

Un facteur majeur de la pédogenèse après décarbonatation dans le cas de formations superficielles calcaires redistribuées au quaternaire : La nature des résidus non carbonatés

D. Baize⁽¹⁾, F. van Oort⁽²⁾ et H. Nédélec⁽³⁾

- 1) INRA, UR 0272 Science du Sol, F-45075 Orléans Cedex 2
- 2) INRA, UMR 1402 ECOSYS, F-78026 Versailles Cedex
- 3) Chambre d'agriculture du Loiret, F- 45921 Orléans Cedex 9

* : Auteur correspondant : denis.baize@inra.fr

RÉSUMÉ

Parmi les facteurs clé de la pédogenèse sous climats tempérés, il en est trois d'importance majeure relatifs aux formations superficielles calcaires redistribuées au Quaternaire : la teneur, la granulométrie et la nature minéralogique de leurs résidus non carbonatés. Les caractéristiques de ces résidus, insolubles aux acides chlorhydrique ou acétique, peuvent être facilement étudiées au laboratoire. Les formations calcaires redistribuées (FCR) présentent un aspect poudreux, une absence de structure pédologique, une forte porosité, une teinte jaunâtre et une teneur en calcaire variable mais toujours importante. Il s'agit de dépôts de redistribution de matériaux locaux, d'épaisseurs variables souvent assez faibles, rarement signalés sur les cartes géologiques, mais dont la composition est pourtant d'une importance capitale pour expliquer les propriétés des sols observés aujourd'hui.

Sous des climats tempérés comme ceux du nord de la France, la décarbonatation totale des FCR initialement peu, moyennement ou fortement carbonatées conduit à l'accumulation relative des minéraux silicatés (quartz, feldspath, glauconie, minéraux argileux).

Lorsque les résidus ainsi libérés ont une granulométrie à dominance grossière, les sols formés sont essentiellement sableux et peuvent évoluer vers des luvisols. Lorsqu'au contraire les minéraux argileux (hérités ou néoformés) dominant, les sols sont argileux voire argileux lourds, et leur évolution à long terme en est définitivement affectée : on observe alors soit des brunisols argileux, soit des Néoluvisols, soit des planosols. Afin d'illustrer cette diversité de voies d'évolution des sols issus de FCR, nous présenterons plusieurs exemples, localisés dans différentes régions de la moitié nord de la France.

- Le premier est celui de la Champagne Jovinienne où différentes "formations calcaires redistribuées" au Quaternaire ont donné naissance à une très grande variété de sols. La présence de ces FCR n'est souvent décelable que grâce à des sondages profonds.

- A proximité de Puiseaux (Loiret), on peut observer à 850 m de distance, un Calcisol argileux ou un Luvisol Typique sableux, tous deux issus d'une FCR d'aspect semblable, la principale cause de différenciation étant la granulométrie du résidu insoluble.

- Dans la partie sud-est de la Grande Beauce, des cartographies à moyenne échelle menées récemment ont mis en évidence la présence très fréquente de FCR bien caractéristiques quoique présentant des compositions variables (taux de calcaire, abondance des graviers).
- Les Luvisols Typiques sableux de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt (Val d'Oise). Bien que reposant sur deux niveaux de plateaux de calcaires durs, les sols doivent leurs propriétés à leur véritable matériau parental : une FCR constituée de matériaux locaux remaniés. Dans toutes ces situations, l'évolution pédogénétique postérieure à la décarbonatation totale est entièrement déterminée par la granulométrie et la minéralogie du résidu de décarbonatation du matériau calcaire initial.

Mots clés

Sols, décarbonatation, pédogenèse, formations superficielles.

SUMMARY

A MAJOR FACTOR OF PEDOGENESIS AFTER TOTAL CARBONATE DISSOLUTION : THE NATURE OF SILICATE RESIDUES.

The case of calcareous deposits redistributed during the quaternary

Among the key soil forming factors in temperate climates, one factor related to calcareous surficial deposits redistributed during the Quaternary, is of major importance : the content, texture and mineralogy of their non-calcareous residue. However, as they resist on carbonate dissolution by hydrochloric or acetic acid, such residues can be easily examined in laboratory conditions.

The redistributed calcareous deposits (FCR) show a powdery appearance, no aggregates, a large porosity, a yellowish colour and variable but sizeable calcium carbonate content. These are deposits resulting from redistributed and mixed local materials, exhibiting various thicknesses, rarely indicated on geological maps. However, their existence and composition are of major importance for explaining the properties of soils.

Under temperate climate in northern France, the complete dissolution and removal of CaCO₃ from the initially little, moderate or highly calcareous FCR often leads to a relative accumulation of silicate minerals (quartz, feldspar, glauconite, clay minerals).

Following total carbonate removal, soil formation depends to a large extent on the grain size distribution of the residual mineral fraction. For instance, on predominantly coarse textured residues sandy soils are formed, developing to podzols (if little or no clay), or to luvisols. By contrast, on residues with large contents of inherited or neoformed clay minerals, soils demonstrate a clayey or heavy-clay texture that lastingly controls further soil development, giving rise to clayey brunisols, Néoluvisols, or planosols.

In this article, the variety of soil formation pathways in redistributed calcareous deposits is discussed and illustrated by a series of examples taken from different regions in northern France :

- *In the "Champagne Jovinienne" region (around Joigny, Yonne département),*
- *close to Puisieux (Loiret département),*
- *In the south-eastern part of the "Grande Beauce" region (Pithiviers, Loiret),*
- *In the Pierrelaye-Bessancourt area (Val d'Oise département),*

In all these examples, pedogenesis is strongly governed by the grain size distribution and the mineralogical composition of the residual fractions liberated by total carbonate dissolution in the parent material.

Key-words

Soils, calcium carbonate dissolution, pedogenesis, superficial deposits.

RESUMEN**UN FACTOR FUNDAMENTAL DE LA PEDOGÉNESIS DESPUÉS DE LA DESCARBONATACIÓN EN EL CASO DE FORMACIONES SUPERFICIALES CALCÁREAS REDISTRIBUIDAS AL CUATERNARIO****La naturaleza de los residuos no carbonatados**

Entre los factores clave de la pedogénesis bajo climas templados, tres son de importancia fundamental en relación con las formaciones superficiales calcáreas redistribuidas al Cuaternario : el contenido, la granulometría y la naturaleza mineralógica de sus residuos no carbonatados. Las características de estos residuos, insolubles al ácido clorhídrico o acético, pueden ser fácilmente estudiadas en el laboratorio. Las formaciones calcáreas redistribuidas (FCR) presentan un aspecto polvoriento, una ausencia de estructura pedológica, una elevada porosidad, un color amarillento y un contenido en calcáreo variable pero siempre importante. Estas son depósitos de redistribución de materiales locales, de espesores variables a menudo bastante bajos, raramente señalados sobre los mapas geológicos, pero cuya composición es sin embargo de una importancia capital para explicar las propiedades de los suelos observados actualmente. Bajo climas templados como los del Norte de Francia, la descarbonatación total de las FCR inicialmente poco, moderadamente o fuertemente carbonatadas lleva a la acumulación relativa de minerales silicatados (cuarzo, feldespatos, glauconita, minerales arcillosos). Cuando los residuos así liberados tienen una granulometría con dominancia gruesa, los suelos formados son esencialmente arenosos y pueden evolucionar hacia luvisols. Cuando al contrario los minerales arcillosos (heredados o neoformados) predominan, los suelos son arcillosos incluso arcillosos pesados, y su evolución a largo plazo es definitivamente afectada : se observa entonces sea brunisols, sea neoluvisols, sea planosols.

A fin de ilustrar esta diversidad de vías de evolución de los suelos originados de FCR, presentamos varios ejemplos, localizados en diferentes regiones de la mitad norte de Francia.

- El primero es el de la Champaña "Jovinienne" donde diferentes "formaciones calcáreas redistribuidas" al Cuaternario son la base de una muy grande variedad de suelos. La presencia de estas FCR es detectable a menudo únicamente gracias a sondeos profundos.

- Cerca de Puiseaux (Loiret), se puede observar a 850 m de distancia, un Calcisol arcilloso o un Luvisol Típico arenoso, los dos derivados de una FCR de aspecto idéntico, la principal causa de diferenciación es la granulometría del residuo insoluble.

- En la parte Sur-Este del Gran Beauce, cartografías a mediana escala realizadas recientemente pusieron en evidencia la presencia muy frecuente de FCR bien caracterizadas aunque presentando composiciones variables (contenido en calcáreos, abundancia de gravas).

- Los Luvisols Típicos arenosos de la llanura de Pierrelaye-Bessancourt (Val d'Oise). Aunque reposando sobre dos niveles de mesetas constituidas de rocas calcáreas duras, los suelos deben sus propiedades al verdadero material parental : una FCR constituida de materiales locales removidos.

En todas estas situaciones, la evolución pedogenética posterior a la descarbonatación total es enteramente determinada por la granulometría y la mineralogía del residuo de descarbonatación del material calcáreo inicial.

Palabras clave

Suelos, descarbonatación, pedogénesis, formaciones superficiales.

Sous nos climats tempérés, le matériau parental détermine de façon très stricte la plupart des propriétés du futur sol. Pendant longtemps, le climat ni la végétation n'y pourront rien changer. Et ce sous l'influence :

- de sa granulométrie (cailloutis, argile lourde, sable, limon),
- du caractère plus ou moins altérable des minéraux primaires initialement présents (quartz, biotite, glauconie) et la nature des minéraux secondaires néoformés,
- de la nature minéralogique des minéraux argileux hérités (kaolinite, smectites),
- de sa nature chimique et l'ambiance physicochimique qui en découle (par ex. craies).

Certains phylums évolutifs sont interdits pour très longtemps voire pour toujours. Par exemple, un matériau très argileux de nature smectitique n'évoluera jamais par illuviation d'argile ni podzolisation. De même, dans un sable quartzueux pur, l'évolution pédogénétique ne pourra aboutir qu'à un podzosol ou à un Arénosol (selon la végétation).

Dans le cas de matériaux parentaux calcaires, sous climat tempéré du nord de la France, un des premiers processus d'altération est la dissolution progressive de la calcite, aboutissant *in fine* à la décarbonatation totale¹ et à une accumulation relative de minéraux silicatés (quartz, feldspaths, minéraux argileux) ou de métaux en traces (Cd, Zn) ou d'éléments majeurs (Fe), dans la mesure où ces éléments ne sont pas évacués hors du solum (Prudente *et al.*, 2002).

Les propriétés granulométriques et minéralogiques des résidus non carbonatés prennent alors une importance majeure, même s'ils ne représentent initialement que quelques pour cent.

Si les silicates ainsi libérés sont à dominance sableuse, les sols sont à l'origine essentiellement sableux et vont évoluer en absence d'argile vers les podzosols ou, en présence d'argiles, vers les luvisols. Si les minéraux argileux (hérités ou néoformés) sont dominants, alors les sols sont argileux voire argileux lourds, et leur évolution à long terme en est définitivement affectée : on observe alors soit des brunisols argileux, soit des planosols voire des pélosols.

