup>-1</sup>, atypiques pour des sols agricoles sableux, sont couramment observées (Bourennane *et al.*, 2006). Les concentrations en Zn, Pb, Cu et Cd dans les horizons de labour sont environ 10 et jusqu'à 20 fois plus élevées que dans ceux des sols agricoles hors périmètre d'épandage (Baize *et al.*, 2002). Elles varient fortement : Zn (150 - 1 300), Pb (80 - 750), Cu (50 - 350) et Cd (1,5 - 12) mg kg<sup>-1</sup>, et peuvent localement atteindre > 3 000 mg kg<sup>-1</sup> de Zn, 1 600 mg kg<sup>-1</sup> de Pb, près de 850 mg kg<sup>-1</sup> de Cu et jusqu'à 30 mg kg<sup>-1</sup> de Cd. Cette variabilité dépend de la distance des sols aux bouches d'irrigation et de l'intensité des épandages. De plus, le travail du sol, réalisé toujours parallèlement à la plus grande pente pour favoriser un épandage uniforme des eaux usées, a entraîné l'érosion d'une partie de l'horizon de surface du haut vers le bas des parcelles. On constate alors une dilution des concentrations en métaux dans les parties hautes des parcelles par les labours annuels qui incorporent une partie de l'horizon sous-jacent. Des accumulations de micropolluants organiques, notamment des antibiotiques, ont également été mises en évidence dans ces sols (Tamtam *et al.*, 2011). Dans ces sols sableux et filtrants dans leur partie supérieure (horizons L et E), un transfert important de métaux vers la profondeur est souvent constaté, malgré un pH d'environ 7,5 dans l'horizon L (Citeau, 2004 ; Dère *et al.*, 2006). L'horizon BT, sablo-argileux, constitue un milieu privilégié d'interception des micropolluants, notamment pour Zn et Cd, mais aussi pour Pb et Cu (Lamy *et al.*, 2006 ; van Oort *et al.*, 2008), et pour certains antibiotiques (Tamtam *et al.*, 2011). Ces accumulations en profondeur varient spatialement, à l'échelle de quelques dizaines de mètres. Localement, des accumulations de Zn avaient été observées à des profondeurs > 1 m (van Oort, 2003) et attribuées alors à des discontinuités et/ou fractures dans le substrat calcaire, constituant des voies d'écoulement préférentiel des eaux de drainage.

### Nature et organisation du sous-sol

Une campagne de reconnaissance géophysique des sols de la plaine de Pierrelaye par résistivité électrique a révélé

**Figure 1** - Situation géographique et géomorphologie de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt qui a été un secteur d'épandage d'eaux usées. (1a) C'est aujourd'hui une plaine agricole "résiduelle" dans un environnement fortement urbanisé. Le transect cartographié par résistivité électrique y apparaît en pointillé. (1b) Coupe géologique de la zone prospectée par la géophysique, couvrant les sols développés sur les Marnes et Caillasses jusqu'au plateau formé par le Calcaire de St Ouen au-dessus des Sables de Beauchamp.

**Figure 1** - Geographical situation and geomorphological characters of the Pierrelaye-Bessancourt plain, used for spreading of urban waste water. (1a) This area was one of the wastewater spreading sectors in the NW of Paris, and represents today a "residual" agricultural plain in a strongly urbanized environment. The transect mapped by electric resistivity is indicated by a dotted line. (1b) Geological sketch of the surveyed area ranging from the middle Eocene "Marnes et Caillasses" Limestone Formation till the upper St-Ouen Limestone plateau, overlying the Beauchamp Sand formation.



l'existence de remarquables structures conductrices. Des polygones décamétriques organisés en réseau ont été interprétés comme des structures de cryoturbation liées aux périodes froides du Quaternaire (Thiry *et al.*, 2011, 2013) et impliquent une grande hétérogénéité du sous-sol. En se basant sur la reconnaissance géophysique, plusieurs tranchées de 30 à 50 m de longueur ont été creusées afin de détailler l'organisation de la couverture pédologique en profondeur.

## Objectifs

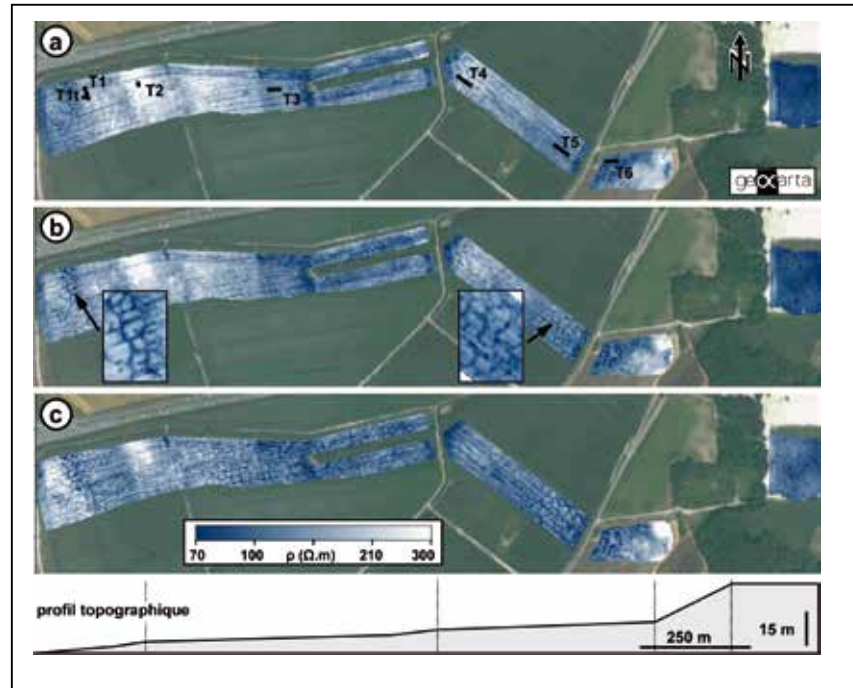
Le présent travail a pour objectif d'examiner l'influence des structures d'origine périglaciaire sur la formation générale des sols et sur les évolutions pédologiques et le transfert des polluants liés aux épandages d'eaux usées. A partir d'analyses de concordances/discordances géométriques

des structures cryogéniques et des horizons de sols, nous interprétons les différentes étapes du développement des sols, en distinguant une première paléo-pédogenèse issue des conditions périglaciaires millénaires, une seconde liée aux conditions tempérées de l'Holocène, puis une évolution pédologique récente, centenaire, liée aux pratiques anthropiques. A l'échelle du terrain, nous montrons comment le transfert en profondeur des polluants métalliques dépend des différenciations hydrodynamiques et géochimiques induites par la géométrie des structures cryogéniques et des horizons des sols. A une échelle plus fine, les relations entre les traits pédologiques récents et les distributions de métaux sont illustrées en combinant la microscopie optique et la spectroscopie par micro-fluorescence-X ( $\mu$ -XRF) appliquées sur des lames minces de sol.



**Figure 2** - Cartes de résistivité électrique dans les parcelles de Bois Boulet. Les cartes correspondent à 3 profondeurs d'investigation : (2a) 0 - 50 cm, (2b) 0 - 100 cm et (2c) 0 - 170 cm. Les détails du réseau régulier de polygones montrent que leur diamètre est d'environ 20 - 30 m et qu'ils sont particulièrement bien visibles entre 0 et 100 cm. L'emplacement des différentes tranchées creusées à la pelle mécanique est indiqué sur la carte 2a.

**Figure 2** - Electric resistivity maps of the "Bois Boulet" fields. Electric measurements were carried out for three soils depths : (2a) 0 - 50 cm, (2b) 0 - 100 cm and (2c) 0 - 170 cm. The zoom of the regular polygonal shaped patterns show a polygon diameter of about 20 - 30 m, which is particularly well-visible when exploring greater depths. The position and extends of the 6 trenches is indicated on map 2a.



## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Prospection géophysique des sols

La résistivité électrique est une technique de prospection bien adaptée pour l'étude non-destructive de l'organisation de la couverture pédologique (Tabbagh *et al.*, 2000). L'utilisation d'un dispositif multi-électrodes, tracté par quad et piloté par GPS (Automatic Resistivity Profiling, ARP<sup>®</sup>) fournit des relevés détaillés des variations de l'épaisseur du sol (Dabas, 2008). Cette méthode a permis de prospector une surface de 16 ha en une seule journée avec des mesures électriques effectuées tous les 20 cm, selon des transects espacés de 3 m. Des cartographies ont été établies pour trois profondeurs : 0 - 50, 0 - 100, et 0 - 170 cm. La prospection couvre une bande de terrains agricoles au nord de la plaine de Pierrelaye (*figure 1*), et s'étale sur les plateaux calcaires du Lutétien (Marnes et Caillasses) et de St Ouen (calcaire dur), séparés par la formation des sables de Beauchamp (*figure 1b*). La prospection électrique a été effectuée sur l'emprise de la ferme de la "Haute-Borne", dans les parcelles de "Bois-Boulet" (E-586.400 ; N-245.0100 et E-588.150 ; N-245.0438, coordonnées Lambert 2 étendu).

