

# Influence de matières fertilisantes sur les propriétés des sols

## Cas des 42 parcelles de l'INRA à Versailles

A. Pernes-Debuysse et D. Tessier

INRA Science du Sol, Route de St Cyr, 78026 Versailles Cedex

### RÉSUMÉ

Les pratiques de fertilisation et d'amendement contribuent à modifier les propriétés des sols. Sur le dispositif des 42 parcelles de l'INRA à Versailles, des variations physico-chimiques considérables sont observées. Les engrais ammoniacaux conduisent à des parcelles très acides, à faible capacité d'échange en cations ( $CEC_{soil}$ ) laquelle est essentiellement saturée en aluminium échangeable. Au contraire, dans les parcelles recevant des traitements basiques, le pH est supérieur à 8,0 et la CEC du sol, saturée par du calcium échangeable, a une valeur double de celle des parcelles acides. Ces différents états physico-chimiques se répercutent sur les propriétés physiques des sols notamment celles liées à son affinité pour l'eau telle que les états de surface des parcelles, la cohésion des agrégats ou la circulation de l'eau. Ceci montre qu'il est indispensable de prendre en compte les constituants du sol mais aussi leur environnement physico-chimique pour discuter des propriétés physiques des sols. La capacité d'échange en cations ainsi que la nature des cations échangeables, mesurés au pH du sol, se révèlent des outils précieux de suivi de l'évolution actuelle de la qualité des sols.

### Mots clés

Expérimentation longue durée, fertilisation, pH, acidification, propriétés physiques, capacité d'échange en cations

### SUMMARY

#### **INFLUENCE OF FERTILIZER PRODUCTS ON SOIL PROPERTIES: the case of 42 plots experiment of INRA in Versailles.**

*The use of fertilizers and amendment can change soil properties. On the experiment of 42 plots of INRA in Versailles, strong physico-chemical variations are observed. Ammoniacal fertilizers lead to very acid plots with weak cation exchange capacity of the soil ( $CEC_{soil}$ ) mainly saturated with exchangeable aluminium. On the opposite, with liming or basic treatment plots, pH is higher than 8,0 and the  $CEC_{soil}$ , saturated with exchangeable calcium, is double of those in acid plots. Those different physico-chemical situations influence physical soil properties in particular soil water affinity like soil surface shape, aggregates cohesion or water movement. It is essential to take in consideration soil components but also their physico-chemical environment in order to discuss soil physical properties. Cation exchange capa-*

city as well as the nature of exchangeable cations, measured at soil pH, appear performing tools for monitoring soil evolution and thus assess soil quality.

**Key-words**

Long term experiment, fertilization, pH, acidification, physical properties, cation exchange capacity

**RESUMEN**

**INFLUENCIA DE LAS MATERIAS FERTILIZANTES SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS**

Las prácticas de fertilización y de abono contribuyen a la modificación de las propiedades de los suelos. Sobre el dispositivo de las 42 parcelas del INRA a Versailles, variaciones físico-químicas considerables se observaron. Los fertilizantes amoniacales conducen a parcelas muy ácidas, con pequeña capacidad de intercambio en cationes (CECsuelos) la cual esta esencialmente saturada con aluminio intercambiable. Al contrario, en las parcelas que reciben tratamientos básicos, el pH está superior a 8.0 y la CEC del suelo, saturada por el calcio intercambiable, está del doble de la CEC de las parcelas ácidas. Estos diferentes estados físico-químicos se repercutan sobre las propiedades físicas de los suelos particularmente las que están ligadas a su afinidad al agua, tal que los estados de superficie de las parcelas, la cohesión de los agregados o la circulación del agua. Esto muestra que es indispensable tomar en cuenta los constituyentes del suelo pero tambien su estado físico-químico para discitir de las propiedades físicas de los suelos. La capacidad de intercambio en cationes así que la naturaleza de los cationes, medidos al pH del suelo, se revelan herramientas preciosos de seguimiento de la evolución actual de la calidad de los suelos.

**Palabras claves**

Experimentación a largo plazo, fertilización, pH, acidificación, propiedades físicas, capacidad de intercambio en cationes.

Une grande partie des sols français sont issus de l'altération de dépôts loessiques du Quaternaire. A partir du loess de départ, la séquence de sol suivante : sol brun calcaire ou calcique  $\Rightarrow$  sol brun  $\Rightarrow$  sol brun lessivé  $\Rightarrow$  sol lessivé acide, est caractéristique des sols du Nord de la France (Jamagne et Begon, 1984). Les processus d'évolution impliquent des transformations telles que la décarbonatation, la brunification ou le lessivage (Duchaufour, 1997). D'après Jamagne (1973), les facteurs de cette séquence d'évolution pédogénétique sont les matériaux originels (roche-mère, produits d'altération, dépôts...), les conditions climatiques, la couverture végétale, la topographie associée à la circulation de l'eau (drainage, ruissellement, hydromorphie...). Le facteur temps est aussi très important car cette évolution s'est produite sur des milliers d'années.