LES FCR

En de nombreux points des marges sud et sud-est du Bassin parisien, existent des formations superficielles poudreuses, jaunâtres, très calcaires, dénommées dès 1988 "*formations calcaires redistribuées*" (FCR) (Baize, 1988). Il s'agit de formations de redistribution de matériaux locaux, d'épaisseurs variables souvent assez faibles, rarement signalées sur les cartes géologiques mais pourtant d'une importance capitale pour expliquer les propriétés des sols observés aujourd'hui.

¹ Évidemment, dans le cas de matériaux extrêmement calcaires comme les craies, il est souvent impossible d'atteindre ce stade de décarbonatation totale.

La présence de ces FCR, sous des horizons non calcaires, n'est souvent décelable que grâce à des sondages profonds (plus d'un mètre).

Dans le contexte du sud de la Beauce, Campy et Macaire (2003) nomment ce genre de formations superficielles et les décrivent comme des "*sédiments d'origine mixte, peu épais, complexes, où interfèrent altération, pédogenèse, apport éolien, ruissellement, solifluxion... Ils se trouvent à la périphérie des aires lœssiques à dynamique éolienne réduite*". Outre leur faible épaisseur, les FCR diffèrent des lœss vrais par leur mauvais classement granulométrique et par l'origine locale des matériaux remaniés. En outre, à la différence des lœss des plateaux du nord de la France, les FCR ne forment pas des couvertures continues : elles existent sur des épaisseurs variables, ou bien manquent totalement, en fonction de paléoreliefs, sur les plateaux, les versants ou les terrasses alluviales où on les observe aujourd'hui. Nous verrons aussi dans le cours de cet article que les FCR peuvent présenter des compositions variables à courtes distances.

Les FCR ont été formées par le vent essentiellement durant les périodes froides en absence de végétation du Quaternaire, en empruntant diverses matières aux affleurements géologiques locaux. Elles ont reçu aussi par voie éolienne des limons d'origine beaucoup plus lointaine. Elles contiennent aujourd'hui de 10 à 85 % de calcaire sous une forme fine (essentiellement limons et sables), très réactive, d'où une forte effervescence à HCl et une décarbonatation relativement rapide (à l'échelle de temps de la pédogenèse). Mais elles contiennent aussi d'autres minéraux que de la calcite : des silicates de diverses dimensions et origines : des minéraux argileux, des limons, des sables, des graviers...

Dans cet article, va être étudiée la relation entre la nature (granulométrie et minéralogie) des résidus non carbonatés des matériaux parentaux et les propriétés des sols qui en sont issus après décarbonatation totale. Cette relation va être illustrée par un certain nombre de cas que nous avons étudiés nous-mêmes ou que l'on peut retrouver dans la littérature.

Champagne Jovinienne et sa marge sud

Contexte général

La Champagne Jovinienne est une grande plaine agricole à paysage d'openfield à proximité de Joigny (Yonne). C'est une zone d'affleurements des craies tendres du Crétacé supérieur (*figure 1*). Juste au sud, s'étend l'Auxerrois Occidental, caractérisé par des sédiments du Crétacé inférieur : sables albiens, gaize² et argiles cénomaniennes (Baize, 1988 ; 1994, Baize et Voilliot,

² Roche détritique, tendre, grise, poreuse et légère, constituée essentiellement de spicules siliceux d'éponges, d'opale et, avant altération, d'un peu de calcaire. S'y ajoutent souvent des grains de glauconie.

Figure 1 - Paysage de Champagne Jovinienne. Dissymétrie de versants et de sols.

En exposition au nord-est : sols rougeâtres, non calcaires, profonds, issus de FCR sur pentes faibles. En exposition au sud-ouest : sols crayeux, blanchâtres, sur pentes fortes.

Figure 1 - Landscape of Champagne of Joigny. Asymmetry of slopes and associated soils.

North-east-facing : reddish, non-calcareous, thick soils, developed in FCR on gentle slopes. South-west facing : chalky, whitish soils.



1988). L'établissement de la carte pédologique au 1/50000 a permis de mettre en évidence l'omniprésence de FCR jaunâtres, très calcaires et d'aspect très similaire sur le terrain, dans ces deux régions naturelles, déposées au-dessus des craies, au-dessus de certains sédiments du Crétacé inférieur et au-dessus des terrasses d'alluvions plus ou moins anciennes de la rivière Yonne (figure 2).

Cependant, malgré leur ressemblance, ces FCR ont donné naissance à une étonnante variété de sols : Rendosols, Calcosols, Calcosols calcariques, Calcisols, Néoluvisols, Luvisols Typiques limoneux en surface, Brunisols Eutriques argileux pachiques, Planosols Typiques sableux en surface...

Des arguments cartographiques et surtout analytiques (taux de calcaire total, granulométries sans et après décarbonatation à HCl au laboratoire) ont permis de proposer deux principaux facteurs explicatifs de cette variabilité :

- la composition granulométrique des fractions non calcaires des FCR ;
- le rôle de la durée de pédogenèse = résultat du bilan [formation vs érosion] : des chronoséquences ont pu être établies dont tous les stades peuvent être observés aujourd'hui (Baize, 1988 ; figures 5 et 6).

Localement, conséquences de phénomènes d'érosion sur les versants, ces chronoséquences se combinent avec des

toposéquences dues à des troncatures (en haut de versant) et à des sur-épaississements (en bas de versants) (Baize, 1988).

Caractérisation des FCR de Champagne Jovinienne

Les FCR de Champagne Jovinienne présentent sur le terrain quatre grandes caractéristiques communes :

- effervescence à l'acide moyenne à très forte ($\text{CaCO}_3 = 15$ à 86%) ;
- couleur jaunâtre ou beige-jaunâtre (10 YR 5/5 - 5/6 - 6/5 ou 6/6 humide) ;
- pas de structure pédologique, aspect farineux (d'où le surnom de "bouillies" qui leur est parfois donné) ;
- rares petits graviers (1 à 10 %) de craie, de gaize ou éclats de silex.

Néanmoins, il a été possible de distinguer quatre catégories de FCR selon le nombre et la nature des différents types de constituants présents (FCR 3 – FCR 4 ou FCR 5 – *tableau 1*) ou encore leur localisation dans le paysage (FCR T déposées sur les moyennes terrasses d'alluvions anciennes – *figure 2*)³.

La *figure 3* présente la granulométrie sans décarbonatation de 63 horizons profonds appartenant aux diverses catégories de FCR. Il s'agit donc toujours d'horizons C calcaires, les premiers

³ Nous ne disposons pas de données analytiques pour les FCR déposées sur les basses terrasses.

Figure 2 - Répartition des sols issus de FCR en Champagne Jovinienne.

Figure 2 - Geographical distribution of soils developed in FCR in Champagne of Joigny.

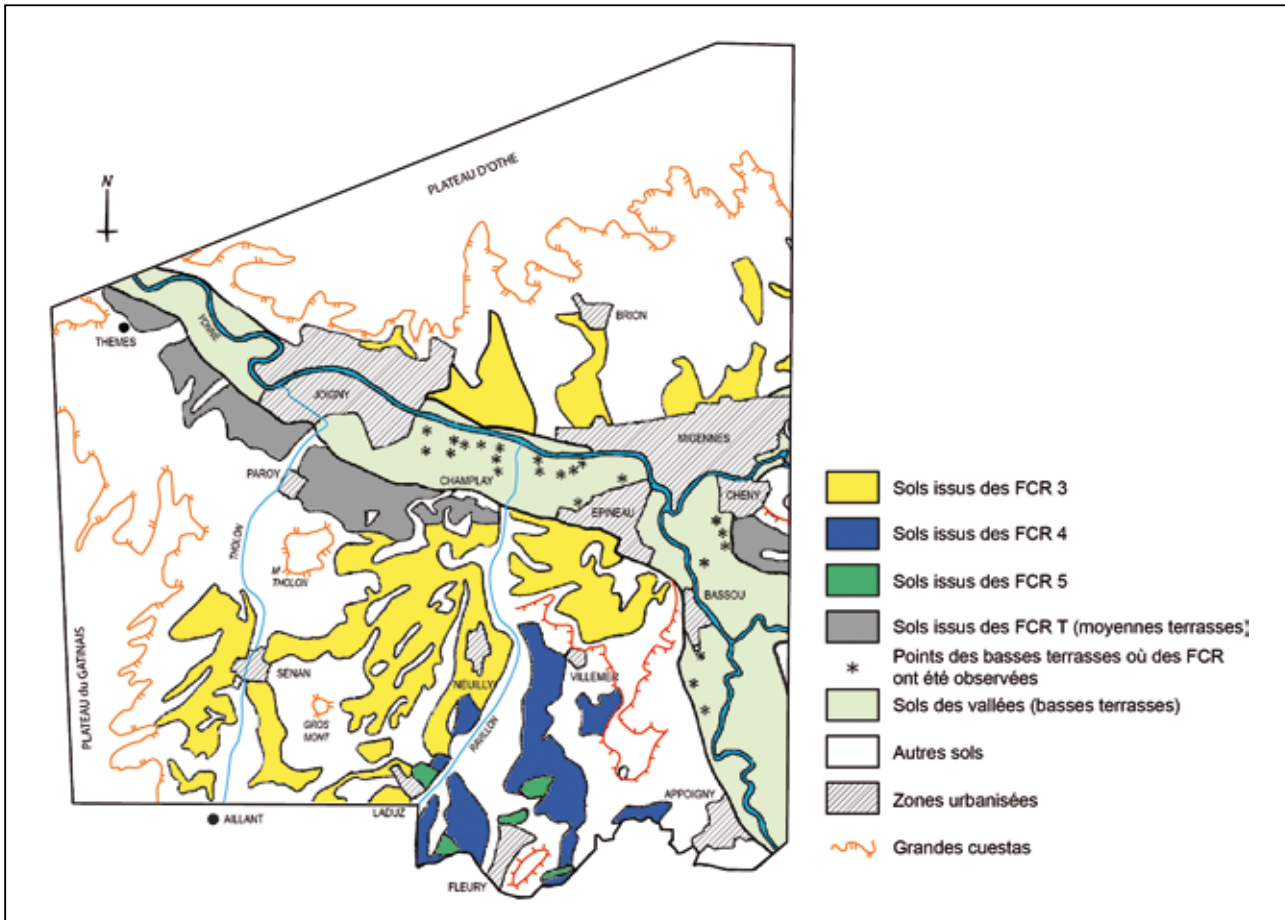


Tableau 1 - Distinction de trois types de FCR de Champagne Jovinienne selon le nombre et la nature des constituants observés.

Table 1 - Distinguishing the three types of FCR in Champagne of Joigny according to the nature and the number of constituents.