### Reconnaissance de la couverture pédologique et échantillonnage

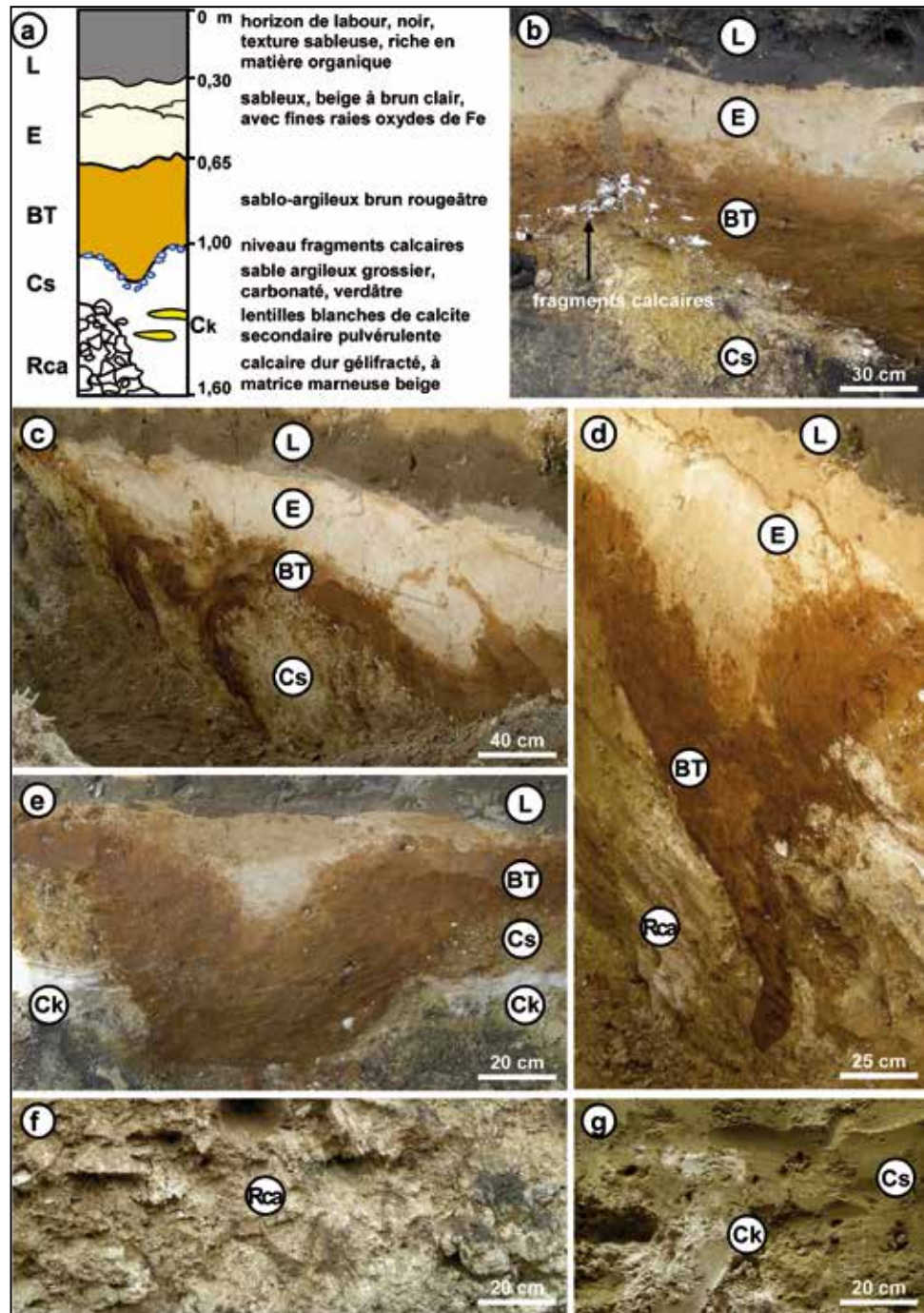
Plusieurs tranchées, de 30 à 50 m de longueur, ont été ouvertes par pelle mécanique dans des zones d'intérêt révélées par la prospection électrique (*figure 2*). Elles ont été creusées jusqu'au substratum calcaire dur qui a été atteint entre environ 0,6 et 3,5 m de profondeur. Au total, 6 tranchées ont été creusées, représentant une longueur cumulée de 250 m. Les parois de tranchées ont permis de décrire la macromorphologie des structures cryogéniques, la géométrie des horizons pédologiques et l'organisation des substrats calcaires. L'accès dans les tranchées à la variabilité de la couverture pédologique a permis de sélectionner des sites pertinents pour des prélèvements en vrac d'environ 140 échantillons pour des analyses géochimiques et minéralogiques, ainsi qu'une vingtaine d'échantillons non-remaniés pour des études micromorphologiques.

### Analyses

Les déterminations sur la terre fine (< 2 mm) des échantillons ont été réalisées selon des normes NF et ISO au Laboratoire d'Analyses des Sols (Inra, Arras) : granulométrie, carbone et azote organiques, teneur en carbonate, capacité d'échange cationique (CEC, méthode cobaltihexammine). La concentration totale en éléments majeurs et en traces a été déterminée en ICP-MS, après attaque tri-acide des échantillons par HF-HClO<sub>4</sub>-

**Figure 3** - Sols de la plaine de Pierrelaye. (3a) Solum synthétique. Certains compartiments pédologiques et lithologiques peuvent être absents, mais leurs caractères propres et leurs relations mutuelles sont en tous cas respectés. (3b) Profil peu perturbé par la cryoturba-tion ; à noter le niveau régulier de fragments calcaires centimétriques (stone-line) qui souligne la limite inférieure de l'horizon BT. (3c, 3d) Invagination des horizons E et BT au droit des poches de sable calcaire glauconieux (Cs) et de calcaire fragmenté (Rca). La ligne de fragments calcaires suit régulièrement l'horizon argileux déformé. La transition entre les horizons E et BT est irrégulière, et montre une mosaïque de taches décolorées (horizon de transition Eg/BT). (3e) Accumulation de carbonate Ck en bandes horizontales dans le substrat de sables calcaires glauconieux (Cs). (3f) Substrat calcaire gélifRACTÉ (Rca). (3g) Substrat de sables calcaires glauconieux (Cs) avec bandes d'accumulation calcaire (Ck).

**Figure 3** - Soils of the Pierrelaye area. (3a) Synthetic soil profile. Some horizons and/or soil layers may be lacking, but their mutual position in the trenches remains unchanged. (3b) Soil profile little affected by cryoturbation ; notice the regular band of centimeter-sized limestone clasts that border the contact between the BT horizon and the limestone substrate ; (3c, d) infoldings of the E and BT horizons into the greenish glauconite-rich sand (Cs) sink structures occurring in the fragmented limestone (Rca). The limestone clasts form a stone-line that closely follows the lower limit of the deformed BT horizon. The transition between the E and BT horizon is irregular and displays a mosaic pattern of iron depleted spots, locally forming a transition Eg/BT horizon ; (3e) Horizontal layers of carbonate accumulation (Ck) in the greenish glauconite-rich sand substrate (Cs). (3f) The Rca fragmented limestone. (3g) Calcareous sand substrate (Cs) with horizontal bands of carbonate accumulations (Ck).



HCl (NF X 31-147). La fraction  $< 2 \mu\text{m}$  a été extraite d'échantillons représentatifs des différents horizons et rendue calcique par lavages avec du  $\text{CaCl}_2$  N en vue de l'analyse des minéraux argileux. Les préparations orientées d'argile-Ca ont été analysées par diffractométrie des rayons X (DRX) sur un équipement Siemens D-5000 Kristalloflex, successivement après séchage à l'air, saturation à l'Éthylène-Glycol (EG) et chauffage à  $550^\circ\text{C}$ .

Des échantillons non-remaniés ont été prélevés dans des boîtes en carton rigide ( $7,5 \times 7,5 \times 3 \text{ cm}$ ). Après séchage à l'air et imprégnation par une résine polyester, des lames minces de  $30 \mu\text{m}$  d'épaisseur ont été réalisées (FitzPatrick, 1970). La nature, la morphologie et l'organisation des constituants ont été étudiées sous microscope polarisant, en utilisant le vocabulaire de Stoops (2003). Les distributions d'éléments majeurs (Fe, Mn, Ca, K) et en trace (Cu, Zn, Pb) ont été cartographiées par microfluorescence-X ( $\mu\text{-XRF}$ ) sur lames minces à l'aide d'un diffractomètre de rayons-X à anode tournante (Rigaku RU-200B). Le faisceau monochromatique avec une taille de  $50 \times 30 \mu\text{m}$  était délivré par une anode Mo (Ka à  $17,5 \text{ keV}$ ) opérant à  $21 \text{ mA}$  et  $55 \text{ kV}$ . Le temps d'acquisition des spectres de fluorescence a varié selon les concentrations en métaux de l'objet étudié ( $500 - 1\,000 \text{ s}$  par pas de mesure). Les cartes de distribution ont été réalisées dans Origine®.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Relations entre les structures cryogéniques et la couverture pédologique

#### Géométrie des sols polygonaux

La cartographie par résistivité électrique révèle des structures linéaires conductrices interconnectées, organisées en réseau polygonal de taille décimétrique (*figure 2*). La largeur des anomalies linéaires varie de  $2$  à  $3 \text{ m}$ . L'extension de ce réseau varie avec la profondeur d'exploration : les structures sont localement visibles entre  $0$  et  $0,5 \text{ m}$  de profondeur (*figure 2a*), mais occupent la quasi-totalité des  $16 \text{ ha}$  prospectés en explorant une profondeur de  $0$  à  $1,7 \text{ m}$  (*figure 2b, c*). Ce sont donc les niveaux plus profonds, entre  $0,5$  et  $1,7 \text{ m}$  qui présentent les contrastes lithologiques les plus marqués. Les structures linéaires conductrices correspondraient à des zones plus humides et/ou plus argileuses, alors que les zones moins conductrices, au centre des polygones, correspondraient à des matériaux à texture plus grossière.

#### Caractéristiques macromorphologiques de la couverture pédologique

L'examen des tranchées montre le solum type (*figure 3a, b*) avec des successions typiques : l'horizon L, sableux, noir, de  $30$

à parfois plus de  $50 \text{ cm}$  d'épaisseur, l'horizon E, sableux, beige-brun, de  $5 - 30 \text{ cm}$  d'épaisseur, comportant localement de fines bandes ferrugineuses (*figure 3c, d*) ; et l'horizon BT, sablo-argileux, brun-rougeâtre, d'environ  $20 - 40 \text{ cm}$  d'épaisseur. La transition entre les horizons E et BT peut être tachetée et irrégulière (van Oort *et al.*, 2008) et est localement distinguée comme un horizon Eg/BT. La limite inférieure de l'horizon BT est soulignée par un niveau régulier de fragments calcaires centimétriques, formant une "stone-line" (*figure 3b*). Le substrat est composé de sables calcaires glauconieux verdâtres, codés Cs (*figure 3c, g*) et de calcaire lacustre d'âge Eocène, pulvérulent dans la partie supérieure par gélifraction, codé Rca (*figure 3d, f*), correspondant à la "formation calcaire redistribuée" (FCR) de Baize *et al.* (2002). Des accumulations calcaires Ck se disposent en bandes ou lentilles horizontales d'environ  $5$  à  $10 \text{ cm}$  d'épaisseur (*figure 3e, g*) et de  $0,5 \text{ m}$  à plusieurs mètres d'extension, au sein du Cs et Rca, entre  $0,5$  et  $1,5 \text{ m}$  de profondeur.

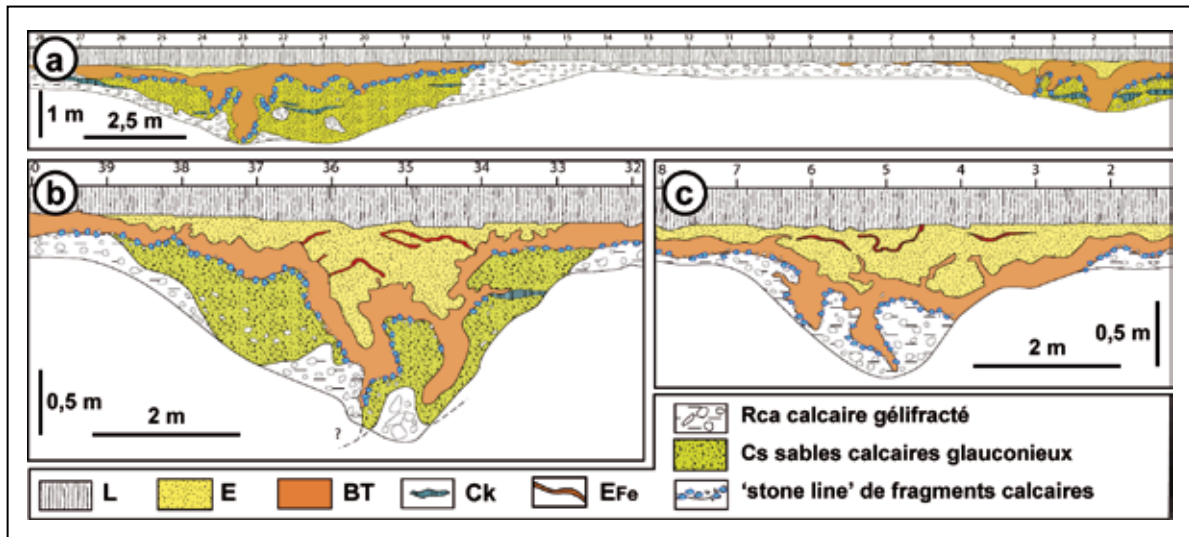
La disposition des horizons et leur épaisseur varient fortement dans les tranchées, avec épaissement et invagination des horizons E et BT, essentiellement dans les sables calcaires glauconieux et parfois dans les calcaires fragmentés du substrat (*figure 4*). Ces structures affaissées ont des tailles variables, et peuvent s'enfoncer de  $40$  à  $50 \text{ cm}$  jusqu'à  $2$  à  $3 \text{ m}$  de profondeur (*figure 3e, d*). Au niveau des invaginations, la texture de l'horizon BT varie de sablo-argileuse dans la partie supérieure et en bordure, à argilo-sableuse dans les parties centrales et profondes au contact du substrat calcaire. Par ailleurs, le niveau de stone-line de fragments calcaires suit étroitement les invaginations (*figure 3b, figure 4*), indiquant que cette stone-line et les matériaux parentaux des horizons L, E et BT ont été déposés à plat, puis déformés *a posteriori* par affaissement. A l'écart des poches, l'horizon E, et parfois même l'horizon BT, peut être absent, et dans ce cas, l'horizon L repose directement sur le calcaire dur gélifracté (*figure 4a*). L'horizon L n'est jamais affecté par les déformations. Ces structures argileuses d'affaissement sont régulièrement espacées de  $20$  à  $30 \text{ m}$  et coïncident avec les polygones à forte conductivité de la cartographie électrique ; les zones moins conductrices au centre des polygones correspondent aux sols peu épais.