On s'interroge actuellement sur les interventions de l'homme sur les propriétés des sols et notamment sur l'évolution de leur organisation à court terme. D'après Bigorre *et al.* (2000), la couverture végétale et le mode d'occupation du sol influencent les propriétés des sols telles que la rétention en eau et la porosité. L'action de l'homme ne se fait pas seulement par l'implantation de culture mais aussi par un ensemble de pratiques culturales impliquant des remaniements mécaniques intenses des couches de surface ou des variations physico-chimiques par la fertilisation (Roger-Estrade, 1991, Coulomb *et al.*, 1990). Selon Jamagne (1973) les sols mis en culture dans le Nord de la France sont décarbonatés mais gardent une garniture cationique essentiellement calcique et un pH supérieur à 6,5. Pourtant ces sols restent sensibles à l'acidification, favorisée par des pratiques culturales comme l'intensification des rendements (prélèvements cationiques plus poussés), la modification de la circulation de l'eau (mis en place de plan de drainage) ou l'emploi intensif de fertilisants ammoniacaux. Dans ces sols de culture, seul l'entretien par des amendements basiques permet de limiter l'acidification (Julien et Turpin, 1999).

L'acidification met en jeu différents processus et phénomènes d'ordre physico-chimique comme la désaturation en cations alcalins et alcalino-terreux et l'aluminisation... Cependant ces mécanismes s'accompagnent aussi de transformations d'ordre physique et ce, en relation avec des changements de constitution ou d'environnement géochimique. Or si les phénomènes physico-chimiques sont déjà bien décrits, il existe actuellement un manque de recul sur l'évolution des propriétés physique des sols. A ce niveau le facteur temps est important et se situe souvent à l'échelle décennale, voire plus pour pouvoir être observés. Les dispositifs de longue durée sont donc des expérimentations importantes pour répondre à ces questions car ils permettent de porter un diagnostic sur les évolutions des sols engendrées par l'action anthropique et de définir des outils de suivis de la qualité des sols. Pourtant ces expérimentations sont plutôt connues et exploitées pour les interactions sol - plante (Rothamsted (UK), Woburn (UK), Askov (Danemark), Sanborn (USA), Skierniewice (Pologne), *in* Grignon, 1976) dans une perspective de gestion de la fertilité minérale sans que les propriétés physiques soient abordées directement.

Le dispositif de longue durée des 42 parcelles de l'INRA à Versailles permet d'étudier précisément l'évolution spécifique du sol sous l'influence d'engrais ou d'amendements. L'originalité du dispositif réside notamment dans l'absence de couvert végétal. L'interaction du sol avec la plante est supprimée (prélèvements, système racinaire, restitutions de MO...). Les conditions climatiques (air, eau), et les apports (engrais ou amendements) sont les seuls facteurs intervenant dans l'évolution du milieu.

L'objectif de cet article est de montrer l'impact des changements des propriétés physico-chimiques liées à des pratiques de fertilisation sur les propriétés physiques des sols, notamment celles liées à l'eau : affinité, rétention, circulation, comportement du sol vis-à-vis de l'eau.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le dispositif des 42 parcelles est situé sur le centre de recherche de l'INRA à Versailles. Depuis sa création en 1929 chaque parcelle de 5 m<sup>2</sup> reçoit un apport annuel d'engrais ou d'amendements, excepté dix parcelles qui servent de témoins. L'expérimentation est conduite en jachère nue (sans végétation) par un désherbage systématique manuel ou chimique (désherbant systématique). Les seules pratiques culturales sont un bêchage bisannuel au printemps et à l'automne sur 25 cm de profondeur.

Les parcelles sont réparties en deux groupes : des traitements azotés d'une part, des engrais phosphatés et potassiques et des amendements basiques d'autre part. Les résultats présentés dans cet article correspondent à des prélèvements effectués en mars 1999 sur 6 parcelles de pH acide ou basique dont une parcelle témoin.

|                      |                                       |
|----------------------|---------------------------------------|
| Parcelle témoin :    | - parcelle 11 (aucun apport)          |
| Parcelles acides :   | - parcelle 14 : phosphate d'ammonium  |
|                      | - parcelle 06 : nitrate d'ammonium    |
| Parcelles basiques : | - parcelle 26 : chaux                 |
|                      | - parcelle 35 : scories sidérurgiques |
|                      | - parcelle 39 : carbonate de calcium  |

Les traitements engrais potassiques et sodiques ou amendement organique n'ont pas été retenus dans ce travail. Le but de cette étude est en effet de mettre en évidence l'influence d'autres facteurs que la teneur en cations monovalents ou en matière organique.

Pour les mesures physico-chimiques, les échantillons ont été séchés à l'air et tamisés à 2 mm. La teneur en argile et le pH mesuré dans l'eau ont été effectués selon les normes Afnor (1996). La capacité d'échange cationique et les cations échangeables ont été déterminés au pH du sol par échange avec du chlorure de cobalt-hexammine (CEC<sub>sol</sub>) (Ciesielski et Steckerman 1997). L'aluminium échangeable a été dosé par extraction au KCl (Afnor 1996). La CEC a aussi été mesurée à un pH de référence (pH = 7) par la méthode Metson à l'acétate d'ammonium (CEC<sub>7</sub>) (Afnor 1996). Le carbone organique a été mesuré par analyse élémentaire.