	Poudre de craie	Petits éclats de silex	Limons (provenant des plateaux du Gâtinais)	Gaize altérée (libérant de l'argile et des limons)	Sables quartzeux albiens
FCR 3	X	X	X		
FCR 4	X	X	X	X	
FCR 5	X	X	X	X	X

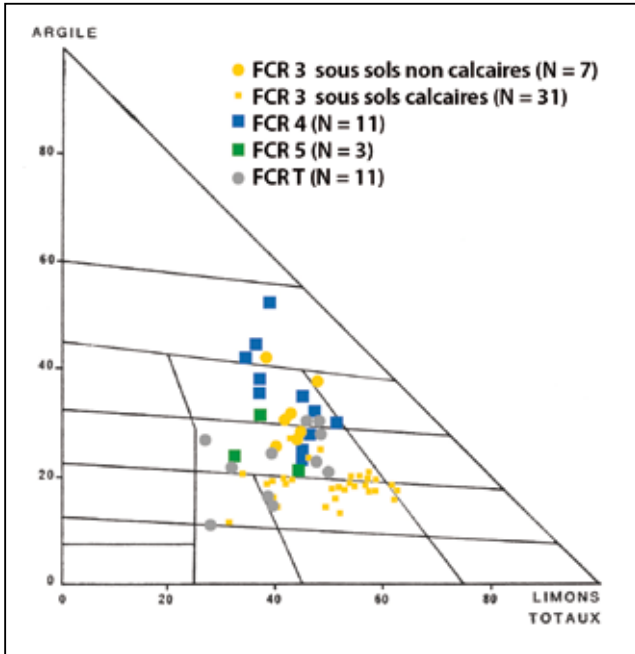
horizons depuis la surface qui ne présentent pas de structure pédologique et qui, très probablement, ont déjà subi un début de décarbonatation. La plupart des échantillons analysés se situent dans les 4 classes Als – LAS – Sal et Lsa du diagramme de texture du GEPPA.

La figure 4 permet une comparaison des granulométries après dissolution des carbonates au laboratoire des différents types de FCR avec celles d'autres matériaux calcaires locaux

(craie, sols crayeux et marnes). Le diagramme A est une présentation courante des résultats avec la teneur en argile (A) en ordonnée et la somme des fractions limons fins et grossiers (LT) en abscisse. On constate que les FCR 4 et les FCR des terrasses (FCR T) sont beaucoup plus chargées en fractions sableuses, et que les FCR dans leur ensemble se distinguent clairement des sols crayeux ou marneux dont les fractions non calcaires sont franchement argileuses. Le diagramme B

Figure 3 - Granulométrie sans décarbonatation des FCR de Champagne Jovinienne.

Figure 3 - Particle-size distribution without carbonate dissolution of FCR from Champagne of Joigny.



présente les teneurs en limons fins (LF) en ordonnée et les limons grossiers (LG) en abscisse. Les quatre catégories de FCR s'alignent sur l'axe LF = LG, depuis les moins chargées en sables siliceux (FCR 3) jusqu'aux plus sableuses (FCR 5 et FCRT).

Quelle est l'origine des fractions < 2 µm, parfois assez abondantes? Elles ne proviennent pas des craies tendres car celles-ci sont très pures (99,5 % de calcite) mais logiquement des craies argileuses du Cénomaniens, des argiles du même étage et, plus particulièrement dans le cas des FCR 4, de l'altération de la gaize (Baize, 1988).

Sols issus des FCR 3 et 5 - Rôles de la composition des fractions non calcaires et de la durée de pédogenèse

En fonction de la granulométrie des phases minérales libérées par la décarbonatation totale, l'évolution pédogénétique va suivre des chemins différents. Deux voies d'évolution sont illustrées pour les sols issus des FCR 3 (figure 5) et ceux issus des FCR 5 (figure 6).

Dans le cas des FCR 3, l'évolution débute et se maintient longtemps dans un milieu très calcaire. Après décarbonatation totale, la pédogenèse se développe dans un matériau avec des granulométries argilo-limoneuses ou limono-argileuses, en milieu encore calcique et de pH neutre, conditions se prêtant assez mal à l'illuviation verticale ou latérale. Dans le cas des

Figure 4 - Granulométrie des fractions non calcaires des FCR de Champagne Jovinienne.

A : Relation A vs LT ; B : squelettes granulométriques, relation LF vs LG.

Figure 4 - Particle-size distribution of the non-calcareous fractions of FCR from Champagne of Joigny.

A : relationship clay content (A) vs total silts (LT); B : granulometric skeletons, relationship fine silts (LF) vs coarse silts (LG).

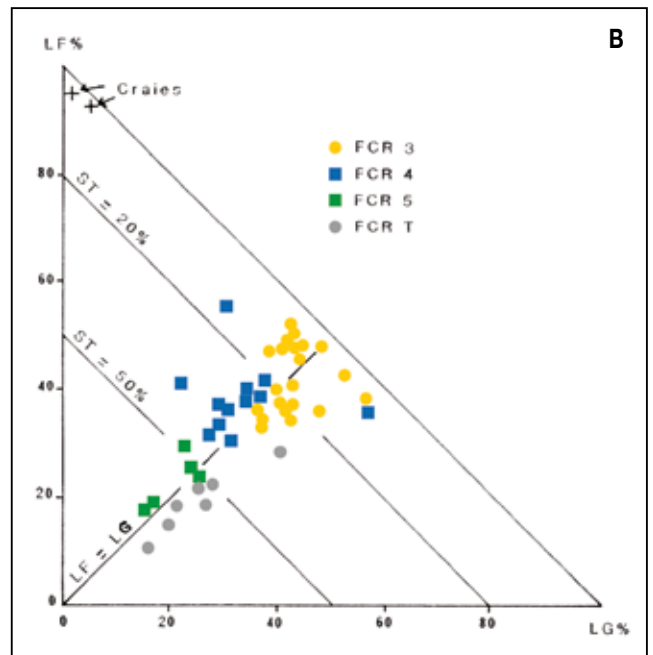
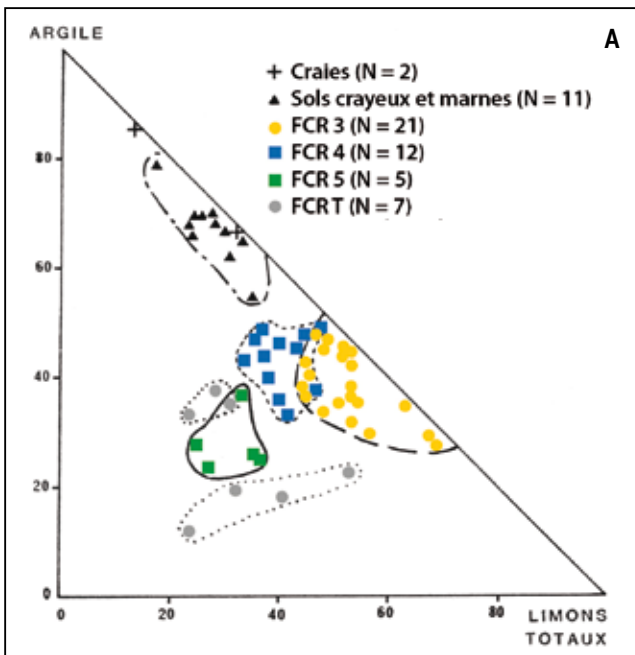


Figure 5 - Chronoséquence des sols issus des FCR 3 (sous agriculture).

Tous les stades de cette chronoséquence ont été observés et cartographiés en Champagne Jovinienne.

A noter que les horizons Sca – Sci et BT sont tous argilo-limoneux.

Structur. : structuration en agrégats polyédriques

Decarb. : décarbonatation avec accumulation relative des fractions insolubles

Accumul. CO₃Ca : accumulation de calcite sous la forme d'un horizon calcaire Kc.

k = teneur en calcaire

Figure 5 - Chronosequence of soils developed in FCR 3 (under agriculture).

All stages of this chronosequence have been observed and mapped in Champagne of Joigny.

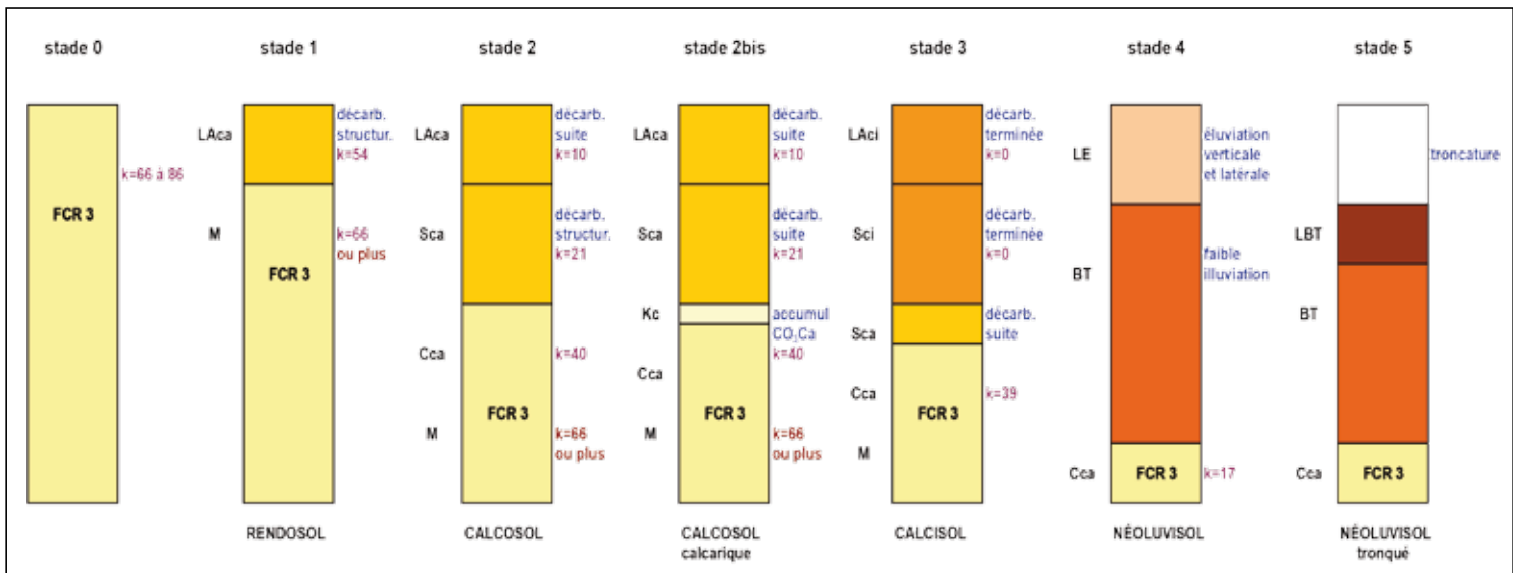
It should be noted that all Sca – Sci and BT horizons have a silty-clay texture.

Structur. : structuration in polyhedral peds

Decarb. : carbonate dissolution with correlative accumulation of residual insoluble fractions

Accumul. CO₃Ca : accumulation of calcite under the form of a "calcaric horizon" Kc.

k = calcium carbonate content.



FCR 5, moins calcaires à l'origine, le stade de la décarbonatation totale est atteint plus rapidement, fournissant alors un matériau sablo-argileux favorable au développement de planosols avec formation d'horizons sableux en surface (figure 6).

Deux solums développés dans des FCR ont été étudiés : la fosse Laduz, sous culture et la fosse Bois de Chassigne, sous forêt. La figure 7 en fournit un schéma interprétatif accompagné de quelques données analytiques. Les horizons de surface sont nettement sableux tandis que les horizons profonds contiennent respectivement 36 et 45 % d'argile.