Ces polygones sont caractéristiques de structures périglaciaires et sont à relier aux périodes froides du Quaternaire (Dylik et Maarleveld, 1976 ; Washburn, 1979 ; Van Vliet-Lanoë, 1998). Les dispositions géométriques permettent de remonter à la chronologie de phases successives (Thiry *et al.*, 2013) : (1) développement de polygones de contraction thermique qui forment des poches sableuses lors de la glaciation Saalienne (Riss) vers  $260 \text{ ka BP}$  ; (2) érosion des polygones avec formation du niveau de fragments calcaires (stone-line) par déflation lors de la période sèche vers  $180 \text{ ka BP}$  ; (3) dépôt de matériel sableux à sablo-argileux et formation des horizons E et BT, à la sortie du glaciaire entre  $150$  et  $130 \text{ ka BP}$  ; (4) formation des structures invaginées dans des fentes de contraction au sein



**Figure 4** - Caractéristiques morphologiques des structures d'affaissement/invagination. Les invaginations sont soulignées par une ligne de fragments calcaires centimétriques. La distance entre deux structures est d'environ 20 m (4a). Les structures invaginées sont presque toujours liées à des poches de sables calcaires glauconieux (4a, b), mais sont occasionnellement présentes dans le calcaire fragmenté (4c). A l'écart des invaginations, les sols sont peu épais, les horizons E et BT peuvent être absents et l'horizon L peut reposer directement sur le calcaire fragmenté (4a).

**Figure 4** - Sketch of macromorphological characteristics of the sink and clay-infolding structures. The infoldings are underlined by a continuous limestone clast stone-line. The distance between two infolded structures is about 20 m (4a). Such infolded features are most often associated to glauconite-rich greenish sand filling sink hollows (4a, b), but occasionally they occur directly in the Cc substrate (4c). Away from the clay-infolding structures, shallow soils occur, the E and/or BT horizon may be absent, and the plough layer may overly the fragmented limestone substrate.



d'un pergélisol discontinu lors de dernière période glaciaire du Weichsélien (Würm) entre 75 et 15 kA BP ; (5) une dernière érosion des microreliefs engendrés par les processus de cryoturba-tion à la sortie du glaciaire entre 15 et 10 kA BP.

### Traits paléo-pédologiques liés aux conditions périglaciaires

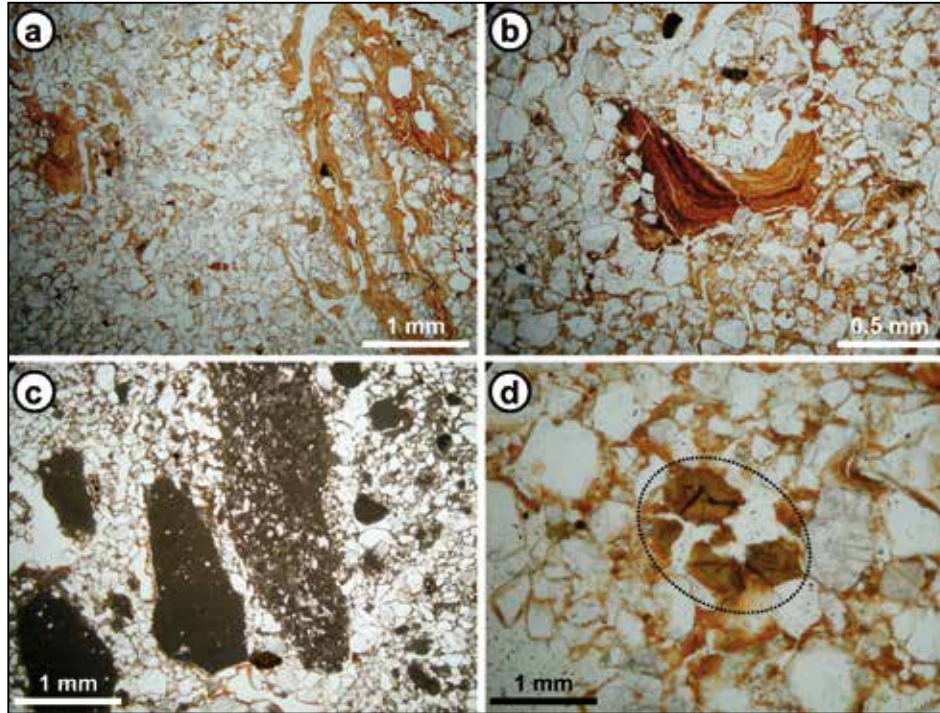
Dans les positions d'affaissement/invagination, l'horizon BT cryoturqué montre des microstructures et des assemblages plasmiques caractéristiques des dynamiques cryogènes qui s'exercent dans les sols sous conditions périglaciaires (figure 5) (Van Vliet-Lanoë, 1998). Ainsi, des revêtements argileux lamellaires, de couleur brun-orange, et de grande extension (plusieurs millimètres) et d'épaisseur (200 - 500  $\mu$ m), remplissent des fissures et vides subverticaux (figure 5a), orientés parallèlement aux parois des poches de sables calcaires glauconieux. Cette macroporosité correspond à des espaces créés par d'anciennes lentilles de glace. De telles larges bandes d'illuviation d'argile sont fréquemment observées dans les cryosols (Van Vliet-Lanoë, 2005). Des portions de ces épais revêtements d'argile, arrondis ou tordus par le gel, s'observent également au sein de la matrice du sol (figure 5b). Dans les sables calcaires glauconieux (Cs), au contact de l'horizon BT cryoturqué, des

fragments de calcaire sont dressés verticalement par cryoex-pulsion (figure 5c). Certains minéraux, comme des grains de glauconie, sont fissurés et présentent des fentes aux bords rectilignes, caractéristiques des éclatements par cryoclastie (figure 5d).

L'effet du gel sur certaines structures pédologiques, comme la déformation et la fracturation de structures d'illuviation, atteste que ces structures préexistaient à la dernière période glaciaire. Par ailleurs, la concordance constante et régulière des horizons pédologiques E et BT avec les déformations cryogéniques implique que ces horizons préexistaient aux déformations. En effet, si tel n'était pas le cas, c'est-à-dire si la différenciation pédologique des horizons s'était faite après déformation, les horizons E et BT se disposeraient à peu près horizontalement comme dans tout sol, donc en travers des invaginations. De plus, on ne peut concevoir que le caractère argilluvial de cet horizon BT ait pu se différencier dans des invaginations profondes (plus d'un mètre) et étroites (de 0,2 à 0,3 m de diamètre) et avec un contact net avec l'encaissant Cs ou Rca sur les bordures verticales des invaginations. Il faut donc convenir que la différenciation pédologique des horizons E et BT existait avant la mise en place des structures invaginées pendant l'Holocène. Les horizons E et BT forment en fait

**Figure 5** - Micromorphologie de traits cryogéniques dans l'horizon BT invaginé. (5a) Remplissage d'une fissure par d'épais revêtements lamellaires d'argiles, disposés parallèlement aux parois des poches de sables calcaires glauconieux. (5b) Fragments d'épais revêtements d'argiles dispersés dans la matrice du sol. (5c) Fragments de calcaire dressés verticalement par cryo-expulsion au contact entre l'horizon BT et les sables calcaires glauconieux. (5d) Grain de glauconie éclaté par l'action du gel. Photos en lumière naturelle.

**Figure 5** - Optical microscope images of pedofeatures related to periglacial soil conditions. (5a) Infilling of thick, laminated clay illuviation coatings in a large subvertical fissure, parallel oriented to the greenish glauconite sand sink structure. (5b) Fragments of distorted thick clay illuviation coatings occurring dispersed in the soil ground mass. (5c) Vertical jacking of carbonate clasts. (5d) A fragmented green-brown glauconite mineral due to frost shattering. All photographs in plain polarized light.



un paléosol hérité d'altérations au cours du dernier interglaciaire (120 - 75 ka BP).