**Tableau 1** - Données physico-chimiques des parcelles en 1999.**Table 1** - Physico-chemical data on plots in 1999.

|   | 1929         | Acides 1999          |              | Basiques 1999             |
|---|--------------|----------------------|--------------|---------------------------|
|   | Témoïn<br>11 | Parcelles<br>06 + 14 | Témoïn<br>11 | Parcelles<br>26 + 35 + 39 |
| pH (eau)  | 6,3          | 4,0 ± 0,7            | 5,6          | 8,2 ± 0,0                 |
| CEC <sub>7</sub> (cmol <sup>+</sup> /kg) (Metson)                           | 13,0         | 11,6 ± 2,6           | 10,0         | 10,1 ± 1,2                |
| CEC <sub>sol</sub> (cmol <sup>+</sup> /kg)<br>(Cobaltihexammine)            | 15,3         | 6,9 ± 1,0            | 8,7          | 13,6 ± 0,4                |
| Ca <sup>2+</sup> (cmol <sup>+</sup> /kg)                                    | 13,3         | 0,3 ± 0,2            | 5,1          | 13,1 ± 0,0                |
| Mg <sup>2+</sup> + K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup> (cmol <sup>+</sup> /kg) | 1,6          | 0,3 ± 0,0            | 0,9          | 0,5 ± 0,1                 |
| Al <sup>3+</sup> (cmol <sup>+</sup> /kg)                                    | 0,0          | 6,5 ± 0,1            | 2,2          | 0,0 ± 0,0                 |
| Argile (g/kg)   | 19,4         | 16,1 ± 2,1           | 18,4         | 16,1 ± 1,7                |
| Limon (g/kg)  | 58,2         | 57,7 ± 2,1           | 56,6         | 57,5 ± 2,4                |
| Corg (g/kg)   | 16           | 6,5 ± 1,2            | 4,9          | 5,9 ± 0,4                 |

Pour les mesures physiques, les échantillons ont été conservés en blocs non remaniés. Les mesures de rétention en eau et de porosité ont été effectuées sur des mottes de taille centimétrique à différents potentiels de l'eau par le dispositif de Tessier et Berrier (1979) et Afnor (1996) ou de Richards (1948). La teneur en eau a été mesurée par référence au poids à 105 °C. L'étude de la stabilité dans l'eau a été réalisée sur des agrégats de 2-5 mm d'après le protocole de Le Bissonnais et Le Souder (1995) (traitement 1 : humectation rapide par immersion). Les vitesses de réhumectation ont été mesurées sur des colonnes de terre. Pour cela 35 mg de sol sec tamisé à 1 mm ont été placés dans un tube de 1,8 cm de diamètre et 7 cm de hauteur. La colonne est disposée dans un bécher sur un système de filtre où l'eau affleure à niveau suivant le principe du vase de Mariotte. Ceci permet d'humecter l'échantillon par capillarité. Les mesures sont effectuées à partir de pesées suivant un pas de temps de 10 secondes jusqu'à saturation de la colonne de terre.

## RÉSULTATS

### Etat physico-chimique des parcelles

Les résultats sont donnés dans le *tableau 1*. Ils ont fait l'objet d'une étude antérieure plus détaillée par Pernes-Debuyser et Tessier (2001).

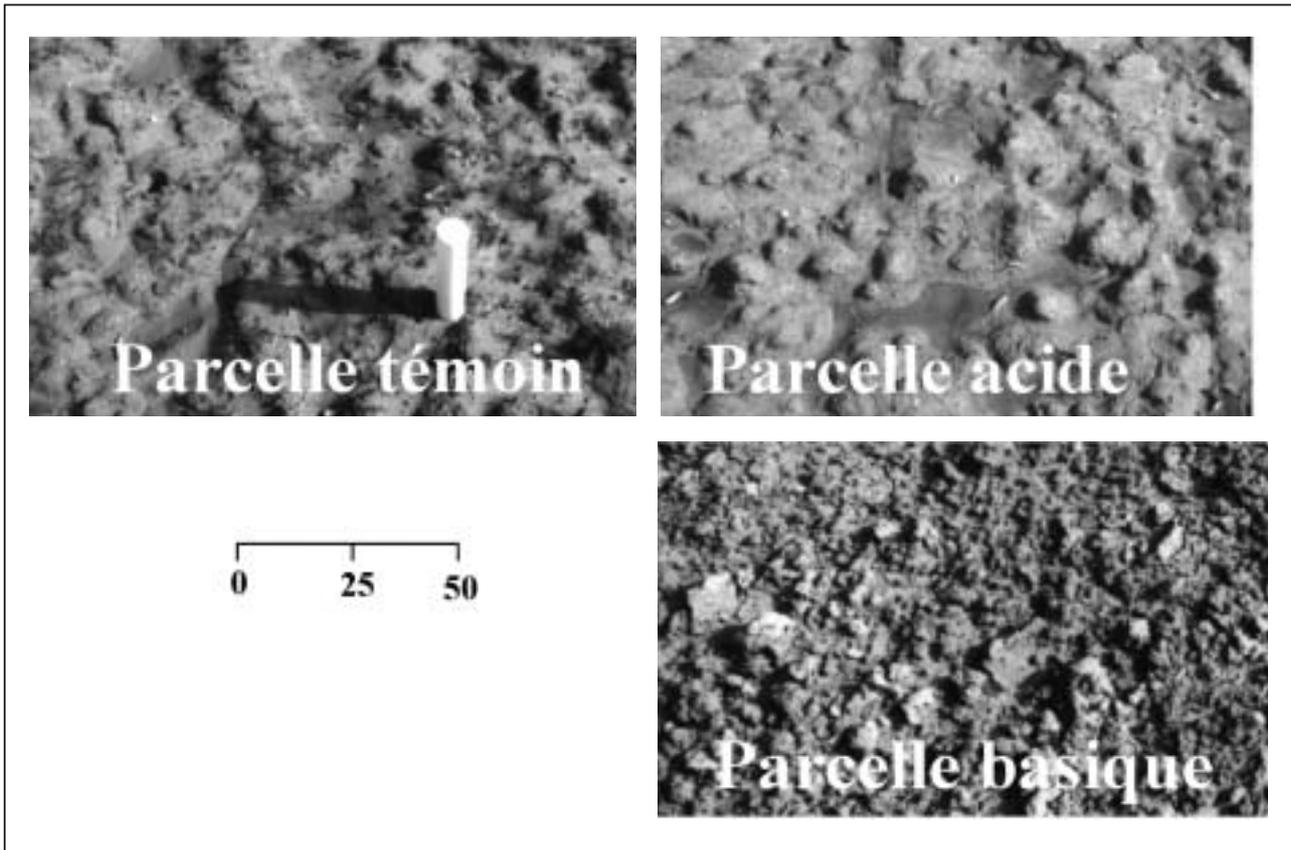
En 70 ans la composition texturale est restée sensiblement la même. La granulométrie des parcelles réalisée en condition standard de dispersion (Afnor, 1996) indique que 75 % des particules sont de taille inférieure à 50 µm (argiles + limons). En 1929, le pH des parcelles était de 6,3 pour une capacité d'échange en cations (CEC au pH du sol, CEC<sub>sol</sub>) de 15,3 cmol<sup>+</sup>/kg. La garniture cationique était constituée essentiellement par du calcium et saturait à 96 % les sites