Les Luvisols Typiques des moyennes terrasses d'alluvions anciennes

Sur ces terrasses (codées Fx et Fw sur les cartes géologiques), à des altitudes relatives de + 5 à + 28 m au-dessus du fond des vallées actuelles, ont été décrits des Luvisols Typiques plus ou moins épais en dessous desquels sont atteintes des FCR jaunâtres très typiques mais, comme

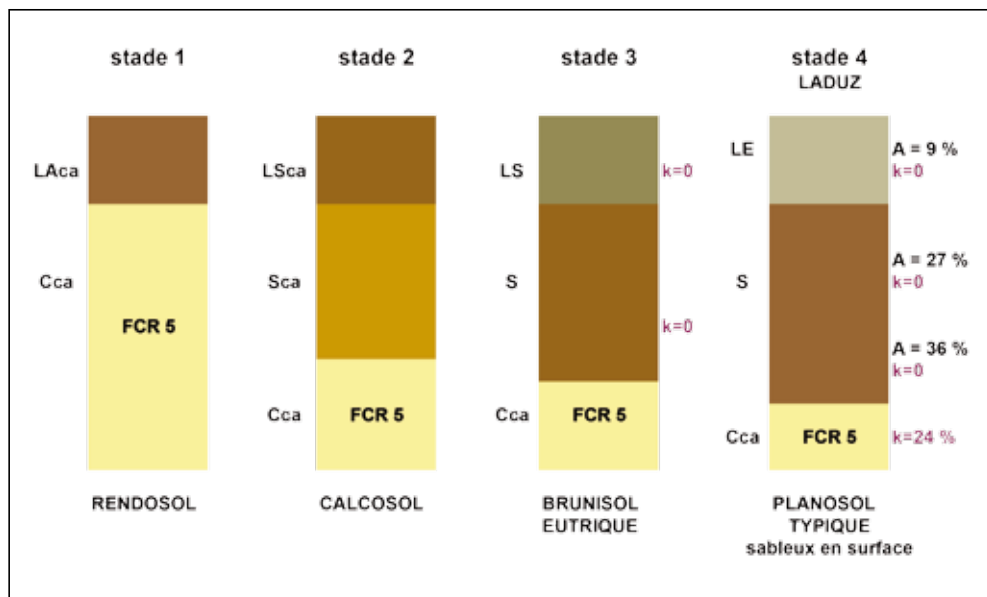
le révèlent les analyses après décarbonatation, relativement chargées en sables siliceux (figure 4).

- Sur les terrasses de Cheny (en rive droite du Serein) et d'Ormoys (rive gauche de l'Armançon (figure 2), les horizons de surface, épais de 30 à 40 cm, sont limono-sableux, avec 19 % d'argile en moyenne et autant de sables que de limons. Les horizons profonds, brun-ocre, argilo-limoneux à argileux, ont une structure polyédrique anguleuse, puis prismatique. La FCR apparaît entre 70 et 110 cm. De nombreuses petites taches noires révèlent un drainage interne imparfait.

- Sur les terrasses de Paroy-sur-Tholon jusqu'à Thèmes, en rive gauche de l'Yonne (figure 2), les luvisols sont épais de plus de 120 cm. Situés en positions faiblement déclives, ces sols présentent des horizons E limoneux (A = 20 % en surface) sur 30 à 60 cm d'épaisseur, passant graduellement à des horizons profonds argilo-limoneux (A = 40 % dans le cas des horizons BT les plus argileux). Dépourvus d'éléments grossiers, plus riches en limons qu'en sables, ces sols épais présentent un bon drainage interne et un fort potentiel agronomique.

Figure 6 - Chronoséquence des sols issus des FCR 5 (sous agriculture). A = teneur en argile ; k = teneur en calcaire

Figure 6 - Chronosequence of soils developed in FCR 5 (under agriculture). A = clay content; k = calcium carbonate content.



Discussion

Pour atteindre les stades les plus différenciés de ces chronoséquences (figures 5 et 6), à partir de matériaux aussi calcaires, il faut une durée suffisamment longue et un climat pluvieux. Par exemple, pour amorcer et amplifier les processus d'éluviation/illuviation permettant d'atteindre le stade de Néoluvisol limono-argileux en surface (passage du stade 3 au stade 4 de la figure 5). Toute phase d'érosion, même modeste, risque de retarder cette évolution voire de "remettre les compteurs à zéro".

La FCR la plus récente (au cas où il y aurait eu plusieurs phases de dépôt) repose sur la plus basse terrasse de l'Yonne (figure 2). Après enquête auprès de quaternaristes, il apparaît que ces plus basses terrasses datent de 20 000 ans (Chaussé et al., 2004).

Ilots boisés résiduels au sud-est de Puiseaux (Loiret)

Dans ce secteur, un programme pluridisciplinaire du CNRS a été mené afin de comprendre le statut de plusieurs petits îlots boisés de quelques hectares. S'agissait-il de résidus d'anciennes grandes forêts ou de la reconquête d'anciens terrains agricoles abandonnés (Girard et Baize, 1996)?

Ce secteur est situé sur un plateau constitué par le calcaire d'Étampes. Sous forêts de feuillus, développés à partir de deux FCR de même apparence (aspect farineux, couleur jaunâtre, forte effervescence à HCl), deux sols très différents ont été observés à seulement 850 m de distance : un Calcisol iso-argileux à 40 % d'argile (Bois d'Égline - fosse T - tableau 2 et figure 8) et un Luvisol Typique sableux en surface, sablo-argileux en profon-

deur (Bois Bouchereau - fosse F 14 - tableau 2 et figure 8). Les deux solums montrent en profondeur une FCR jaunâtre tandis que le calcaire d'Étampes affleure à quelques 350 m de là.

La fosse T est totalement décarbonatée sur 50 cm de profondeur et la texture du sol est uniformément argileuse. Il y a peu de sables. En revanche, la fosse F 14 est plus profondément décarbonatée (85 cm), et le sol montre une forte différenciation texturale : de 12 % d'argile en surface à 30 % en profondeur. Les sables représentent plus de 50 %. L'horizon BT, argilo-sableux, montre de très nombreux revêtements argileux rougeâtres, d'où sa teinte générale.

Les analyses granulométriques (tableau 3) montrent la ressemblance des textures après décarbonatation de la FCR et celles des horizons non-calcaires situés immédiatement au-dessus. Elles montrent aussi que la FCR de la fosse T contient une grande quantité d'argiles et de limons et fort peu de sables grossiers non calcaires. Inversement, la FCR de la fosse F 14 présente une grande proportion de sables grossiers siliceux que l'on retrouve dans l'horizon BT3 sus-jacent. Ces sables grossiers proviennent de la molasse du Gâtinais qui affleure à proximité (BRGM, 1978) et non pas des sables de Fontainebleau qui sont des sables fins (50 à 200 µm).

Dans le cas du solum F 14, la décarbonatation totale de la FCR riche en sables quartzeux (45 %) a libéré un matériau filtrant et contenant suffisamment d'argile (20 %) pour que se développe une argilluviation notable avec formation d'un Luvisol Typique, alors que dans le solum T, la forte charge en argile limite la différenciation pédologique. La grande différence entre les deux solums résulte donc essentiellement de la composition granulométrique (sable, argile) et minéralogique (quartz, phyllosilicates) du matériau parental, et notamment

Figure 7 - Planosols sableux en surface, issus de FCR 5
A = teneur en argile ; ST = teneur en sables totaux ; k = teneur en calcaire.

Figure 7 - Planosols with a sandy topsoil, developed in FCR 5.
A : clay content; ST : total sands content; k : calcium carbonate content.

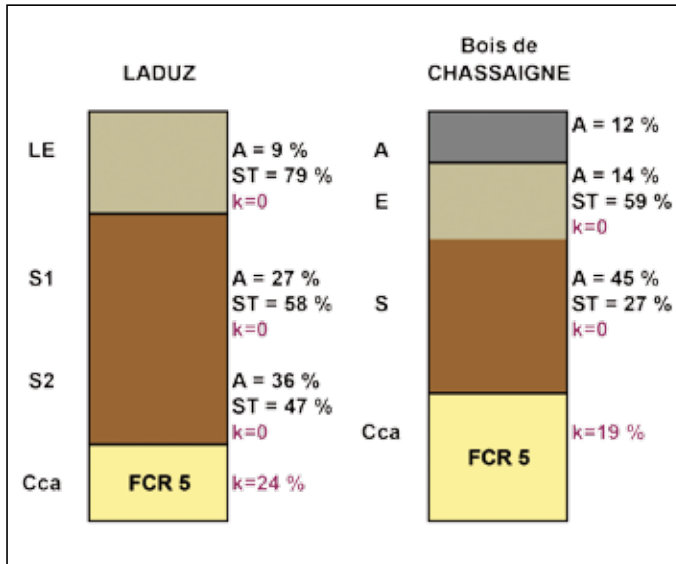


Figure 8 - Schéma morphologique des fosses T et F 14.
Figure 8 - Morphology of pits T and F 14.

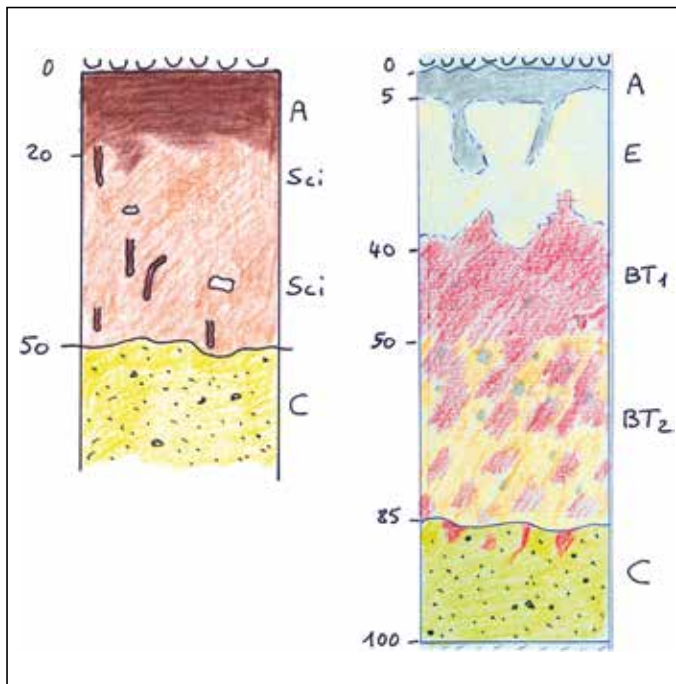


Tableau 2 - Quelques propriétés analytiques des deux fosses T et F 14. Granulométrie sans décarbonatation.

Table 2 - Some properties of the two sola T and F 14.
Particle-size distribution without carbonate dissolution.

	Fosse T	Fosse F 14
Type de sol (selon le Référentiel Pédologique 2008)	Calcisol isoargileux	Luvisol Typique
Épaisseur totale des horizons non calcaires	50 cm	85 cm
% argile en surface	40 - Aci	12 - E
% argile en profondeur	40 - Sci	30 - BT2
% sables en surface	8 - Aci	56 - E
% sables en profondeur	8 - Sci	50 - BT2
Taux de calcaire de la FCR %	34 - C1	19 - C1

de la charge en sables quartzeux. Cette différence reflète l'hétérogénéité de composition des FCR à l'échelle locale, hectométrique, qui est souvent une caractéristique de ce type de formation.