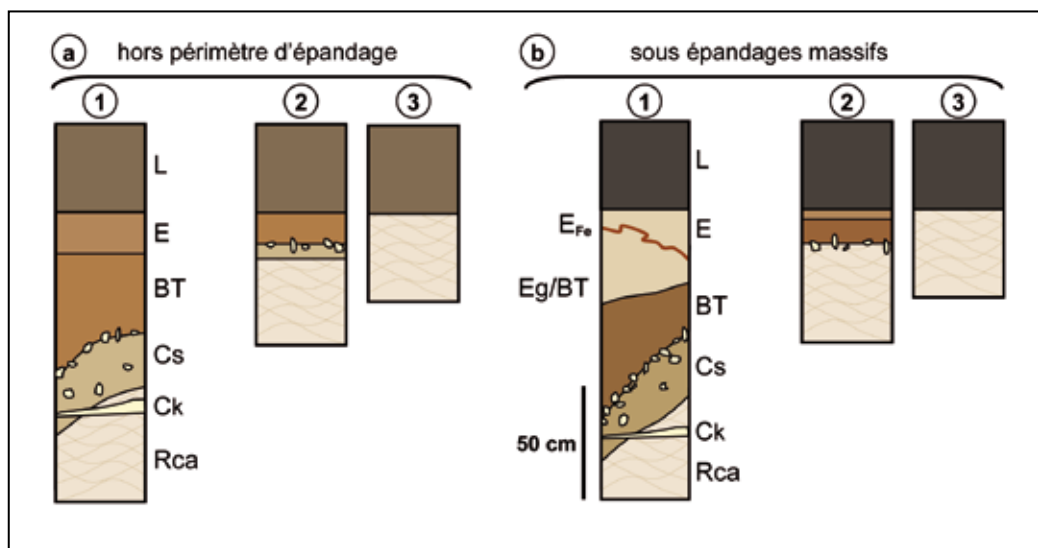
En revanche, les réprécipitations calcaires (Ck) ne sont jamais affectées par les déformations des horizons E et BT. Elles se disposent en bandes horizontales et quelquefois en travers des structures invaginées. Par leur géométrie, ces accumulations apparaissent clairement post-cryoturbation. La fraction granulométrique < 500 µm de deux échantillons a été datée par  $^{14}\text{C}$ , respectivement à  $5,7 \pm 0,04$  BP et  $26,4 \pm 0,200$  ka BP (datation RadioCarbon Poznan Poz-29893 et Poz-29894). Ces datations doivent être considérées comme des âges maximum car inévitablement entachées par des éléments calcaires provenant du substratum (Rca). Les accumulations sont donc dans tous les cas postérieures à la dernière période glaciaire. Ces âges coïncident avec une phase de décarbonatation des couvertures pédologiques dans la région, qui précède le processus d'éluviation/illuviation des argiles et la formation de

Néoluvisols au cours de l'Holocène. Cette deuxième phase de pédogenèse en climat tempéré est à l'origine des nombreux revêtements de ferri-argilanes, d'aspect mince et translucide, qui entourent les grains de sable et recouvrent les pores dans la partie supérieure de l'horizon BT (figure 7a, b). Ces évolutions pédologiques de l'Holocène apparaissent comme relativement "mineures" par rapport aux altérations anciennes qui sont à l'origine de l'essentiel des contrastes pédologiques. C'est là un résultat majeur apporté par la reconnaissance des structures cryogéniques et de leur rapport avec la morphologie des sols. Ces relations géométriques n'auraient pu être mises en évidence sans le creusement des tranchées.

Enfin, les analyses granulométriques d'environ 130 échantillons collectés dans les tranchées, dans différents horizons de la couverture pédologique, montrent des rapports "limon/sable" et "sable fins/sables grossiers" remarquablement constants (tableau 1). Dans les substrats calcaires (Cs + Rca),

**Figure 6** - Séquences de sols observés en dehors (6a) et dans (6b) le périmètre d'irrigation. La comparaison des trois solum-types montre que le caractère et la succession des horizons issus des pédogenèses du dernier interglaciaire et de l'Holocène sont identiques dans les deux secteurs, mais que les sols sous épandages pendant un siècle avec des eaux usées se distinguent par des caractères supplémentaires : la couleur plus noire de l'horizon L, un fort blanchiment de l'horizon E et l'apparition d'un horizon de transition Eg/BT, résultant de la dégradation géochimique de la partie supérieure de l'horizon BT. Les couleurs sont déterminées à l'humidité de terrain, selon la charte Munsell.

**Figure 6** - Typical soil sequences observed in locations outside (6a) and within (6b) the wastewater irrigation area. The comparison of soil profiles demonstrates that the general character and order of the soil horizons related to the soil forming processes during the latest interglacial and the Holocene are similar for both locations, but soils affected by one century of wastewater irrigation display distinct complementary morphological characteristics : a dark brown to black colour in the plough layer, a strong bleaching of the eluvial E horizon and the presence of a transition Eg/BT horizon, resulting from geochemical degradation of the BT horizon. All colours are consistent with field moist colours determined according to the Munsell chart.



**Tableau 1** - Rapports granulométriques entre les proportions de limons (L) et de sables (S) et entre les fractions sables fins (SF) et sables grossiers (SG) dans les horizons L, E, et BT, et dans les substrats calcaires Cs et Rca. N : nombre d'échantillons dans chaque horizon/substrat.

**Table 1** - Silt-to-sand (L/S) and fine-to-coarse sand (SF/SG) ratios determined on samples from L, E, and BT horizons and from carbonate substrate Cs and Rca samples. N : number of samples in each horizon.

Horizons	L	E	BT	Cs + Rca
N	20	15	60	33
L/S	0,14 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,05	0,25 ± 0,17
SF/SG	1,04 ± 0,14	1,01 ± 0,20	1,13 ± 0,20	0,86 ± 0,26

ces rapports divergent légèrement, avec notamment une proportion plus faible de sables grossiers et une proportion de limons plus grande, due à la présence de particules de carbonate, de taille limoneuse. Cette similitude granulométrique dans la composition du squelette des horizons L, E, BT, ajoutée à leur identité morphologique et minéralogique (Thiry *et al.*, 2013) signifie que les pédogenèses se sont développées dans un même matériau parental recouvrant le substrat calcaire.

## Evolutions pédologiques sous contrainte anthropique au cours du XX<sup>e</sup> siècle

### La couverture pédologique "naturelle"

Selon le référentiel pédologique régional de l'Île-de-France à 1/250 000, les sols dans la région sont organisés en toposéquences, comprenant principalement des Néoluvisols et des Calcisols en position de plateau, avec une topographie quasi-

**Tableau 2** - Sélection de caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des horizons E et BT de sols situés dans et en dehors du périmètre des épandages massifs d'eaux usées de Pierrelaye-Bessancourt.

**Table 2** - Selected morphological and physico-chemical characteristics of E and BT horizons of soils located outside or inside the wastewater irrigation area of Pierrelaye-Bessancourt.

Caractéristiques pédologiques	Sols hors du périmètre		Sols dans le périmètre d'épandages			
	E	BT	E	EFe	Eg/BT	BT
Couleur Munsell	7,5YR 5/5 7,5YR 4/6	7,5YR 4/4 7,5YR 4/6	2,5Y 8/3 10YR 6/4	7,5YR 6/8	10YR 5/8 7,5YR 6/6	7,5YR 5/8 5YR 4/7
Teneur en argile (%)	8-11	18-25	2,5-9	9-11	19-25	20-40
CEC argile (cmol/kg)	60	63	30-45	50-55	50-55	55-60
Fe total (%)	1,0-1,2	2,3-2,6	0,4-0,8	0,9-1,3	1,2-3,1	2,2-4,2
Aléch/AlTot (%)	<1	<1	7,5-20	3-4,5	3-10	1-3
d(001) argiles 2:1 (nm)	Ca (N)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	EG	1,7	1,7	1,4	1,5-1,7	1,4-1,7
	550 °C	1,0	1,0	1,4	1,0	1,0-1,4

Conditions d'obtention des diagrammes de DRX : Ca (N) : argile calcique, température ambiante, EG : test de gonflement à l'éthylène glycol, 550 °C : chauffage

plane et qui laissent la place à des Calcisols en bordure de plateaux, dès lors que la pente s'accroît (Isambert et Baize, 2001). Sous climat tempéré, sans apport d'eaux usées, le type de sol dominant est le Néoluvisol, où la décoloration de l'horizon E est faible et l'enrichissement en argile de l'horizon illuvial encore insuffisant pour représenter un obstacle pour la percolation rapide des eaux de pluie (Jamagne et Bégon, 1984). Le stade de Luvisol Dégradé, caractérisé par un blanchiment important de l'horizon E, des phénomènes de ségrégation du fer liés à des conditions d'hydromorphie et la pénétration de l'horizon dans l'horizon BT (glosses), n'est pas mentionné pour ces sols.

### Morphologies des sols, dans et hors périmètre d'épandage

Des transects à la tarière d'environ 50 m ont été effectués dans différents secteurs, à la fois dans et en dehors du périmètre d'épandage (Fujisaki, 2010 ; Dairon, 2011). Les structures cryogéniques se sont révélées omniprésentes dans tous les transects. Les morphologies des principaux types de sols rencontrés le long des structures polygonales sont tout à fait similaires dans et hors du secteur d'épandage (figure 6). La couverture pédologique comprend partout trois grands types de sols, dont la distribution est liée à la présence des structures cryogéniques : (1) en position d'affaissements un solum épais montrant la succession L, E, BT, le niveau de stone-line, et les substrats Cs et Rca ; (2) en position plus centrale des polygones un solum moins épais avec un horizon BT d'environ 10 à 20 cm et un horizon E peu développé ou absent ; (3) par-

fois l'horizon BT est absent et l'horizon L repose directement sur le substrat Rca. Les types (2) et (3) occupent environ 60 à 75 % de la surface de la couverture pédologique (Thiry et al., 2013).

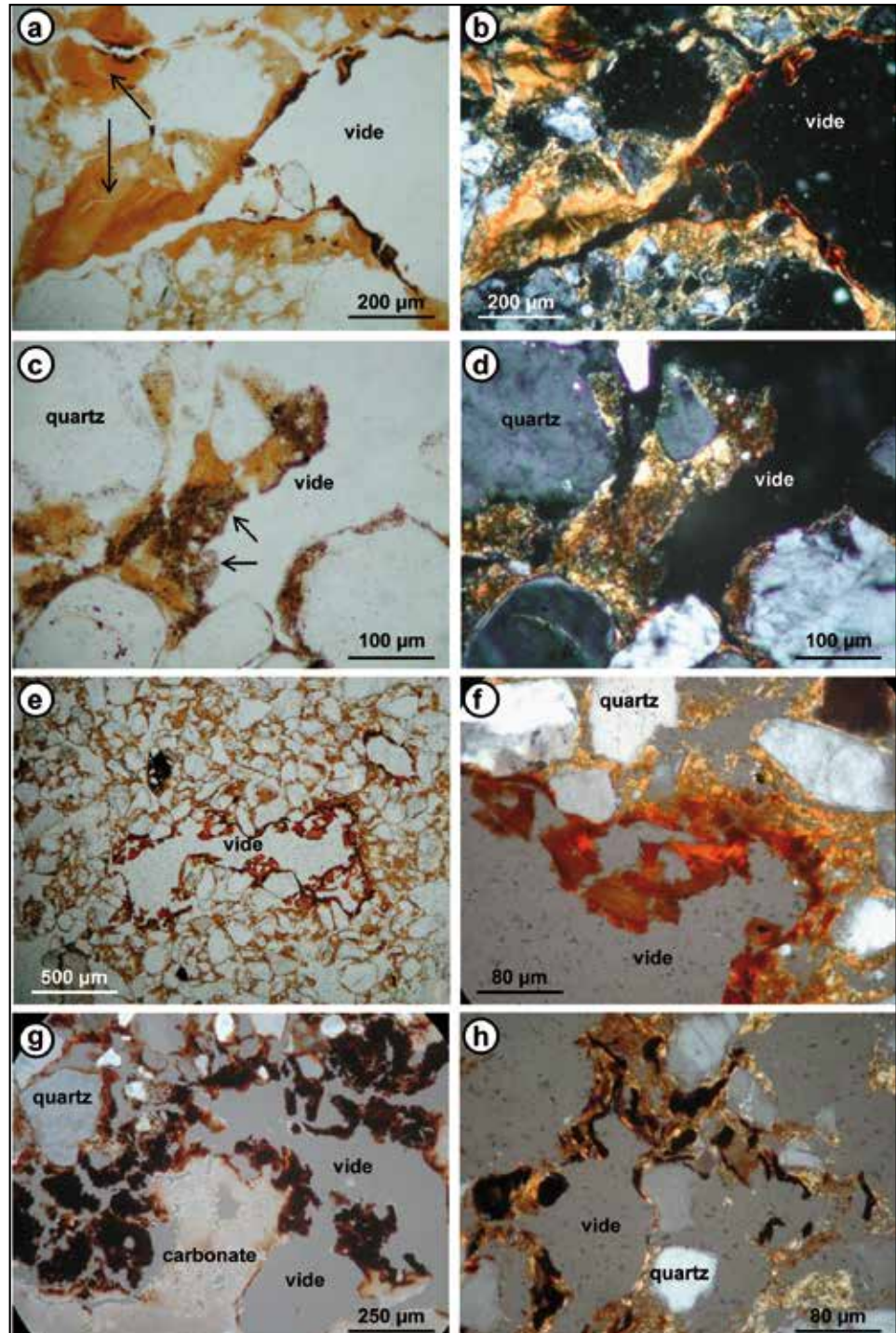
Les sols ayant subi des épandages d'eaux usées pendant un siècle révèlent des aspects morphologiques et physico-chimiques qui les distinguent des sols environnants (figure 6, tableau 2). Ces différences s'expriment diversement selon leur position par rapport aux structures polygonales et témoignent d'évolutions pédologiques récentes liées à la gestion de ces sols. Plusieurs caractères pédologiques sont propres aux sols affectés par ces épandages massifs.