d'échange. La teneur en matière organique était alors d'environ 2,8 %.

La CEC mesurée à pH standard (pH = 7, protocole Metson, CEC<sub>7</sub>) permet de suivre l'évolution de la valeur de la capacité d'échange sans faire référence à des variations de l'état physico-chimique du sol. Dans les parcelles étudiées, en 1999, la variation de CEC<sub>7</sub> est faible au sein de l'horizon de surface (0-25 cm). La faible dispersion de la mesure de la CEC<sub>7</sub> (10,6 ± 1,6 cmol<sup>+</sup>/kg) est expliquée par la faible variation du taux d'argile (14 à 18 % pour les extrêmes), mais elle est surtout une conséquence d'une teneur en matière organique peu variable (~ 1 %) en l'absence de plantes et de restitution organique.

En 1999 l'environnement physico-chimique varie considérablement d'une parcelle à l'autre. Dans la parcelle « témoin », le pH a baissé de 0,7 unité et la CEC<sub>sol</sub> (8,7 cmol<sup>+</sup>/kg) a diminué de moitié par rapport au témoin de 1929. Les parcelles recevant des engrais ammoniacaux sont très acides, jusqu'à pH = 3,6 pour celle avec du phosphate d'ammonium. Dans ce cas, la CEC mesurée au pH du sol (6,9 cmol<sup>+</sup>/kg) est inférieure à celle de la parcelle témoin. Dans les parcelles recevant des amendements basiques le pH s'est stabilisé à 8,0/8,2 pour une CEC<sub>sol</sub> de 13,6 cmol<sup>+</sup>/kg, valeur double de celle observée dans les parcelles les plus acides.

La nature et la teneur en cations échangeables ont aussi varié en fonction des parcelles. Dans les parcelles recevant des engrais ammoniacaux en 1999, le calcium échangeable représente moins de 5 % alors qu'il sature à plus de 90 % la CEC dans les parcelles basiques. Les parcelles les plus acides sont en fait saturées à plus de 80 % par de l'aluminium échangeable. Pour les autres cations (Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), leur teneur a diminué environ de moitié (parcelles basiques), voire des deux tiers (parcelles acides) par rapport à leur teneur initiale en 1929.

**Figure 1** - Etat de surface des parcelles en mars 2000 avant bêchage.**Figure 1** - View of some plots before digging, 2000, march.

### Etat de surface

La *figure 1* nous présente quelques parcelles en mars 2000 après six mois de précipitations hivernales. Les états de surface observés varient considérablement d'une parcelle à l'autre au fur et à mesure des précipitations. L'aspect des parcelles recevant des engrais ammoniacaux et celui de la parcelle témoin sont relativement semblables. La structure du sol en surface s'est dégradée et les mottes, apparentes lors du bêchage, se sont fortement émoussées pour former une surface dégradée et irrégulière. En dessiccation cette surface présente alors des fentes de retrait et une croûte de battance. Dans les parcelles amendées de pH basiques l'état de la surface est rigoureusement opposé. La structure grumeleuse obtenue par le bêchage est largement conservée. Les mottes restent apparentes et gardent leur cohésion. L'aspect de la surface reste alors le même quelle que soit l'humidité des parcelles.