On notera la ressemblance frappante de ce Luvisol Typique avec ceux décrits par Robin en bordure sud de la forêt de Fontainebleau, 24 km plus au nord mais sur ce même plateau (Robin, 1993 – fosse 684.1).

Sud-est de la Grande Beauce et Gâtinais Ouest

(Baize, 2002 ; Soucémariadin, Nédélec et Verbèque, 2011 ; Nédélec et Verbèque, 2015)

Le secteur, étudié dans le cadre d'une cartographie systématique à 1/50000, se situe au sud-est de la Grande Beauce et à l'extrême ouest du Gâtinais, au nord du département du Loiret, sur les territoires des coupures Neuville-aux-Bois et Pithiviers (Soucémariadin *et al.*, 2011 ; Nédélec et Verbèque, 2015).

Sur la seule carte de Pithiviers, 3 200 sondages à la tarière ont été réalisés (soit en moyenne 1 pour 15 ha). Sur ce territoire de 56 000 ha, les FCR ont été reconnues à l'occasion de 315 sondages, c'est-à-dire dans environ 10 % des cas.

Morphologie des solums

Parmi les nombreuses fosses décrites et analysées, 43 horizons profonds correspondant à des FCR ont été sélectionnés sur la base de leur morphologie (couleur, structuration faible ou nulle, forte effervescence) et de leurs propriétés analytiques. Ces formations apparaissent à des

Tableau 3 - Granulométrie des fractions non calcaires des FCR (fosses T et F 14).
 Comparaison avec celle de l'horizon immédiatement sus-jacent.

Table 3 - Particle-size distribution of the non-calcareous fractions of FCR (pits T and F 14).
 Comparison with that of the immediately overlying horizon.

Fosse T	A	LF	LG	SF	SG
Sci2	39,4	24,7	29,5	2,7	3,7
C décarbonaté	26,7	27,3	41,9	2,1	2,0

Fosse F 14	A	LF	LG	SF	SG
BT3	20,5	5,9	9,7	3,2	60,7
C décarbonaté	20,9	8,2	20,8	4,7	45,4

Figure 9 - Fosse Pithiviers P35 (photo CA 45).

Figure 9 - Pit Pithiviers P35.



Figure 10 - Fosse Neuville 23 (photo CA 45).

Figure 10 - Pit Neuville 23.



Tableau 4 - Données analytiques principales des 43 horizons de FCR de Grande Beauce sud-est.**Table 4** - Main analytical data of 43 FCR horizons of south-eastern Grande Beauce.

	Granulométrie sans décarbonatation					Granulométrie après décarbonatation					C	CaCO ₃	CEC
	A	LF	LG	SF	SG	A	LF	LG	SF	SG			
	%					%							
Nombre de valeurs	43	43	43	43	43	28	28	28	28	28	43	43	43
Minimum	13,1	14,8	3,5	2,6	4,2	23,2	7,9	7,3	2,3	1,3	0,00	6,8	4,0
Médiane	24,9	28,5	14,7	8,5	12,9	34,8	25	23,1	4,1	7,0	0,30	40,0	11,1
Maximum	46,9	65,2	35,6	16,8	45,8	56,1	40,9	42,3	21,7	48,8	0,77	88,0	26,1

profondeurs très variables (de 45 à 145 cm) sous des horizons généralement argilo-limoneux à limono-argileux totalement décarbonatés (Calcosols, Néoluvisols) ou partiellement décarbonatés (Calcosols). La transition peut être soit brutale soit progressive, soit horizontale soit irrégulière. Les FCR se localisent au-dessus des niveaux de calcaire de Beauce mais également de ceux du calcaire du Gâtinais (à l'est de la cuesta oligocène-miocène), tous plus ou moins gélifracés et cryoturbés.

Les teintes les plus courantes sont 10YR5/6, 10YR6/6 et 10YR7/6 d'où leur nom vernaculaire local de "tuf jaune" qui s'oppose à celui de "tuf blanc" désignant les calcaires pulvérulents blancs de Beauce. Les figures 9 et 10 présentent des solums très caractéristiques.

Entre des FCR contenant au maximum 5 % de gravillons calcaires et des formations d'aspects très similaires mais contenant jusqu'à 35 % de graviers et cailloux calcaires, tous les intermédiaires peuvent être observés.

Les structures, telles que décrites en fosses, varient selon le degré de décarbonatation et, donc, de structuration progressive du matériau : dans les FCR les moins calcaires, on voit apparaître des structures polyédriques fines assez bien affirmées mais encore "fragiles". Dans la plupart des cas, il existe une très forte macro-porosité millimétrique qui confère aux FCR une grande capacité de circulation verticale des eaux de pluie.

En outre, des reprécipitations de calcite sous forme de pseudomycéliums sont presque toujours présentes mais en quantité variable. Enfin, on y trouve souvent des conduits et logettes de vers de terre anéciques.

Les principales données figurent au tableau 4. En fonction de leur composition initiale et de leur degré de décarbonatation, les teneurs en calcaire s'étagent de 7 à 88 % (médiane = 40 %). En outre, on note parfois de notables quantités de carbone organique (jusqu'à 0,77 %) dont l'origine serait essentiellement racinaire ou liée à des remplissages de conduits de vers.

La plupart des analyses granulométriques sans décarbonatation correspondent aux classes texturales Als, Al, LAS, Las et La du GEPPA (figure 11). Celles des résidus non calcaires (après décarbonatation au laboratoire) correspondent

(sauf une) aux classes A, Als, Al, LAS et La. Ces résidus contiennent un pourcentage plus important d'argile et beaucoup moins de sables mais encore une fraction importante de limons (figure 12). Si les carbonates étaient répartis de façon uniforme dans les 5 fractions granulométriques, on aurait la même composition granulométrique avant et après décarbonatation. Mais ce n'est pas le cas, car les particules calcaires sont surtout de la dimension des LF (2-20 µm) et des sables (50-2 000 µm). Ceci sera confirmé p. 186.

La figure 13 montre qu'il existe une relation générale négative entre la teneur en argile et la teneur en calcaire total. Cette relation reflète l'effet de la décarbonatation et la libération concomitante de particules argileuses constituant des impuretés dans les roches calcaires. La figure 14 présente la relation existant entre la CEC et le taux d'argile pour les 43 échantillons de FCR disponibles. La nature des minéraux argileux est donc assez constante, même s'il existe des nuances.

La figure 15 présente la relation dans les FCR entre sables grossiers sans décarbonatation (SG) vs sables grossiers après décarbonatation (SGdécarb.). Les 7 échantillons qui présentent une forte teneur en SG (> 20 %) sont les seuls à présenter également de fortes teneurs en SGdécarb. On peut en déduire que ces sables grossiers dans les FCR sont majoritairement de nature siliceuse. Effectivement, des gravillons de quartz ont été signalés à chaque fois par les descripteurs dans ces mêmes horizons ou bien dans d'autres horizons du même solum. Ces éléments siliceux, qui peuvent atteindre parfois une abondance estimée à 15 – 30 %, proviennent de la formation géologique affleurant à proximité : les sables de l'Orléanais (vestiges en place ou déplacés).

Comparaisons granulométriques entre FCR et horizons non calcaires immédiatement supérieurs

Compte tenu des données analytiques disponibles, cette comparaison n'a pu être réalisée que 4 fois (tableau 5). Sont confrontées la composition granulométrique après décarbonatation de la FCR la moins profonde et celle de

Figure 11 - Granulométries (sans décarbonatation) des FCR de Grande Beauce sud-est.

Figure 11 - Particle-size distribution (without carbonate dissolution) of FCR from south-eastern Grande Beauce.

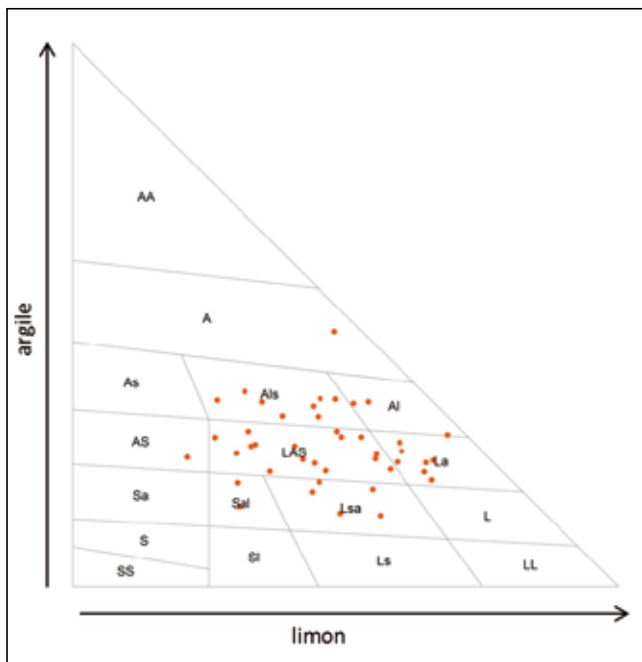
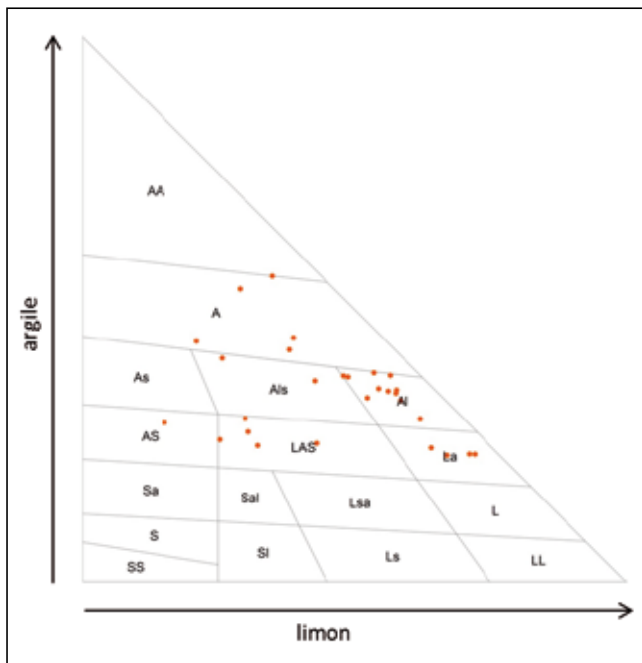


Figure 12 - Granulométries (après décarbonatation) des FCR de Grande Beauce sud-est.

Figure 12 - Particle-size distribution (after carbonate dissolution) of FCR from south-eastern Grande Beauce.



l'horizon non calcaire immédiatement sus-jacent. Dans trois cas sur quatre on constate une grande similarité, indiquant que la partie supérieure du solum résulte bien de la décarbonatation de la FCR. Dans le dernier cas (Neuville 23), la différence notable peut résulter d'une hétérogénéité locale du matériau parental.