- La couleur de l'horizon de labour est toujours plus sombre, liée à l'apport par les eaux usées de quantités importantes de matières organiques (Lamy et al., 2006).
- La couleur de l'horizon éluvial est toujours plus claire (tableau 2). Le blanchiment et l'épaississement de l'horizon E (figure 6b), particulièrement marqués au-dessus des invaginations, n'ont jamais été observés dans les sols hors périmètre d'épandage. Le sol est un Luvisol Typique. La couleur de l'horizon E peut atteindre des valeurs > 6 et un chroma < 4, conduisant à leur classement comme horizon éluvial albique (IUSS-WRB, 2006), noté horizon Ea dans le RP (Afes, 2009).
- La transition entre les horizons E et BT est souvent graduelle à diffuse et interrompue et se distingue par la présence de plages décolorées (van Oort et al., 2008), appauvries en fer et en argile (tableau 2). Elle atteint 10 à 20 cm d'épaisseur, notamment au-dessus des niveaux d'invaginations, et est distinguée alors comme un horizon Eg/BT (figure 6b).



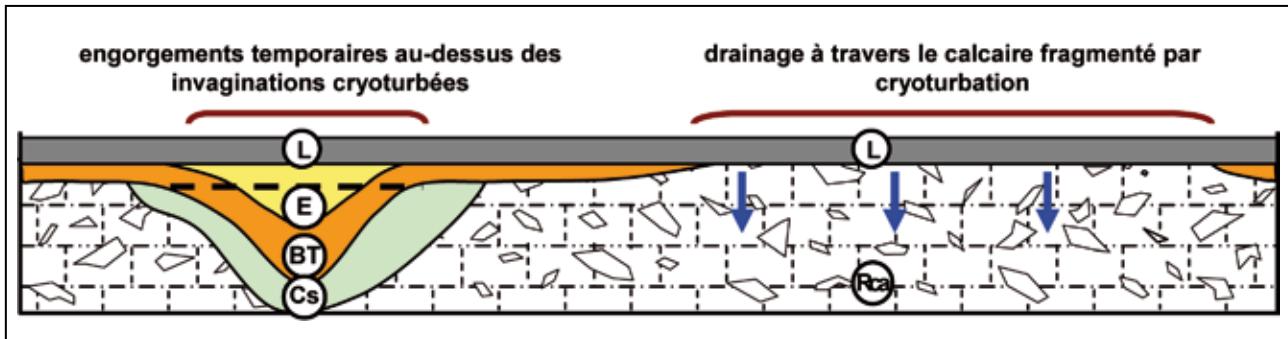
**Figure 7** - Traits pédologiques liés à l'évolution des sols irrigués massivement au cours du XX<sup>e</sup> siècle. (7a, b) Ferri-argilanes dans la partie supérieure de l'horizon BT, limpides et translucides (flèches), avec une forte biréfringence. (7c, d) Dégradation des revêtements d'argiles par ferrolyse (flèches) dans l'horizon de transition Eg/BT. Les assemblages d'argiles montrent un aspect granulaire et ont perdu leur biréfringence. (7e) Présence de revêtements de fer (ferranes) dans un grand pore de l'horizon Eg/BT, illustrant la précipitation du fer mobilisé par la ferrolyse. (7f) Détail d'un ferrane recouvrant un ferri-argilane. (7g) Accumulations noires, opaques, d'origine organique au contact entre l'horizon BT et le substrat calcaire. (7h) Présence de fragments noirs sur des ferri-argilanes dans la partie supérieure de l'horizon BT. Photos 7a, 7c, 7e en lumière naturelle, les autres en lumière polarisée

**Figure 7** - Optical microscope images of pedofeatures related to soil formation induced by intensive irrigation during the 20<sup>th</sup> century. (7a, b) Limpid and translucent, strongly birefringent clay-iron coatings (arrows) occur in the upper part of BT horizon. (7c, d) Degradation of clay-iron coatings due to ferrolysis (arrows) in the transition Eg/BT horizon. These grey-yellowish coatings demonstrate no birefringence and have granular aspects. (7e) Pure iron coatings (ferrans) occur in large pores in the Eg/BT horizon, and witness of precipitation of iron mobilized by ferrolysis. (7f) Detail of ferran juxtaposed on a ferri-argilan. (7g) Fragments of black opaque features of biological origin at the contact between the BT horizon and the carbonate substrate. (7h) Black opaque structures overlying clay-iron coatings in the upper part of the BT horizon. All photographs in crossed polarized light, except 7a, 7c and 7e, in plain polarized light.



**Figure 8** - Schéma des conditions hydrodynamiques contrastées engendrées par la présence des structures cryogéniques. Les invaginations correspondent à un niveau épais de l'horizon BT peu perméable, limitant le transfert d'eau et de métaux vers le substrat carbonaté sous-jacent. A l'écart de ces structures, l'horizon BT a une épaisseur réduite ou est absent, créant des conditions favorables à l'infiltration des eaux et des polluants dans le substrat calcaire.

**Figure 8** - Sketch of contrasting drainage conditions for locations in the centre of the cryogenic structure or in peripheral sink structures. Under intensive wastewater irrigation, the sink structures with thick clay bodies are frequently waterlogged and these conditions favour the retention of metal pollutants. Contrarily, the core of the polygons is composed of shallow soils overlying the fragmented blocky limestone. Such highly permeable conditions favour a rapid transfer of metal pollutants into the substrate.



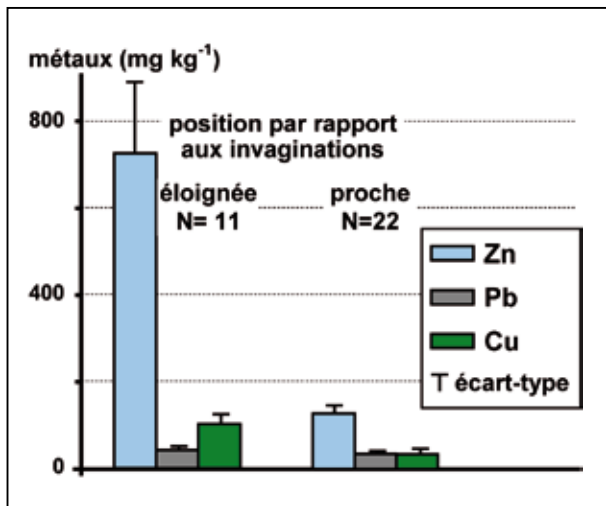
▪ De fines bandes ferrugineuses, millimétriques à centimétriques, sont présentes localement dans l'horizon E, notamment au-dessus des invaginations (*figure 3c, d*). Ces bandes  $E_{Fe}$  contiennent plus de fer et d'argile que l'horizon E qui l'entoure (*tableau 2*). Elles apparaissent en forme d'arcs, partant du haut de l'horizon BT à l'endroit où celui-ci plonge en profondeur pour s'élever d'environ 15 - 25 cm au-dessus du centre de l'invagination.

Ces caractères spécifiques, observés seulement dans les sols sous épandages massifs d'eaux usées, illustrent les impacts de l'activité anthropique durant un siècle. Ils témoignent de l'activité d'un processus pédologique de ferrolyse (Brinkman, 1970 ; 1979), bien connu dans les sols de rizière en climat intertropical humide. Ce processus consiste en une dégradation des minéraux argileux de type smectite en conditions d'engorgements et d'oxydo-réduction répétées. Dans les sols sous irrigation, ces conditions se manifestent plus particulièrement dans la partie supérieure du BT, au contact de l'horizon E (van Oort *et al.*, 2008). Compte tenu de la présence de grandes quantités de matières organiques et de l'activité microbienne qu'elle favorise dans l'horizon de surface, les eaux de drainage sont appauvries en oxygène à leur arrivée sur l'horizon argileux. Les minéraux argileux, notamment les smectites ferrifères issus de l'altération de la glauconite (Latrille, 1994) sont particulièrement sensibles aux alternances des conditions d'oxydo-réduction (Espiau et Pédro, 1983). Lors de la phase d'anaérobiose, le fer est réduit, solubilisé et partiellement lessivé, et une partie est retenue dans les sites interfoliaires. Après ressuyage du sol, l'oxydation du fer produit des protons qui diffusent dans la couche octaédrique des minéraux argileux, libérant

de l'aluminium qui se place en position interfoliaire d'autres phyllosilicates. Au cours de cette phase de ressuyage du sol, l'oxydation du fer entraîne une acidification localisée, et temporaire, car rapidement neutralisée compte tenu du pH basique, dans l'horizon de surface et dans la majeure partie de l'horizon BT. Avec le temps, la ferrolyse conduit à la transformation des argiles smectitiques en minéraux argileux alumineux de type "intergrade" ou "chlorite secondaire" (Robert, 1975 ; Barnishel et Bertsch, 1989). Ces minéraux "intergrades" ont perdu leurs capacités de gonflement et de retrait, se traduisant par l'absence de gonflement lors de la saturation à l'éthylène glycol et le blocage partiel ou total de la fermeture des feuillets au chauffage (*tableau 2*). Cependant, ce type de minéral argileux à comportement de chlorite n'est pas présent dans les sols hors zone d'épandages (*tableau 2*), ni dans l'horizon BT des sols du périmètre d'épandage. Sa présence dans les horizons E et Eg/BT est donc liée aux pratiques anthropiques. Cette évolution minéralogique "smectite → smectite-Al → intergrade" s'accompagne d'une diminution significative de la CEC des argiles (jusqu'à 50 % !), ainsi que d'une augmentation de la proportion d'Al échangeable. Les horizons affectés par ce processus montrent une décoloration importante suite au départ du fer. La ferrolyse se manifeste prioritairement dans la partie supérieure de l'horizon BT, notamment en position d'invagination. Elle est à l'origine de la formation d'un horizon de transition Eg/BT. Enfin, la géométrie des fines bandes ferrugineuses dans l'horizon E, en discordance avec les horizons E et BT déformés, indique que leur formation est récente. Elle s'explique par des mouvements ascendants de l'eau du sol et des solutés (fer, argiles colloïdales) par remontées capillaires à partir des

**Figure 9** - Concentrations moyennes en Zn, Pb, et Cu, calculées pour la fraction < 50 µm d'échantillons collectés dans les substrats Cs et Rca, à proximité et à l'écart des structures d'invagination.