### Rétention en eau, porosité

Les mesures de rétention de l'eau et de volume apparent, effectuées sur des mottes centimétriques à des potentiels de l'eau de  $-10$  kPa,  $-1,6$  et  $-103$  MPa, soit respectivement des états proches

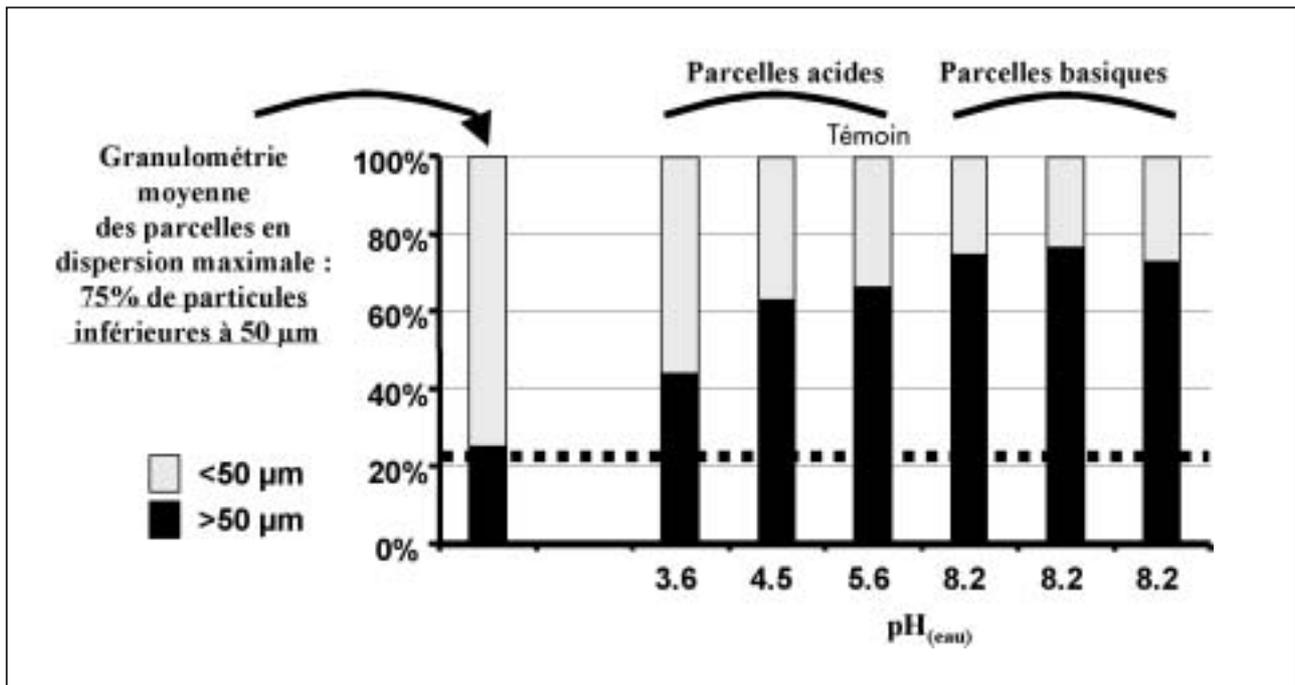
de la capacité au champ, du point de flétrissement et du séchage à l'air, sont présentées dans le *tableau 2*. La quantité d'eau retenue par des mottes de taille centimétrique ne semble pas varier significativement entre les parcelles acides et les parcelles basiques. De même la mesure du volume apparent, expression de la porosité, ne diffère pas entre les parcelles. On peut donc dire que la caractérisation de la porosité et de la rétention de l'eau du sol à l'échelle de la motte ne permet pas de rendre compte de l'évolution des propriétés physiques des sols.

### Stabilité d'agrégats dans l'eau

Lorsque des agrégats sont immergés dans l'eau pendant 30 minutes sans chocs mécaniques, il en résulte une désagrégation importante. Mais il reste cependant des agrégats non dispersés. En effet en situation de forte dispersion, obtenue à l'hexamétophosphate de sodium, seuls 25 % des particules restent de taille supérieure à  $50 \mu\text{m}$ . Lors des tests de désagrégation dans l'eau, 45 à 75 % des agrégats sont de taille supérieure à  $50 \mu\text{m}$  (*figure 2*). Ainsi dans le cas des parcelles de pH basiques, on obtient 75 % de particules de taille supérieure à  $50 \mu\text{m}$ , ce qui révèle ainsi la présence d'agrégats stables dans le sol. En revanche, dans les parcelles de pH

**Tableau 2** - Rétention de l'eau et volume apparent (en g/cm<sup>3</sup>) à différents potentiels de l'eau.**Table 2** - Water retention and apparent volume (g/cm<sup>3</sup>) at different water potential.

| Pression              | - 10 kPa      |             | - 1,6 MPa     |             | - 103 MPa     |             |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|                       | Teneur en eau | V/M         | Teneur en eau | V/M         | Teneur en eau | V/M         |
| acides (6, 11, 14)    | 0,214 ± 0,018 | 0,70 ± 0,01 | 0,066 ± 0,006 | 0,68 ± 0,01 | 0,019 ± 0,004 | 0,67 ± 0,01 |
| basiques (26, 35, 39) | 0,199 ± 0,007 | 0,66 ± 0,02 | 0,069 ± 0,005 | 0,67 ± 0,01 | 0,021 ± 0,001 | 0,65 ± 0,03 |
| toutes parcelles      | 0,206 ± 0,012 | 0,68 ± 0,02 | 0,068 ± 0,005 | 0,67 ± 0,01 | 0,020 ± 0,003 | 0,66 ± 0,03 |

**Figure 2** - Mesure de la granulométrie après une immersion d'agrégats (2-5 mm) dans l'eau.**Figure 2** - Particule size distribution of aggregates (2-5 mm) after water immersion.

acides, la fraction > 50 µm varie entre 25 % et 65 %. Ceci indique que le sol est d'autant plus instable et que son pH est plus bas.