Granulométrie des fractions calcaires

Par comparaison entre les granulométries sans et après décarbonatation, la granulométrie des fractions calcaires de la "terre fine" a pu être estimée pour 25 échantillons de FCR. On constate de grandes variations parallèlement avec les quantités elles aussi très variables en graviers et petits cailloux carbonatés. Selon les cas, c'est la fraction LF ou la fraction SG qui domine, plus rarement la fraction SF. Les moins représentées sont toujours les fractions LG et A.

En moyenne, sur les 25 horizons analysés, le calcaire se répartit ainsi (en % de l'ensemble des fractions calcaires) :

A = 12,7 % LF = 35,5 % LG = 8,1 %
 SF = 18,2 % SG = 25,5 %

Ce calcul montre que les fractions calcaires sont surtout constituées de limons fins (2-20 µm) et de sables (50-2 000 µm).

Potentiel d'enracinement

Les FCR ne présentent pas de structuration en agrégats mais constituent un matériau assez poreux. La question se pose de savoir quelles sont les possibilités d'enracinement des plantes cultivées dans de tels matériaux. Nicoullaud *et al.* (1995) ont mené, en Beauce, une étude détaillée de l'enracinement du blé d'hiver et du maïs en fonction des types de sols et notamment de leurs épaisseurs et de la nature des matériaux calcaires sous-jacents. Les sols étudiés se situent en Petite Beauce, donc plus à l'ouest que les secteurs cartographiés par Soucémariadin *et al.* (2011). Une FCR y existe également, nommée MLCF ("matériau limono-calcaire fin"). Ce matériau est décrit comme : "constitué d'un mélange de limon, de calcaire fin et de petits graviers calcaires dont la proportion peut devenir importante. [Il] a été remanié par des phénomènes de solifluxion et de cryoturbation, ce qui explique une certaine hétérogénéité dans sa teneur en calcaire fin (15 à 65 %) et en graviers. Son épaisseur varie de quelques centimètres à plus de 1 mètre".

En absence d'encroûtement calcaire, l'étude montre que cette FCR ne constitue pas un obstacle à l'enracinement du blé et du maïs, seulement un frein, frein d'autant plus important que le matériau est calcaire (et donc peu structuré). En outre, "en situation irriguée, moins le matériau limono-calcaire fin est profond et plus il peut être exploité par les racines ; un MLCF situé à 45 cm de profondeur peut être pénétré de 40 cm environ alors qu'un MLCF situé à 90 cm ne peut l'être que de 15 cm".

Ne peut-il y avoir des problèmes d'enracinement lié au calcaire actif?

Tableau 5 - Confrontation granulométrique entre le premier horizon de FCR et l'horizon non calcaire immédiatement sus-jacent (Grande Beauce sud-est).

Table 5 - Granulometric comparison between the first layer of FCR and the non-calcareous horizon immediately overlying it (south-eastern Grande Beauce).

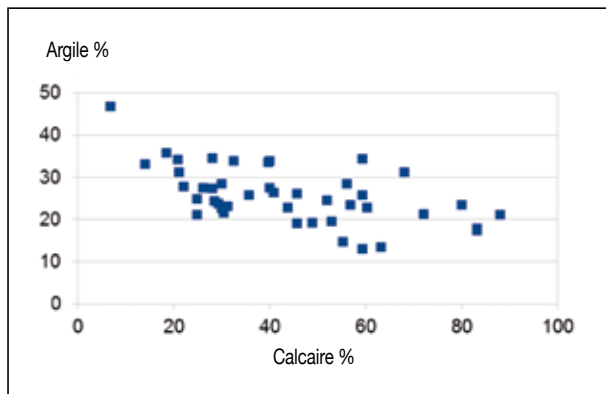
Identifiant		A	LF	LG	SF	SG	Σ
Neuville	2-H2	36,6	26,9	32,2	1,7	2,6	100
Neuville	2-H3	29,9	30,4	31,8	2,9	5,1	100
Neuville	11-H2	43,7	20,9	21,0	3,4	11,1	100
Neuville	11-H3	44,8	19,7	19,2	3,0	13,4	100
Neuville	23-H5	62,9	16,9	9,0	4,0	7,2	100
Neuville	23-H6	42,6	24,0	14,1	6,6	12,7	100
Pithiviers	36-H3	41,3	26,7	25,4	3,1	3,5	100
Pithiviers	36-H4	38,4	25,8	27,7	3,7	4,4	100

Sur fond bleu : granulométrie de l'horizon non calcaire immédiatement sus-jacent

Sur fond jaune : granulométrie après décarbonatation du premier horizon de FCR

Figure 13 - Relation taux d'argile / taux de calcaire total des FCR de Grande Beauce sud-est (N = 43)

Figure 13 - Relationship clay content vs total carbonate content of FCR from south-eastern Grande Beauce (N = 43).



Conclusion

Dans ce secteur sud-est de la Grande Beauce, jusqu'aux confins du Gâtinais, il existe sur de vastes surfaces des formations redistribuées à l'échelle locale formées d'un mélange en proportions variables d'argiles (de décarbonatation des formations calcaires aquitaniennes de Beauce et du calcaire d'Étampes), de limons et sables calcaires (provenant des calcaires de Beauce), de limons silicatés probablement d'origine éolienne plus lointaine et de sables grossiers et graviers quartzeux provenant de la formation des sables de l'Orléanais. Localement, s'y ajoutent des cailloux calcaires en proportions variables, ce qui constitue alors un faciès de

Figure 14 - Relation capacité d'échange cationique / taux d'argile des FCR de Grande Beauce sud-est (N = 43 ; $R^2 = 0,74$).

Figure 14 - Relationship cation exchange capacity vs clay content of FCR from south-eastern Grande Beauce (N = 43 ; $R^2 = 0.74$).

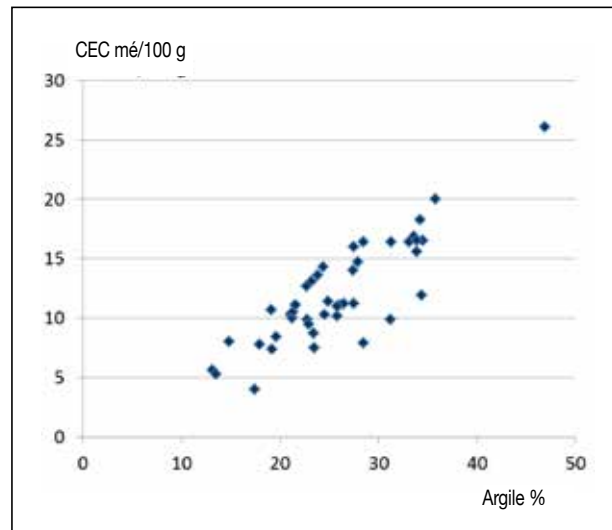
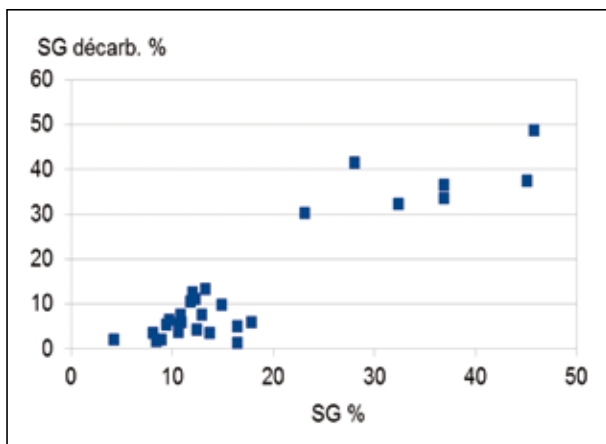


Figure 15 - FCR de Grande Beauce. Relation entre teneurs en sables grossiers sans (SG) et après décarbonatation (SG décarb).

Figure 15 - FCR from Grande Beauce. Relationship between coarse sands contents without (SG) and after carbonate dissolution (SG décarb).



transition vers les niveaux de calcaires de Beauce géolifracés et cryoturbés.

Plaine de Pierrelaye-Bessancourt (Val d'Oise)

(Baize *et al.*, 2002 ; van Oort *et al.*, 2013)

Contexte

Un grand périmètre d'une plaine agricole dans le secteur de Pierrelaye-Bessancourt a reçu pendant plus d'un siècle des eaux usées de l'agglomération parisienne, non traitées et en très grandes quantités (plus de 2000 l/m²/an). L'objectif initial de ces pratiques était double : i) il s'agissait, dans un louable souci hygiéniste, d'épurer ces eaux urbaines tout en fournissant des matières organiques et des fertilisants aux sols sableux de ce secteur pour le maraîchage ; ii) plus tard, s'est surimposée la nécessité de se débarrasser de grands volumes d'eau que la station d'épuration d'Achères ne pouvait pas traiter, ce qui a engendré des épandages par des quantités d'eaux brutes excessives. Il en a résulté une pollution systématique, principalement en éléments métalliques (Zn, Pb, Cu, et Cd) et en polluants organiques des sols du périmètre agricole ainsi irrigué (Baize *et al.*, 2002 ; Lamy *et al.*, 2006 ; van Oort *et al.*, 2008, Tamtam *et al.*, 2011), mais aussi des impacts sur la nature et le fonctionnement des sols (van Oort *et al.*, 2008, 2013).

Le contexte géologique et géomorphologique, présenté *figure 16*, montre que l'essentiel de la couverture pédologique irriguée correspond à des luvisols et à des Calciosols reposant

sur deux plateaux calcaires, séparés par un talus pentu constitué par les sables de Beauchamp et portant généralement une végétation boisée.

Plusieurs études ont été menées, relatives à ces pollutions (origines, niveaux, risques de phytodisponibilité, dangers de pollution des nappes phréatiques - programme ÉPANDAGRI). Des sondages ont été réalisés pour la cartographie des sols (Isambert et Baize, 2001) puis pour l'étude des pollutions métalliques (Baize *et al.*, 2001 ; 2002). Des études récentes de Thiry *et al.* (2013) et de van Oort *et al.* (2013) se sont focalisées sur les relations géométriques, en milieu fortement cryoturbé, entre les sols et les matériaux géologiques sous-jacents, avec comme objectif l'évaluation des risques de transfert des polluants vers la profondeur. Ci-dessous nous présentons quelques résultats relatifs à la nature des formations calcaires redistribuées locales.

Six tranchées de 30 à 50 m de longueur ont été ouvertes, creusées jusqu'au substratum calcaire dur qui a été atteint entre 0,6 et 3,5 m de profondeur. Leurs parois ont permis de décrire la macromorphologie de structures cryogéniques, la géométrie des horizons pédologiques et la nature et l'organisation des matériaux calcaires sous-jacents. Des réseaux polygonaux de 20 à 30 m de diamètre ont été ainsi mis en évidence, structures typiques des climats périglaciaires qui ont sévi durant les périodes froides du Quaternaire (Thiry *et al.*, 2013). Ces structures cryogéniques sont à l'origine d'une organisation de la couverture pédologique avec des luvisols plus ou moins épais dans les invaginations et des Calciosols au centre de polygones où le substrat calcaire remonte à proximité de la surface.