**Figure 9** -. Average Zn, Pb, and Cu contents calculated for the < 50-µm fractions (i.e., after subtracting of carbonate and sand fractions), from samples collected in Cs and Rca substrates in trenches, close to and away from infolded sink structures.



structures argileuses affaissées, qui constituent des réservoirs d'eau localisés dans des sols et des substrats très drainants.

La ferrolyse, comme processus pédologique majeur de différenciation texturale dans les sols en milieu tempéré, est objet de controverses car, dans certains cas (des Luvisols Dégradés par exemple), des auteurs attribuent la perte d'argile plutôt à l'éluviation qu'à leur dissolution (Van Ranst et De Coninck, 2002). Cependant, les pratiques d'épandages massifs, de plusieurs milliers de mm par an depuis un siècle, ont entraîné de nombreux cycles d'engorgements et de fortes dessiccations chaque année. Ces conditions sont favorables à l'enclenchement de la ferrolyse. La comparaison des traits pédologiques spécifiques et de la minéralogie des sols sous un siècle d'épandages avec ceux des luvisols hors périmètre permet de trancher en faveur de ce processus.

### Traits pédologiques récents liés à l'activité anthropique

La microscopie optique révèle des assemblages plasmiques singuliers dans les sols soumis aux pratiques d'épandages (figure 7). L'horizon BT des sols, sous épandages ou non, montre des revêtements d'argiles et d'oxydes de fer qui enveloppent les grains de sable et recouvrent la surface des pores biologiques. Il s'agit de ferri-argilanes peu épais (30 - 100 µm), purs et limpides, de couleur jaune-orange, avec une forte biré-

fringence, signifiant une bonne orientation des minéraux argileux (figure 7a, b). Mais dans les sols du périmètre d'épandages, dans la partie supérieure des horizons BT, et *a fortiori* les horizons de transition Eg/BT, ces revêtements sont souvent peu translucides, ont un aspect plus granulaire, une couleur gris-jaune, et une faible biréfringence (figure 7c, d). Ce sont les traits micromorphologiques caractéristiques des horizons de sols affectés par la ferrolyse (Brinkman *et al.*, 1973 ; van Oort *et al.*, 2008).

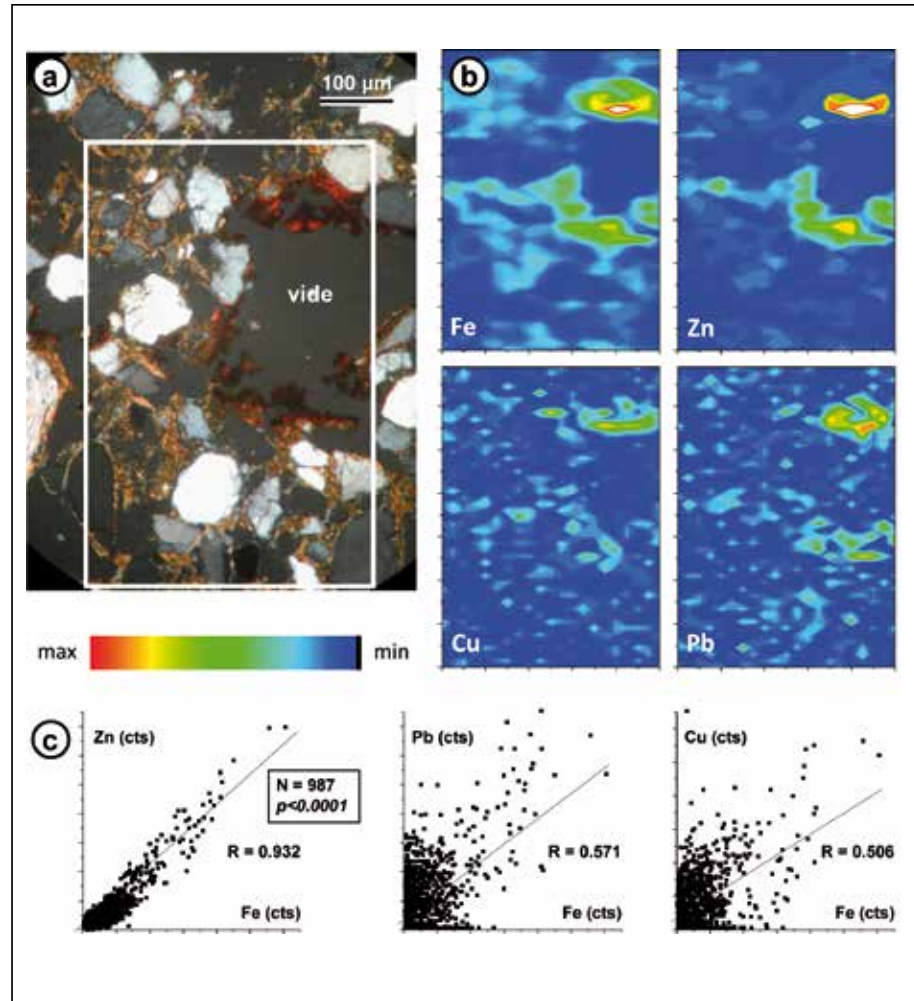
De plus, des précipitations d'oxyhydroxydes de fer et/ou de manganèse sont visibles, à la surface des ferri-argilanes, dans de nombreux grands pores qui constituent des voies préférentielles d'écoulement de l'eau (figure 7a, e). Localement, ces précipitations d'oxydes forment des revêtements épais, purs et translucides (figure 7e) qui se superposent aux ferri-argilanes, indiquant qu'ils sont relatifs à des processus pédologiques récents. Ces dépôts d'oxydes de fer sont à relier à la dynamique du fer libéré par la ferrolyse. Une chronologie similaire, avec des ferranes superposées aux ferri-argilanes, a également été observée dans les horizons profonds de sols pollués par des activités métallurgiques (van Oort *et al.*, 2006, 2007). Dans ce dernier cas, les ferranes contiennent de fortes teneurs en plomb qui proviennent de la précipitation de colloïdes "oxydes-Fe-Pb" en profondeur (Citeau *et al.*, 2003) et attestent que leur formation est liée à l'activité métallurgique et leur âge au maximum centenaire.

Des accumulations de manganèse, de formes allongées et arrondies, de couleur brun-noir, très sombres et optiquement opaques (figure 7g, h), ont probablement une origine biologique. Ces amas sont essentiellement composés de matières organiques amorphes et pourraient correspondre à des amas sclérosés de champignons, notamment des cortex fongiques (Stoops, 2003 ; Stoops *et al.*, 2010). Parfois, des structures de tissus cellulaires sont identifiables, sur plusieurs millimètres de longueur. Dans les sols du périmètre des épandages, ces accumulations sont omniprésentes au contact entre l'horizon BT et le substrat calcaire (figure 7g), mais également en dépôts superposés aux ferri-argilanes, dans les pores biologiques des horizons BT, Eg/BT et E (figure 7h). De telles structures fongiques accumulant le manganèse ont été décrites notamment dans des sols présentant des conditions d'anoxie temporaire (Thompson *et al.*, 2005). Les microorganismes interviendraient en transformant par oxydation le Mn<sup>2+</sup> soluble, provenant des zones anoxiques, en oxydes de Mn (Mn<sup>3+</sup> ou Mn<sup>4+</sup>) qui précipitent (Ehrlich, 1998). Ces oxydes de manganèse, noirs et opaques, se fixent alors sur les résidus fongiques à l'interface aéré/saturé des pores (Thompson *et al.*, 2005).



**Figure 10** - Distribution des éléments métalliques à l'échelle microscopique par cartographie en  $\mu$ -XRF sur lames minces. (10a) Photographie d'un revêtement de fer (ferrane) recouvrant un ferri-argilane à la surface d'un large bio-pore de l'horizon Eg/BT (lumière polarisée). (10b) Cartographie par  $\mu$ -XRF de la distribution élémentaire de Fe, Zn, Cu, et Pb. (10c) Corrélations des éléments Zn-Fe, Pb-Fe, et Cu-Fe. Taille du faisceau :  $50 \times 30 \mu\text{m}$  ;  $N = 987$  points ;  $t = 500\text{s}$ /point d'analyse ; surface totale analysée :  $1\,000 \times 1\,380 \mu\text{m}$ , cts : nombre de photons détectés par 500s.

**Figure 10** - Micro-scale distribution patterns of trace metals by  $\mu$ -XRF mapping on soil thin sections. (10a) Photograph of a ferran juxtaposed on a ferri-argilan in a large biopore of the Eg/BT horizon (crossed polarized light). (10b)  $\mu$ -XRF mappings of distribution patterns of Fe, Zn, Cu, and Pb. (10c) Elemental correlations for Zn-Fe, Pb-Fe, and Cu-Fe. Beam spot size :  $50 \times 30 \mu\text{m}$  ;  $N = 987$  points ;  $t = 500\text{s}$ /point ; analysed surface :  $1\,000 \times 1\,380 \mu\text{m}$ , cts = counts per dwell-time (500s).



## Impacts des structures cryogéniques sur la dynamique des polluants métalliques

### **Incidence des structures polygonales sur les conditions de drainage**

La mise en évidence de structures polygonales décamétriques dans la couverture pédologique incite à reconsidérer le fonctionnement hydrodynamique des sols, et par conséquent les transferts de polluants. En effet, leur présence signifie des conditions contrastées de drainage sur de courtes distances. Les parties centrales des polygones occupent environ 60 - 70 % de la surface des sols et correspondent à des zones où l'horizon L repose soit directement sur le substrat calcaire fragmenté Rca, soit en est séparé par la présence d'un horizon BT de faible épaisseur (figure 8). Le substrat Rca est hautement perméable, et les eaux usées épandues dans ces zones, après avoir traversé l'horizon de labour, ont été évacuées dans le substrat calcaire. Par contre, au-dessus des structures d'invagination, l'écoulement des eaux est limité par

la présence d'épais niveaux sablo-argileux peu perméables. La stagnation de l'eau au-dessus des structures invaginées favorise l'accumulation dans les niveaux plus argileux d'une partie des polluants métalliques présents dans la solution du sol sous forme dissoute ou colloïdale. En piégeant les polluants, ces structures riches en argile joueraient donc un rôle protecteur vis-à-vis de l'entrée de l'eau dans le substrat calcaire proche.