### Circulation de l'eau

Les cinétiques de réhumectation de terre fine peuvent être interprétées en considérant deux paramètres: (i) la vitesse de réhumectation, c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'eau humecte la colonne de terre, et (ii) la quantité d'eau maximale retenue par la colonne (figure 3). Dans les conditions de l'essai, les parcelles de pH acides ont une vitesse de réhumectation de  $2,2 \pm 0,1$  % d'eau par minute et absorbent au maximum  $26,6 \pm 1,7$  % d'eau. Pour les parcelles de pH basiques la réhumectation est plus rapide,  $3,5 \pm 0,05$  % d'eau par minute, et la teneur en eau à saturation de la colonne de terre est plus importante:  $32,9 \pm 0,4$ . L'écart sur les mesures traduit l'hétérogénéité des parcelles vis-à-vis de leur contexte physico-chimique, notamment du pH: dans les parcelles acides le pH va de 3,6

à 5,6 alors qu'il est de 8,2 dans toutes les parcelles basiques.

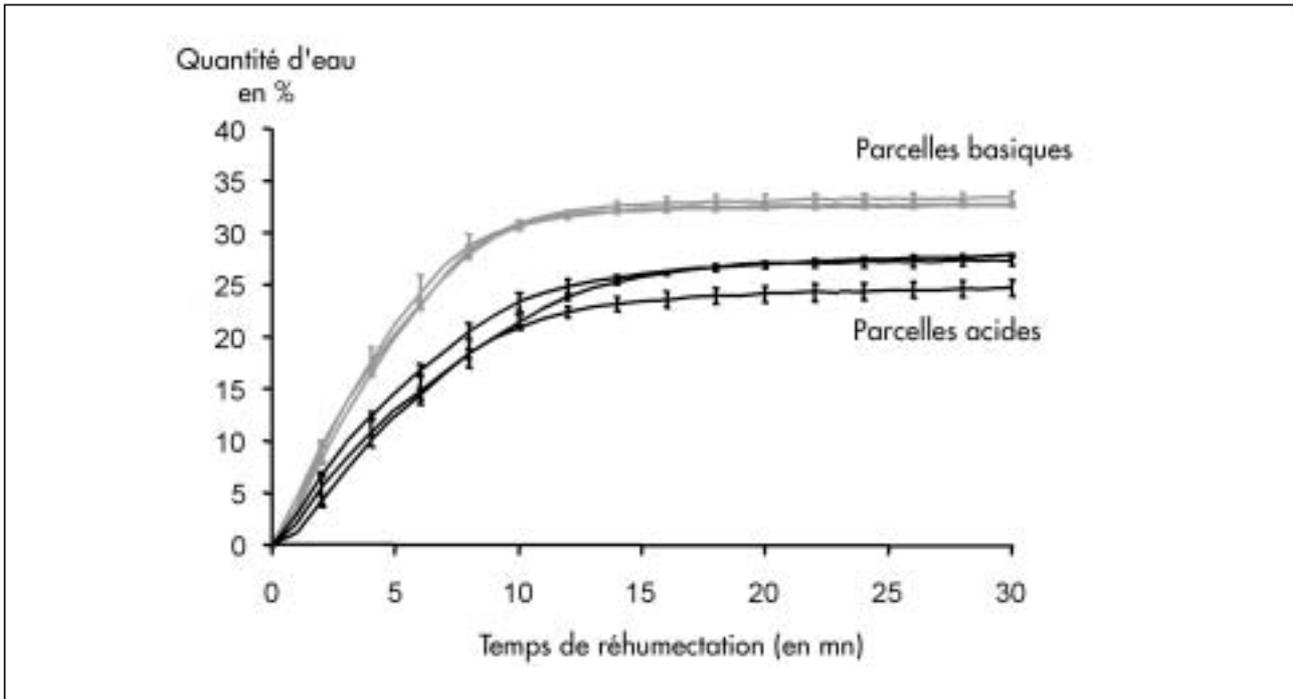
### DISCUSSION

#### Influence des engrais et des amendements sur les propriétés physico-chimiques des sols

##### Variation et origine de la CEC

Dans le dispositif des 42 parcelles, le contexte géochimique a considérablement évolué en fonction des traitements qui y sont appliqués.

Les parcelles témoins se sont légèrement acidifiées. Ce phénomène s'explique par l'évolution du sol sous l'action conjuguée de

**Figure 3** - Cinétique de réhumectation de terre séchée à l'air, tamisée à 1 mm.**Figure 3** - Moistening kinetic of air-dried soil passed through an 1 mm sieve.

l'activité biologique et des conditions climatiques, facteurs principaux intervenant dans ces parcelles non cultivées et ne recevant aucun traitement. Le pH acide des précipitations est certainement suffisant, dans des sols limoneux décarbonatés, à faible pouvoir tampon pour engendrer un abaissement du pH.

Ce phénomène s'est considérablement amplifié par l'apport d'engrais ammoniacaux. Ceci peut être relié à l'apport intensif d'ions ammonium qui, en se minéralisant, libèrent des protons source d'acidité du sol. Dans ces parcelles, de l'aluminium échangeable lié à la dissolution partielle des minéraux argileux en conditions acides, vient occuper une majorité des sites de surface des constituants, jusqu'à saturation de la  $CEC_{sol}$  dans les parcelles les plus acides.