Les sols

Le type de sol dominant localement est un Luvisol Typique sableux en surface (*figure 17*) avec une différenciation d'horizons plus prononcée que dans les sols hors secteurs d'épandage (van Oort *et al.*, 2013). Cette différence est attribuée à la percolation des grands volumes d'eau pendant plus d'un siècle. Outre un horizon labouré très noir, plus ou moins épais, ses principaux horizons sont un horizon E sableux beige, parfois blanchi, surmontant un horizon BT sablo-argileux brun-rougeâtre, observés au-dessus d'un sable calcaire jaune-verdâtre (car glauconieux), d'épaisseur variable, sans structure, codé Cca (van Oort *et al.*, 2013). Ces sables surmontent les "Marnes et caillasses" du Lutétien, plus ou moins fracturées et cryoturbées (ou bien les calcaires de Saint-Ouen). Des accumulations calcaires (horizons Ck) se disposent localement en bandes ou lentilles horizontales d'environ 5 à 10 cm d'épaisseur et de 0,5 m à plusieurs mètres d'extension latérale, au sein de ce sable calcaire entre 0,5 et 1,5 m de profondeur, voire dans le niveau de calcaire fragmenté.

Les sables calcaires jaune-verdâtre contiennent de 10 à 32 % de calcaire et seulement de 6 à 15 % de particules < 2 µm (*tableau 6*). Les sables dominent largement, les sables fins équivalant sensiblement les sables grossiers.

Figure 16 - Schéma géologique et géomorphologique de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt. En rose : les luvisols et leur matériau parental.
Figure 16 - Geological and geomorphological sketch of the Pierrelaye-Bessancourt plain. Coloured in pink : luvisols and their parent material.

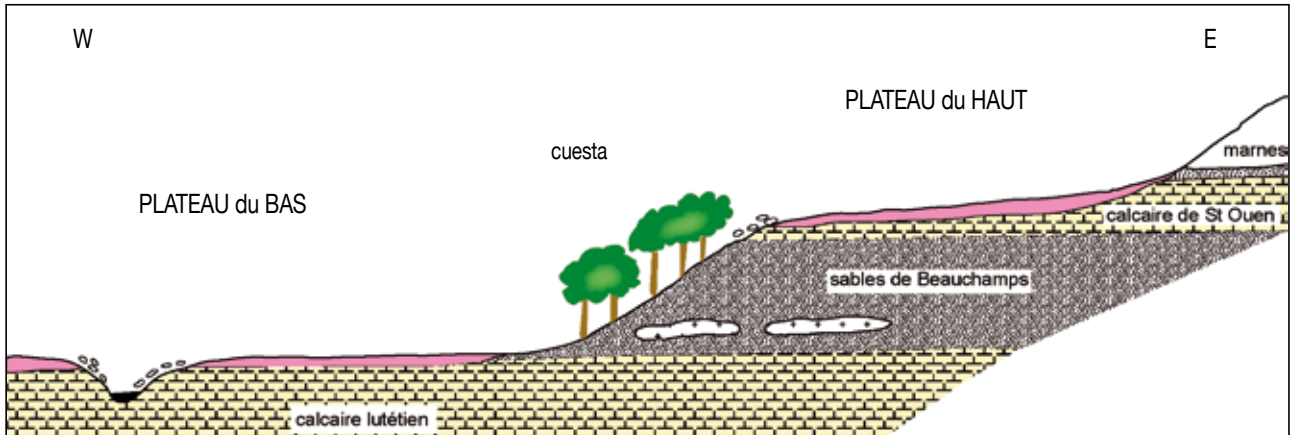


Figure 17 - Solum caractéristique de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt. Luvisol Typique sableux. L'horizon de surface sableux est très épais et très noir, indice d'une teneur en matières organiques particulièrement anormalement élevée (photo van Oort).

Figure 17 - Typical soil of the Pierrelaye-Bessancourt plain (sandy Luvisol Typique). The sandy surface horizon is very thick and black. That is the indication of an abnormally high content in organic matter with special properties.



La figure 18 présente la relation entre teneur en fer total (extraction avec HF) et teneur en argiles obtenue sur plus de 200 échantillons de luvisols de la plaine de Pierrelaye (tous horizons - analyses issues de différents programmes). Tous les horizons interprétés comme des horizons E ; E-BT ; BT ; BC et Cca sur des bases morphologiques s'alignent parfaitement. Dans les Néoluvisols et Luvisols Typiques, comme cela a été signalé depuis longtemps (Jamagne 1973 ; Jamagne et Pédro, 1981), les argiles et le fer migrent presque toujours ensemble, leur relation n'est donc peu ou pas affectée par les processus d'illuviation verticale. Deux populations d'échantillons sortent cependant de la relation générale. D'une part les échantillons provenant du substrat calcaire lutétien plus ou moins fragmenté, proportionnellement plus pauvre en fer et, d'autre part, la plupart des horizons de surface sableux qui ont été quelque peu enrichis en fer par les épandages d'eaux usées et autres apports. Une conclusion s'impose : les FCR verdâtres sont bien les matériaux parentaux des Luvisols Typiques, la glauconie étant à l'origine de la nature smectitique dominante du cortège argileux et une source de fer.

Ceci est confirmé par un autre argument : les analyses granulométriques d'environ 130 échantillons collectés dans les tranchées, dans différents horizons de la couverture pédologique, montrent des rapports "limons/sables" et "sables fins/sables grossiers" remarquablement constants (tableau 7). Dans les matériaux calcaires sous-jacents (Cca et Rca), 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 calcaires de la dimension des limons. Cette similitude granulométrique dans la composition du squelette granulométrique des horizons L, E, BT, ajoutée à leur identité morphologique et minéralogique signifie que les

Figure 18 - Relation teneur en argile / fer total pour 205 horizons de surface et de profondeur des luvisols de la plaine de Pierrelaye, des sables carbonatés glauconieux (Cca) et du calcaire lutétien plus ou moins fragmenté (Rca) (van Oort, communication personnelle). La régression linéaire a été réalisée sur les données des horizons E, E/BT, BT, B/C et Cca (N = 144).

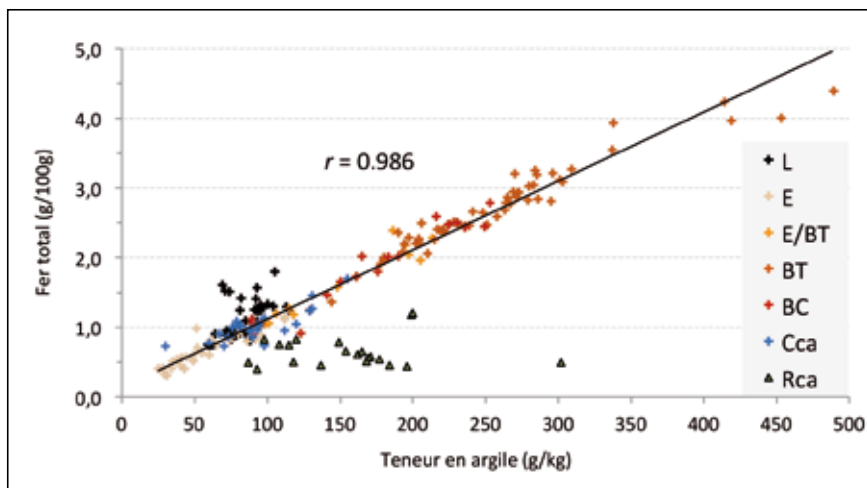


Figure 18 - Relationship clay content vs total iron content for 205 surface and deeper horizons from the luvisols of the Pierrelaye plain, of the carbonate-bearing glauconitic sands and of the Lutetian limestone more or less weathered (Rca). The linear regression has been made only on the data of E, E/BT, BT, B/C and Cca horizons (N = 144).

Tableau 6 - Plaine de Pierrelaye. Granulométrie sans décarbonatation de 13 échantillons de sables calcaires jaune verdâtre (horizons Cca).

Table 6 - Pierrelaye-Bessancourt plain. Particle-size distribution without carbonate dissolution of 13 samples of greenish calcareous sands (Cca horizons).

	Granulométrie sans décarbonatation (%)					
	A	LF	LG	SF	SG	CaCO ₃ (%)
	0-2 μm	2-20 μm	20-50 μm	50-200 μm	0,2-2 mm	
Minimum	6,0	2,7	1,9	32,2	30,0	10,4
Médiane	8,8	6,1	5,6	37,2	40,0	18,5
Maximum	15,5	9,3	8,4	54,4	48,5	32,0

Tableau 7 - Rapports entre les teneurs en limons (LT) et en sables (ST) et entre sables fins (SF) et sables grossiers (SG) dans les différents horizons et matériaux (van Oort et al., 2013).

Table 7 - Ratios between total silt contents (LT) and total sand contents (ST) and between fine sands (SF) and coarse sands (SG) in the different horizons and parent materials (van Oort et al., 2013).

Horizons	L	E	BT	Cca + Rca
nb	20	15	60	33
Rapport LT/ST	0,14 ± 0,04	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,05	0,25 ± 0,17
Rapport SF/SG	1,04 ± 0,14	1,01 ± 0,20	1,13 ± 0,20	0,86 ± 0,26

pédogenèses se sont développées dans un même matériau parental recouvrant le substrat de calcaire dur lutétien.

Malheureusement, nous ne disposons pas de granulométrie des FCR après décarbonatation.