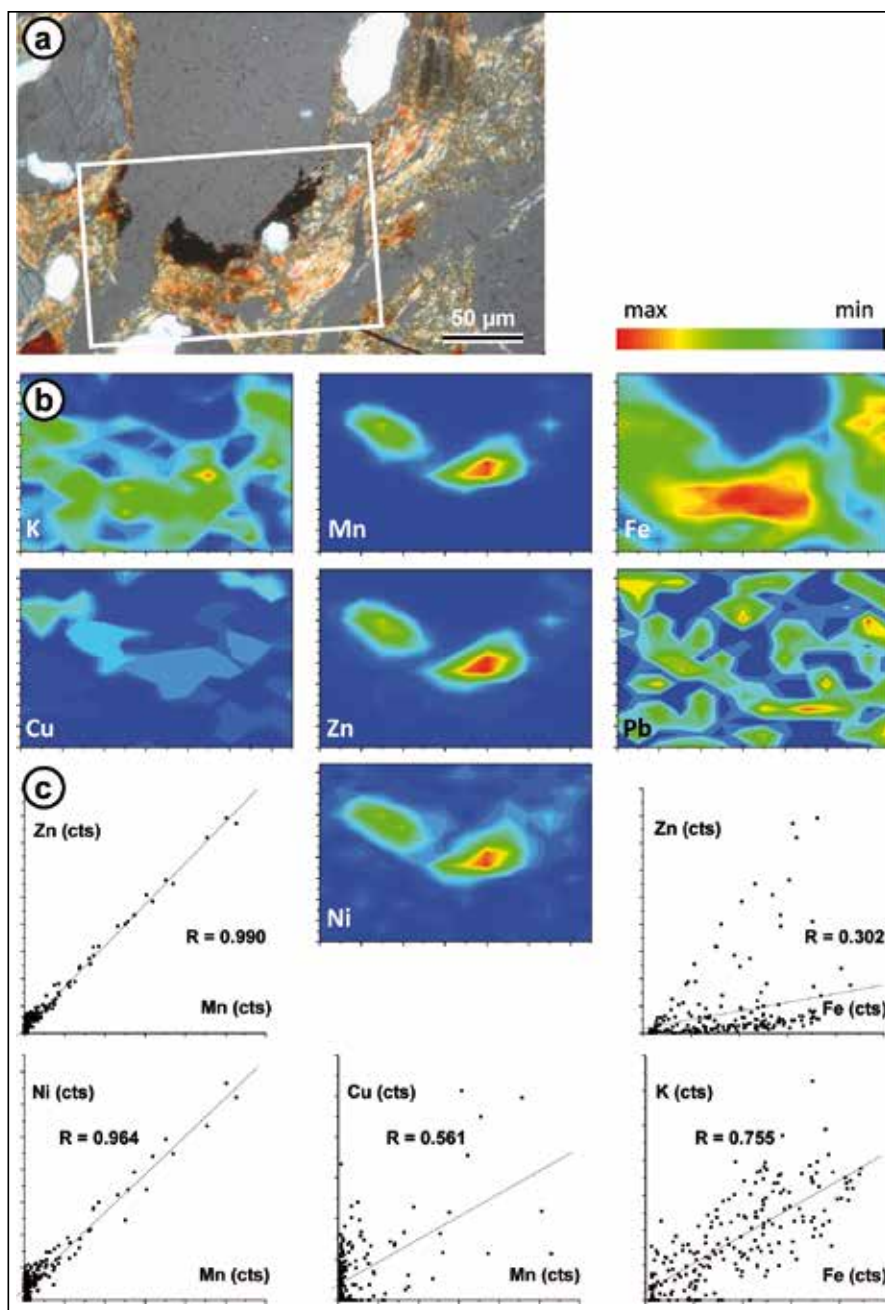
### **Analyses géochimiques du substrat calcaire**

Le transfert par des colloïdes organiques représente un vecteur significatif dans la migration des polluants métalliques dans les sols de la plaine de Pierrelaye (Citeau, 2004). Les particules de sable contribuent de manière négligeable à l'interception et la rétention en métaux, en comparaison de la fraction fine des sols, notamment les argiles et les oxydes de fer et de manganèse, qui développent une grande réactivité vis-à-vis des micropolluants minéraux (McBride *et al.*, 1997 ; van Oort *et al.*, 2006, 2008), mais également organiques (Tamtam



**Figure 11** - Distribution des éléments métalliques à l'échelle microscopique par cartographie en  $\mu$ -XRF sur lames minces. (11a) Photographie d'un revêtement de manganèse (manganèse) recouvrant un ferri-argilane à la surface d'un large bio-pore de l'horizon Eg/BT (lumière polarisée). (11b) Cartographie par  $\mu$ -XRF de la distribution élémentaire de K, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb et Ni. (11c) Corrélations des éléments Zn-Mn, Zn-Fe, Ni-Mn, Cu-Mn, et K-Fe. Taille du faisceau :  $50 \times 30 \mu\text{m}$  ;  $N = 210$  points ;  $t = 720/\text{point}$  d'analyse ; surface totale analysée :  $650 \times 420 \mu\text{m}$ , cts : nombre de photons détectés par 720s.

**Figure 11** - Micro-scale distribution patterns of trace metals by  $\mu$ -XRF mapping on soil thin sections. (11a) Photograph of a mangan juxtaposed on a ferri-argilan in a large biopore of the Eg/BT horizon (crossed polarized light). (11b)  $\mu$ -XRF mappings of distribution patterns of K, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, and Ni. (11c) Elemental correlations for Zn-Mn, Zn-Fe, Ni-Mn, Cu-Mn, and K-Fe. Beam spot size :  $50 \times 30 \mu\text{m}$  ;  $N = 210$  points ;  $t = 720\text{s}/\text{point}$  ; analysed surface :  $650 \times 420 \mu\text{m}$ , cts = counts per dwell-time (720s).



et al., 2011). Afin d'évaluer le rôle des structures cryogéniques millénaires sur le transfert des éléments métalliques apportés par la contamination centenaire des sols durant le XX<sup>e</sup> siècle, nous avons comparé les teneurs en Zn, Pb et Cu des substrats calcaires, à proximité immédiate (< 1 m) des invaginations aux teneurs des substrats à l'écart de ces structures cryoturbeées. Pour cette comparaison, nous avons considéré que les teneurs en métaux déterminées sur les échantillons en vrac étaient entièrement attribuées à la fraction réactive (< 50μm) des sols. Le calcul fait apparaître des distributions contrastées

(figure 9). Les teneurs moyennes en Zn, normalisées par rapport à la fraction réactive, sont environ 5 à 10 fois plus élevées dans les substrats calcaires Rca à l'écart des structures cryoturbeées (dans des sols sans horizon BT ou à épaisseur réduite) par rapport aux substrats proches des invaginations. Dans une moindre mesure, les teneurs en Cu apparaissent 3 fois plus élevées dans le substrat Rca à l'écart des structures invaginées qu'à proximité de ces structures, alors que pour Pb, le contraste n'est pas significatif. Ces différences de comportement des métaux sont à mettre en regard de leurs caractéris-

tiques géochimiques, le Zn étant mobile sous forme dissoute, alors que Pb et Cu sont essentiellement transférés sous forme colloïdale (Citeau, 2004). Ces résultats soulignent combien il est important de considérer la nature et les propriétés du sous-sol pour raisonner le transfert de micropolluants dans une couverture pédologique vers la nappe phréatique.

### **Accumulations des métaux dans les traits pédologiques récents**

La micro-fluorescence-X sur lames minces permet de mettre en évidence la distribution des éléments Fe, Zn, Cu et Pb dans les ferranes superposés aux ferri-argilanes, à la surface d'un grand biopore dans l'horizon Eg/BT (*figure 10a, figure 7e*). Les distributions de Fe et de Zn sont similaires (*figure 10b*), attestées par leur corrélation élevée ( $R_{Zn/Fe} = 0,99$ ;  $P < 0,0001$ ). Le zinc est détecté en grande quantité dans les ferranes mais également en quantité moindre dans les associations fer-argile des revêtements argileux. On note aussi une co-localisation de Pb-Fe et Cu-Fe, mais avec des degrés de corrélations moins élevés ( $R_{Cu/Fe} = 0,57$ ,  $R_{Pb/Fe} = 0,51$ ;  $P < 0,0001$  (*figure 10b, c*)). Les teneurs en Cu et en Pb étant plus faibles que celle du Zn, seules les parties les plus riches en fer permettent de détecter leur accumulation. Ces distributions indiquent la coprécipitation des métaux qui migrent dans la solution du sol sous forme dissoute (Zn) ou colloïdale (Cu, Pb) avec le fer mobilisé par ferolyse dans l'horizon de transition Eg/BT.

Des structures noires opaques, parfois organisées en revêtements et interprétées alors comme manganés, sont fréquemment observées dans les horizons E/BT et BT, et au contact avec le substrat calcaire. Les cartes de répartition obtenues par  $\mu$ -XRF d'une structure noire superposée à une ferri-argilane dans l'horizon Eg/BT (*figure 11a, figure 7h*) montrent une distribution remarquablement localisée du manganèse (*figure 11b*). Les concentrations en Mn sont fortement corrélées à celles de Zn, de Ni, et dans une moindre mesure de Cu (*figure 11c*). On note l'absence d'une distribution organisée de Pb. Le fer est présent dans les structures noires, mais principalement dans la ferri-argilane, et dans ce cas hautement corrélé à K par le biais des structures argileuses auxquelles il est associé (*figure 11c*). Si les structures noires correspondent bien à des fragments de résidus d'origine fongique (sclerotium), cela signifie que l'activité microbiologique, et notamment des champignons, dans les sols durablement irrigués avec des eaux usées, s'est développée dans l'ensemble des horizons E, Eg/BT, BT, et au contact des substrats calcaires, jusqu'à des fortes profondeurs (1 à 2 m) et qu'elle a joué un rôle important dans le piégeage et l'immobilisation des métaux polluants qui ont migré par voie colloïdale et/ou dissoute.

## **CONCLUSIONS**

La cartographie électrique de 16 ha de terrains agricoles, et des relevés pédologiques dans les tranchées ont permis de mettre en évidence la présence de grandes structures polygonales et d'apporter des précisions quant à la formation des sols dans ce secteur. Les relevés pédologiques détaillés dans des tranchées indiquent une pédogenèse complexe, couvrant au moins trois phases. Un luvisol avec des horizons E et BT contrastés s'est développé après une première phase de cryoturbation durant le Saalien II (Riss) et avant celle attribuée à la dernière période glaciaire du Weichsélien (Würm), donc pendant l'interglaciaire Riss-Würm. Cette dernière glaciation a laissé des stigmates au sein de l'horizon BT ancien et a entraîné la déformation de cet horizon avec de profondes invaginations dans le substratum calcaire. La seconde phase de pédogenèse, post cryoturbations du Weichsélien, a conduit au développement de Néoluvisols durant l'Holocène. Cette deuxième phase est attestée par les accumulations de carbonate, postérieures à la dernière glaciation, en bandes horizontales dans les substrats calcaires sableux Cs et gélifractés (Rca) et de minces revêtements de ferri-argilanes dans la partie supérieure du BT. Enfin, la troisième phase de pédogenèse correspond à des évolutions induites par les pratiques anthropiques au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Les épandages intensifs d'eaux usées de plusieurs milliers de litres au m<sup>2</sup> chaque année ont engendré des alternances de conditions d'oxydo-réduction dans les sols, en particulier au droit des niveaux argileux plus épais, où la partie supérieure du BT est dégradée par la ferolyse. Les revêtements de Fe et de Mn, résultants de ces évolutions, d'âge centenaire, recouvrent des ferri-argilanes des Néoluvisols.