Pour les parcelles recevant des amendements basiques, le pH a augmenté jusqu'à être tamponné à 8,0 - 8,2. L'apport d'une base ( $OH^-$ ,  $O_2^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ ) a permis cette remontée par leur association avec les protons arrachés au complexe adsorbant ou issus de la solution du sol. La forte teneur en calcium et son affinité importante pour le sol concourent à saturer le sol avec ce cation.

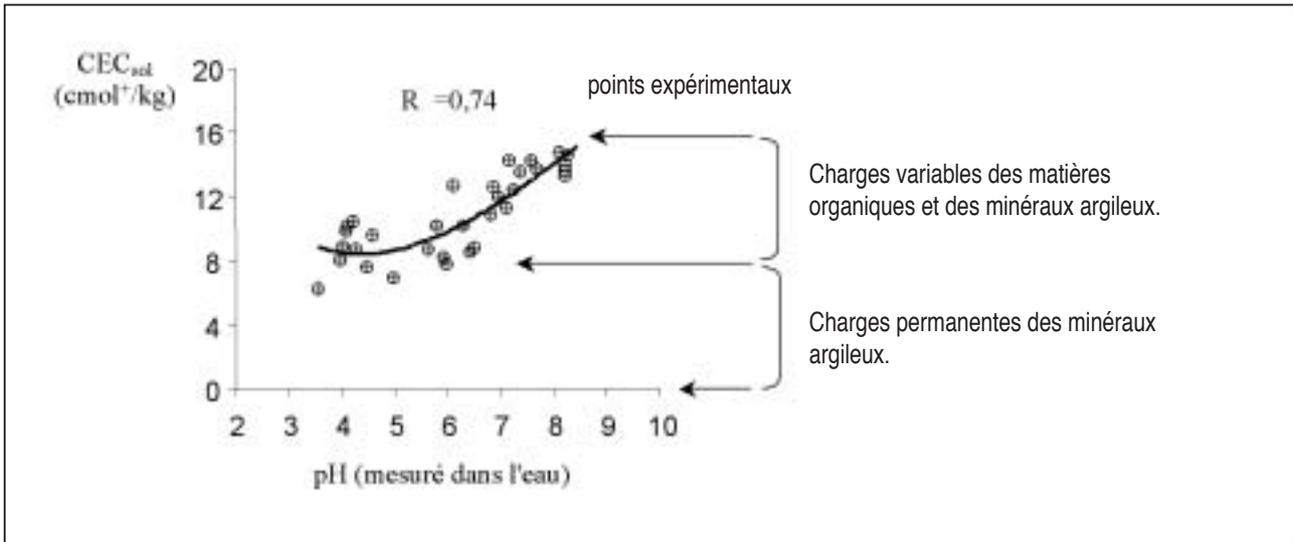
### Signification de la CEC

D'après Julien et Turpin (1999) la valeur de la capacité d'échange en cations selon la méthode Metson, étant mesurée à un pH de référence (pH = 7,0) donne une information sur la constitution du sol et notamment la contribution des argiles et des matières organiques. Il faut noter que d'après Bigorre *et al.* (2000) la capacité

d'échange liée à la matière organique est 7 fois plus importante à teneur égale que pour les minéraux argileux. La variation observée entre 1929 et 1999 montre que la perte de  $CEC_7$  en 70 ans est principalement due à la diminution marquée du taux de matières organiques. Les différences observées en 1999 entre les parcelles apparaissent principalement dues aux variations du taux d'argile avec la profondeur.

Au contraire de la capacité d'échange en cation à pH = 7,0, la CEC mesurée au pH du sol permet la prise en compte des changements de l'état physico-chimique du sol. La *figure 4* montre la répartition des mesures de  $CEC_{sol}$  dans une partie du dispositif en fonction du pH. Avec un coefficient de corrélation de 0,74 nous avons pu distinguer que la  $CEC_{sol}$  s'exprime suivant une fonction de type polynomiale du 3<sup>e</sup> degré en fonction du pH. Pour un pH inférieur à 5,5, la  $CEC_{sol}$  est d'environ 8  $cmol^+/kg$  et varie peu. Inversement, au-dessus de pH = 5,5, la  $CEC_{sol}$  augmente fortement, jusqu'à doubler, avec la hausse du pH.

La valeur minimale de 8  $cmol^+/kg$  correspond à la charge permanente intrinsèque des minéraux (Charlet et Schlegel, 1999). Cette charge ne dépend pas de l'état physico-chimique du sol. Elle est liée aux substitutions de cations à l'intérieur du réseau cristallin des argiles. Le déficit de charge engendré aboutit à une charge négative permanente, indépendante du pH. Suite à des réactions de protonation-déprotonation de sites, il existe une autre origine de la charge électrique superficielle, variable en fonction du pH. Il s'agit

**Figure 4** - Signification de la capacité d'échange en fonction du pH.**Figure 4** - Representation of pH variation and electric surface charges of soil mineral and organic components.

des sites de bordure des minéraux argileux, de ceux à la surface d'oxydes ou d'hydroxydes, mais surtout des sites à la surface des constituants organiques. Selon les pKa de dissociation des liaisons acido-basiques de ces sites réactionnels et suite à une augmentation de pH, la capacité d'échange devient plus importante et peut même doubler pour une relativement faible variation du pH (une unité et demie). A ce niveau, il faut souligner l'importance de la charge portée par la matière organique qui, à teneur identique, possède une capacité d'échange beaucoup plus importante que les constituants argileux. Dans le cas des parcelles basiques, même avec une teneur en matières organiques faible, la capacité d'échange en cations reste élevée. Ceci peut être mis en relation avec l'apport de bases qui contribue à déprotoner les hydroxyles présents à la surface des argiles et des matières organiques. On réalise ici l'intérêt de mesurer la CEC au pH du sol car cela permet de caractériser le sol dans un état proche de celui *in situ* et donc de révéler les changements des propriétés des sols du fait de pratiques de fertilisation et d'amendements.