Conclusion : constitution et origine

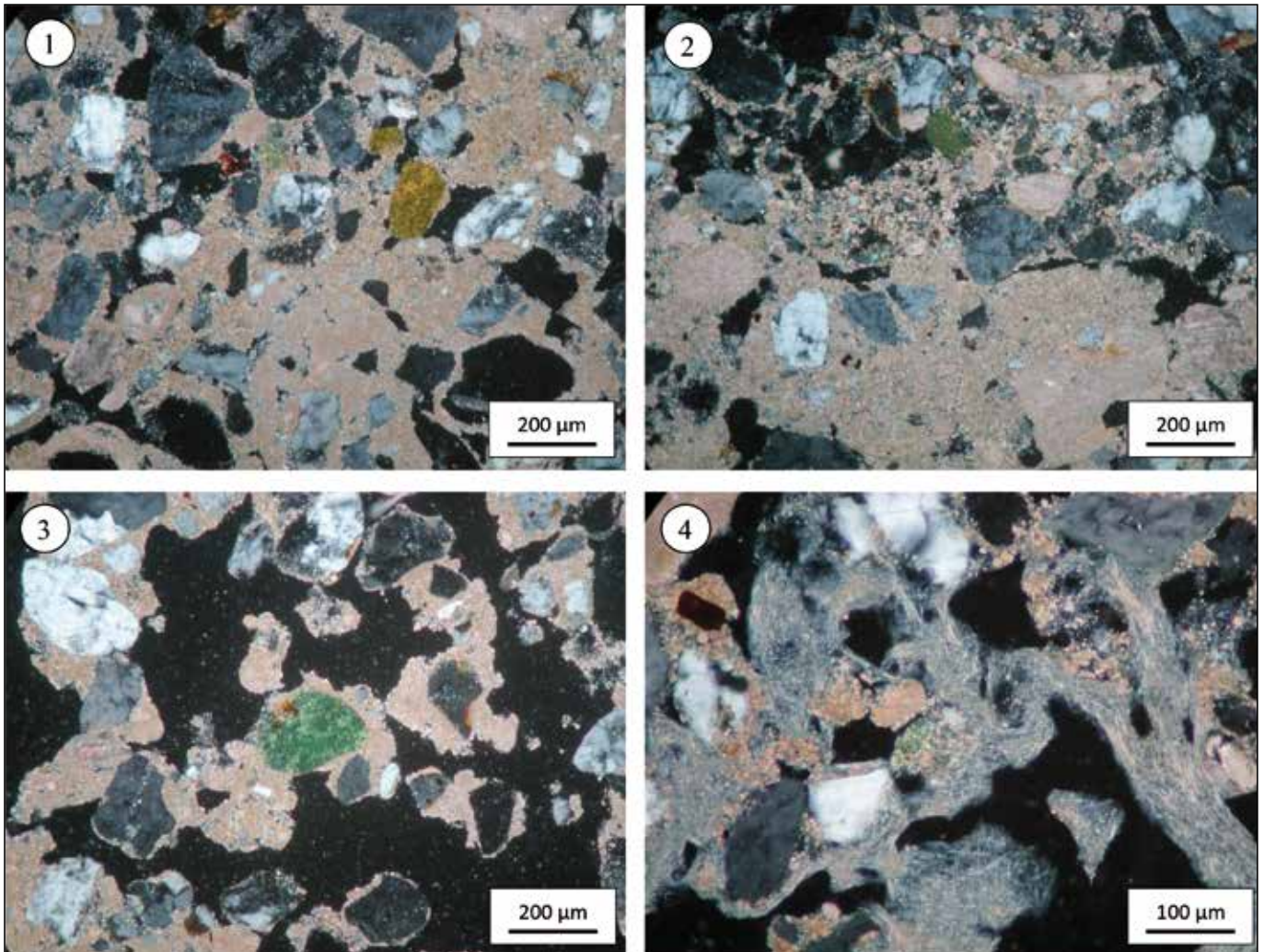
Ce sable calcaire jaune verdâtre est donc une FCR, formée au Quaternaire par redistribution et mélange de divers constituants (figure 19) :

- majoritairement, des sables quartzeux assez fins provenant, après remaniement, des Sables de Beauchamp qui affleurent à proximité immédiate (figure 16) ;
- des particules limoneuses calcaires arrachées aux calcaires et marnes du Lutétien ;
- des grains de glauconie provenant également des assises calcaires du Lutétien.

Son origine a été attribuée par Thiry et al. (2013) à la période glaciaire du Saalien I (260 ka), qui représente la plus

Figure 19 - La formation calcaire redistribuée de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt vue en microscopie optique (lumière polarisée et analysée). Les vides sont en noir ; les grains de quartz sont en blanc, gris ou noir. Deux grains de glauconie en cours d'altération sont visibles.

Figure 19 - The redistributed calcareous deposit (FCR) of the Pierrelaye-Bessancourt plain seen in optical microscopy (polarized and analyzed light). Voids are in black ; quartz grains in white, gray or black. Two weathered grains of glaucony are visible.



grande extension du permafrost en direction du sud au cours du Quaternaire. Différentes phases froides plus récentes accompagnées de cryoturbation expliquent la présence de la distribution hétérogène de ce matériau avec des poches profondes de 2 à 3 m dans les invaginations et des horizons interrompus, souvent proches de la surface au centre des polygones. Dans cette FCR peuvent s'ajouter des particules limoneuses silicatées d'origine éolienne plus lointaine (nous ne sommes qu'à quelques kilomètres du Vexin français où existe une couverture lœssique continue) et même, très localement sur le plateau du bas, de petits graviers alluviaux arrondis (nous sommes au confluent de la Seine et de l'Oise à seulement 35 m au-dessus de leurs vallées).

CONCLUSION GÉNÉRALE : UN FACTEUR DE PÉDOGÈNE MAJEUR

En contexte de formations superficielles calcaires redistribuées, un facteur souvent méconnu est la composition granulométrique (et minéralogique) des fractions insolubles des matériaux parentaux calcaires.

Dès que la décarbonatation par les agents climatiques et biologiques est terminée, la composition granulométrique et la nature minéralogique du résidu silicaté (quartz, minéraux argileux, glauconie, autres minéraux altérables) orientent fortement le type de pédogenèse ultérieure et ont donc un impact sur la

morphologie, les propriétés tant physiques que chimiques et les potentialités agronomiques ou sylvicoles des sols que nous observons et cultivons aujourd'hui.

Encore faut-il penser à réaliser des analyses après décarbonatation pour mieux cerner les propriétés granulométriques des fractions non calcaires, ce qui est rarement fait. Cette caractéristique, initialement indétectable, se démasque et montre alors toute son importance.

REMERCIEMENTS

Un grand merci à Dominique Schwartz dont les remarques et critiques constructives ont permis d'améliorer considérablement ce manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D., 1988 - Les formations calcaires redistribuées du Jovinien et les sols qui en sont issus. *Science du Sol*. 26 (2), pp. 113-136.
- Baize D. et Voilliot J.P., 1988 - Carte des sols de l'Yonne à 1/50000. Feuille Joigny. Notice, 142 pages. Station Agronomique de l'Yonne.
- Baize D., 1994 - Petites régions naturelles et paysages pédologiques de l'Yonne. INRA/Conseil Général de l'Yonne. Notice 191 p. + carte à 1/200 000 en couleurs.
- Baize D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.
- Baize D., Isambert M. et Lestel L., 2001 - Plaine de Pierrelaye-Bessancourt. Étude des sols. Détermination des fonds pédogéochimiques naturels et des teneurs agricoles habituelles en éléments traces métalliques. Estimation des niveaux de pollution. Recherche d'autres sources polluantes. Rapport de contrat DIREN Ile de France. 52 p.
- Baize D., 2002 - Pollutions par le plomb - Impact de trois établissements industriels sur les sols cultivés environnants. pp. 351-374. *In* : "Les Éléments traces métalliques dans les sols – Approches fonctionnelles et spatiales" D. Baize et M. Tercé coord., INRA Éditions, Paris.
- Baize D., Lamy I., van Oort F., Dère C., Chaussod R., Sappin-Didier V., Bermond A., Bourgeois S., Schmitt C., Schwartz C., 2002 - 100 years spreading of urban waste water on market-garden soils close to Paris (France) : subsequent impacts and hazards. 17th World Congress of Soil Science, Bangkok. Symposium, 29, paper n° 204.
- BRGM, 1978 - Carte géologique de la France à 1/50000. Feuille Pithiviers, XXIII-18.
- Campy M. et Macaire J.-J., 2003 - Géologie de la surface. Érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux. 2ème édition. Dunod, 440 p.
- Chaussé C., Voinchet P., Bahain J. J., Connet N., Lhomme V., Limondin-Lozouet N., 2004 - Middle and upper Pleistocene evolution of the river Yonne valley (France). First result. *Quaternaire*, Vol. 15, n° 2. pp. 53-64.
- Girard C.M. et Baize D., 1996 - Niveaux d'organisation et écosystèmes : exemple des îlots boisés et terroirs circulaires en Gâtinais. *Nature, Sciences, Sociétés*. 4, (4), pp. 310-323.
- Isambert M. et Baize D., 2001 - Carte des sols agricoles de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt. Rapport de contrat DIREN Ile de France. 6 p + carte.

Les podzols du Haut Jura

(Richard, 1961 ; Vadi et Gobat, 1998)

Il existe très localement des podzols typiques dans le haut Jura ! Cela peut paraître étrange dans un tel contexte géochimique dominé par le carbonate de calcium. Certes, le climat y est très arrosé (précipitations moyennes annuelles comprises entre 1600 et 2000 mm) et un enneigement important peut y persister jusqu'en mai. Mais les matériaux calcaires les plus courants (calcaires durs, marnes "ordinaires"), après décarbonatation totale, fournissent des matériaux argileux qui ne se prêtent pas à la podzolisation.

Cependant, là où il y a les podzols, il est constaté une coexistence systématique entre

- des matériaux parentaux riches en éléments silicatés ("vieilles molasses", "marnes riches en silicates" donnant naissance par décarbonatation totale à des "limons siliceux") et
- une végétation acidophile remarquable : la pessière à sphaignes associée à une fougère acidophile (*Blechnum spicant*).

Ici encore, dans un tout autre contexte que les cas étudiés dans cet article, c'est le contenu non calcaire de matériaux parentaux calcaires qui, après décarbonatation totale réalisée relativement rapidement, va déterminer l'évolution pédogénétique des sols.

- Jamagne M., 1973 - Contribution à l'étude pédologique des formations lacustiques du Nord de la France. Thèse de la faculté des sciences agronomiques de l'état, Gembloux, Belgique, 445 p.
- Jamagne, M. et Pédro, G., 1981 - Les phénomènes de migration et d'accumulation de particules au cours de la pédogenèse sur les formations limoneuses du Nord de la France. Essai de caractérisation du processus de "lessivage". *Comptes Rendus Acad. Sciences*, 292, pp. 1329-1332.
- 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.
- Nédélec H. et Verbèque B., 2015 - Notice explicative de la carte des sols de Pithiviers à 1/50000. Chambre d'Agriculture du Loiret. 313 p.
- Nicoulaud B., Darthout R. et Duval O., 1995 - Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce, *Étude et Gestion des Sols*, vol. 2, n°3, pp. 183-200.
- Prudente D., Baize D. et Dubois J.-P., 2002 - Le cadmium naturel dans une forêt du haut Jura français, pp. 53-70, *In* : "Les Éléments traces métalliques dans les sols – Approches fonctionnelles et spatiales" D. Baize et M. Tercé coord. INRA Éditions, Paris.
- Richard J.-L., 1961 - Les forêts acidophiles du Jura, étude phytosociologique et écologique. *Mat. Levé géobot. Suisse*, Fasc. 38.
- Robin A.M., 1993 - Catalogue des principales stations forestières de la Forêt de Fontainebleau. UPMC et ONF, mars 1993, 371 p.
- Soucémariadin L., Nédélec H. et Verbèque B., 2011 - Notice explicative de la carte des sols de Neuville-aux-Bois à 1/50000. Chambre d'Agriculture du Loiret, 225 p.

- Tamtam F., van Oort F., LeBot B., Dinh T., Mompelat S., Chevreuil M., Lamy I. et Thiry M., 2010 - 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., van Oort F., Thiesson J., Van Vliet-Lanoë B. 2013 - Periglacial morphogenesis in the Paris Basin : insight from geophysical prospection and impacts on the fate of soil pollution. *Geomorphology*, 197, pp. 34-44.
- Vadi G. et Gobat J.-M., 1998 - Le paradoxe de la podzolisation en domaine jurassien. Aspects pédologiques et phyto-sociologiques. *Bull. Soc. Neuchâtel. Sci. nat.*, 121, pp. 79-91.
- 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., Foy E., Fujisaki K. et Van Vliet-Lanoë B., 2013 – 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. *Étude et Gestion des Sols*, 20, 2, pp. 7-26.