Les structures polygonales d'âge millénaire engendrent des conditions hydrodynamiques contrastées entre les épaisses zones invaginées, plus riches en argile et peu perméables, qui jouent un rôle protecteur vis-à-vis du transfert des polluants métalliques vers le substrat, et les zones à l'écart de ces structures, avec des sols peu épais, favorables au transfert des métaux dans le substrat calcaire. Les relations entre l'évolution pédologique centenaire et la dynamique des polluants sont illustrées par la coprécipitation de Fe et Mn, mobilisés dans les conditions d'engorgement temporaire, et des métaux (Zn, Pb, Cu) dans des ferranes et manganés qui constituent les dépôts les plus tardifs dans les pores de ces sols.

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier l'équipe de Geocarta SA pour leur travail de prospection géophysique en 2008, ainsi qu'à toutes les personnes de Sisyphe-CNRS, de Mines ParisTech et de Pessac-Inra qui ont participé, de près ou de loin, aux différentes étapes d'échantillonnage des sols, de préparation d'échantillons et d'analyse au laboratoire. Ce travail a bénéficié

d'un soutien financier par le Conseil Régional de l'Île de France (CRIDF), du Conseil Général du Val d'Oise (CG95), de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) et du Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), ainsi que de l'ANR-08CESA-012 (projet RESACOR). Nous remercions Denis Baize pour la relecture du manuscrit et ses commentaires pertinents.

## BIBLIOGRAPHIE

- Afes, 2009 - Référentiel Pédologique 2008. Editions Quae, Versailles, 406 p.
- Baize D., Lamy I., van Oort F., Dère C., Chaussod R., Sappin-Didier V., Bermond A., Bourgeois S., Schmitt C. et Schwartz C., 2002 - 100 years spreading of urban waste water on market-garden soils close to Paris (France) : subsequent impacts and hazards. CD-Rom Transactions 17th World Congress of Soil Science, August, 14-21, Bangkok, Thailand, 2004, 1 - 10.
- Barnishel R.I. et Bertsch P.M., 1989 - Chlorites and hydroxyl-interlayered vermiculite and smectite. *In* : Minerals in Soil Environments (Dixon J.B., et Weed S.B., eds) 2<sup>nd</sup> Ed., Soil Science Society of America. Madison WI, SSSA Book Ser. N° 1 - pp. 729788.
- Bourennane H., Dère C., Lamy I., Cornu S., Baize D., van Oort F. et King D., 2006 - Enhancing spatial estimates of metal pollutants in raw wastewater irrigated fields using a topsoil organic carbon map predicted from aerial photography. *Science of the Total Environment* 361 - pp. 229 - 248.
- Brinkman R., 1970 - Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma* 3 - pp. 199 - 206.
- Brinkman R., 1979 - Ferrollysis, a soil-forming process in hydromorphic conditions. Doctoral thesis. Wageningen Publications n° 699, Wageningen, the Netherlands, 106 p.
- Brinkman R., Jongmans A.G., Miedema R. et Maaskant P., 1973 - Clay decomposition in seasonally wet soils : micro-morphological, chemical, and mineralogical evidence from individual argillans. *Geoderma* 10 - pp. 259 - 270.
- Citeau L., 2004 - Etude des colloïdes naturels circulant dans les eaux gravitaires de sols contaminés : nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux. Thèse de doctorat de INA-PG, Paris-Grignon, 249 p.
- Citeau L., Lamy I., van Oort F. et Elsass F., 2003 - Colloidal facilitated transfer of metals in soils under different land use. *Colloids and Surfaces A* 217 - pp. 11 - 19.
- Dabas M., 2008 - Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP<sup>®</sup>. *In* : Seeing the Unseen, Geophysics and Landscape Archaeology (Piro S., et Campana S., eds). CRC Press, Taylor and Francis Group, pp. 105 - 126.
- Dairon R., 2011 - Impact d'un siècle d'irrigation par des eaux usées sur la pédogenèse et la contamination métallique des sols : le cas des Luvisols sableux de la plaine de Pierrelaye. Rapport de stage M2, Master MSTV-ECH, UPMC - AgroParisTech, 35 p.
- Dère C., Lamy I., van Oort F., Baize D. et Cornu S., 2006 - Reconstitution des apports en éléments traces métalliques et bilan de leur migration dans un Luvisol sableux soumis à 100 ans d'irrigation massive par des eaux usées brutes. *Comptes Rendus Géoscience* 338 - pp. 565 - 573.
- Dylik J. et Maarleveld G.C., 1976 - Frost cracks, frost fissures and related polygons : a summary of the literature of the past decade. 2<sup>nd</sup> ed. Springer-Verlag, Berlin, 350 p.
- Ehrlich H.L., 1998 - Geomicrobiology : its significance for geology. *Earth Science Reviews* 45 - pp. 45 - 60.
- Espiau P. et Pedro G., 1983 - Etude du phénomène de ferrollyse par voie expérimentale. Production d'acidité d'échange et mise en évidence du rôle catalytique des minéraux argileux. *Science du Sol* 3 - pp. 173 - 184.
- FitzPatrick E., 1970 - A technique for the preparation of large thin sections of soils and unconsolidated material. *In* : Micromorphological Techniques and Applications (Osmond D.A. et Bullock P. eds) Technical Monograph 2, Soil Survey of England and Wales, Harpenden, pp. 3-13.
- Fujisaki K., 2010 - Impacts des pratiques agricoles sur la pédogenèse : le cas des Luvisols sableux irrigués avec des eaux usées dans le Bassin Parisien. Rapport de stage M2, Master MT2E, Université de Tours-ISTO, Orléans, 39 p.
- Isambert M. et Baize D., 2001 - Carte des sols agricoles de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt. Rapport de contrat DIREN Ile-de-France. INRA, Science du Sol, Orléans. 6 p + carte.
- IUSS Working Group WRB, 2006 - *World Reference Base for Soil Resources*. 2<sup>nd</sup> Edition. World Soil Resources Reports, N° 103. FAO, Rome, 128 p.
- Jamagne M. et Bégon J.-C., 1984 - Les sols lessivés de la zone tempérée. Apports de la pédologie française. A.F.E.S. Livre Jubilaire, pp. 55 - 76.
- Lamy I., van Oort F., Dère C. et Baize D., 2006 - Use of major- and trace-element correlations to assess metal migration in sandy Luvisols irrigated with wastewater. *European Journal of Soil Science* 57 - pp. 731 - 740.
- Latrille C., 1994 - Evolution des phyllosilicates 2:1 dans les sols de climat tempéré : application à la glauconite de Cormes. Mémoire de DEA, Université de Nancy I, INRA-Science du Sol, Versailles, 50 p.
- McBride M.B., Richards B.K., Steenhuis T., Russo J.J. et Sauvè, S., 1997 - Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application. *Soil Science* 162 - pp. 487 - 500.
- van Oort F., 2003 - Risques de mobilité des métaux - transect hectométrique de la distribution verticale du zinc. *In* : I. Lamy *et al.*, Etude d'un secteur agricole pollué par des épandages d'eaux usées : bilan environnemental et possibilités de reconversions végétales. 3<sup>e</sup> Rapport Projet Epandagri. Inra, Unité de science du Sol, Versailles, pp. 100 - 103.
- van Oort F., Jongmans A.G., Citeau L., Lamy I. et Chevallier P., 2006 - Microscale Zn and Pb distribution patterns in subsurface soil horizons : an indication for metal transport dynamics. *European Journal of Soil Science* 57 - pp. 154 - 166.
- van Oort F., Labanowski J., Jongmans T. et Thiry M., 2007 - Le devenir des polluants métalliques dans les sols : révélateur d'impacts de l'activité humaine sur la pédogenèse? *Etude et Gestion des Sols* 14 - pp. 287 - 303.
- van Oort F., Lamy I., Baize D., Jongmans A.G. et Chevallier P., 2008 - Impacts of long-term waste-water irrigation on the development of sandy Luvisols ; consequences for metal pollutant distributions. *European Journal of Soil Science* 59 - pp. 925 - 938.
- van Oort F., Thiry M., Jongmans T., Bourennane H., Cambier P., Lamy I., Citeau L. et Nahmani J., 2009 - Pollutions métalliques : distributions hétérogènes du Zn, Pb, Cd, et Cu et relations avec l'usage des sols. *In* : Contaminations métalliques des agrosystèmes et écosystèmes péri-urbains. (Cambier P., Schwartz C. et van Oort F., eds), Éditions Quae, Versailles, France, pp. 15 - 44.
- Risler E., 1897 - *Géologie Agricole* IV, pp. 162-169. Berger-Levrault Imprimerie, Nancy, France.
- Robert M., 1975 - Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide de rayons X. *Annales Agronomiques* 26 - pp. 363 - 399.
- Stoops G. 2003 - Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, USA, 184 p.
- Stoops G., Marcelino V. et Mees F., 2010 - Interpretation of morphological features of Soils and Regolith. Elsevier, Amsterdam, 720 p.
- Tabbagh A., Dabas M., Hesse A. et Panissod C., 2000 - Soil resistivity a non-invasive tool for soil structure characterisation. *Geoderma* 97 - pp. 393 - 404.
- Tamtam F., van Oort F., LeBot B., Dinh T., Mompelat S., Chevreuil M., Lamy I. et Thiry M., 2011 - Assessing antibiotic contamination in metal contaminated soils four years after cessation of long-term waste water irrigation. *Science of the Total Environment* 409 - pp. 540 - 547.
- Thiry M. et van Oort F., 1999 - De l'échantillonnage à la spéciation : pertinence des analyses minéralogiques par diffraction des Rayons-X dans les sites

- et sols pollués par des métaux. In : Les cahiers des Clubs Crin : Spéciation des métaux dans les sols. Editions Ecrin, pp. 96 - 107.
- Thiry M., van Oort F., Lamy I., Thiesson J., Tabbagh A. et Tamtam F., 2011 - Etude d'évaluation du risque de mobilité des métaux dans l'agrosystème contaminé de Pierrelaye-Bessancourt : prospections du site, fonctionnement des sols et tests de lixiviation. Rapport technique No R111125M-THI, Centre de Géosciences, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France, 169 p.
- Thiry M., van Oort F., Thiesson J. et Van Vliet-Lanoë, B., 2013 - Periglacial morphogenesis in the Paris Basin : insight from geophysical survey and consequences on the fate of soil pollution. *Geomorphology*, (en révision).
- Thompson A., Huber D.M., Guest C.A. et Schulze, D.G., 2 005 - Fungal manganese oxidation in a reduced soil. *Environmental Microbiology* 7 - pp. 1480 - 1487.
- Van Ranst E. et De Coninck F., 2002 - Evaluation of ferrolysis in soil formation. *European Journal of Soil Science* 53 - pp. 513 - 519.
- Van Vliet-Lanoë B. 1998 - Frost and soils : implications for paleosols, paleo-climates and stratigraphy. *Catena* 34 - pp. 157 - 183.
- Van Vliet-Lanoë B. 2 005 - La planète des glaces, histoire et environnement de notre ère glaciaire. Editions Vuibert, Paris, 470 p.
- Védry B., Gousailles M., Affholder M., Lefaux, A. et Bontoux, J., 2001 - From sewage water treatment to waste water reuse. One century of Paris sewage farms history. *Water Science and Technology* 43 - pp. 101 - 107.
- Washburn A.L., 1979- *Geocryology - A survey of periglacial processes and environment*. Arnold Publications, London, 406 p.