### Nature des cations échangeables

En conséquence de modifications de l'environnement physico-chimique, les teneurs en cations échangeables évoluent considérablement. Avec des apports d'amendements basiques, le calcium est resté majoritaire et sature à plus de 90 % les sites d'échange. Dans les parcelles fertilisées par des engrais ammoniacaux, les sites d'échange sont au contraire saturés par de l'aluminium échangeable issu de la dissolution partielle des minéraux argileux. Quant aux autres cations ( $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  et  $Na^+$ ), leur teneur globale a baissé non seulement en valeur relative mais aussi en valeur absolue. Cette diminution est due à l'affinité particulière des charges électriques de surface des constituants des sols pour les cations calcium (en apport

basique) ou aluminium (en milieu acide).

Les apports d'amendements et de fertilisants ont non seulement affecté la capacité d'échange en cation du sol et modifié la garniture cationique en surface des constituants mais ils ont aussi influencé la mobilité des éléments dans le sol.

### Conséquences pour les propriétés physiques

Nous avons vu que l'apport d'engrais ou d'amendement était suffisant pour influencer l'environnement physico-chimique. Ces différents environnements se caractérisent notamment par une quantité de sites négatifs réactionnels pouvant doubler selon le pH. Nous allons maintenant nous intéresser à la répercussion que ce phénomène peut avoir au niveau des propriétés des sols vis-à-vis de l'eau. En effet l'eau est une molécule dont l'affinité pour les constituants est variable en fonction de l'état des surfaces (Chenu *et al*, 2000). De cette affinité, qui traduit le caractère plus ou moins hydrophobe ou au contraire hydrophile des constituants, dépendent des propriétés telles que la rétention de l'eau, sa circulation dans le sol ou la capacité du sol à se désagréger lors de son humectation.

Selon leur pH, nous avons observé que les parcelles ne présentaient pas les mêmes comportements vis-à-vis de l'eau. La stabilité physique du sol, aussi bien observée au champ que celle mesurée en laboratoire, est plus faible dans les parcelles acides que dans les parcelles basiques. Ceci va de pair avec une capacité d'absorption d'eau obtenue sur la terre fine tamisée plus importante pour les parcelles basiques que pour celles acides.

Ces résultats nous montrent que les propriétés du sol pour l'eau sont dépendantes de l'environnement physico-chimique du sol, et notamment de l'état des surfaces réactives du sol. L'influence du pH

sur les charges de surface des constituants confère au sol une plus ou moins grande affinité pour l'eau. Lorsque le pH est bas, et la densité de charge électrique de surface faible, les constituants tendent à devenir plus hydrophobes. Au contraire, ils deviennent plus hydrophiles avec la hausse du pH. La rétention de l'eau en est augmentée mais cette affinité pour l'eau ne se fait pas au détriment d'une perte de cohésion du matériau. Au contraire il reste plus stable au lieu de se désagréger lors de manipulations tant expérimentales (immersion dans l'eau) que "naturelles" (précipitations). La présence des cations calcium agrégeant, conjuguée avec la présence de nombreux sites d'échange apparaît à l'origine de cette forte stabilité des sols.

## Conclusion - Perspectives

Avec des apports d'engrais ou d'amendement l'environnement physico-chimique et les propriétés physiques d'un sol peuvent profondément changer. Les charges de surface des constituants organiques et minéraux et la nature des cations échangeables affectent les propriétés physiques des sols notamment celles liées à son affinité pour l'eau. Ainsi la cohésion des agrégats, la circulation de l'eau ou sa rétention sont autant de propriétés modifiées lors de la variation de pH d'un sol.

La capacité d'échange en cations mesurée au pH du sol apparaît un facteur important de la qualité des sols. Elle est en effet directement liée aux sites négatifs réactionnels des constituants et nous renseigne donc sur les propriétés des sols qui en sont dépendantes. Il ne s'agit pas de modifications uniquement de la garniture cationique, avec ses répercussions sur la biodisponibilité des éléments, mais aussi de répercussions sur les propriétés physiques.

Le dispositif des 42 parcelles est une expérimentation en jachère nue dont les résultats ne sont pas entièrement transposables aux situations réelles des parcelles cultivées. Ces résultats doivent être confrontés à des essais sur parcelles cultivées. Ils constituent cependant un cadre d'interprétation de l'évolution des sols en fonction uniquement des pratiques de fertilisation ou d'amendement.

Pour les 42 parcelles, la teneur en matière organique est suffisamment homogène au sein des parcelles étudiées pour montrer le rôle discriminant d'autres facteurs dans les propriétés des sols. Dans des situations agronomiques, le rôle particulier des constituants organiques vis-à-vis de l'eau devrait être examiné en détail. Sans négliger l'importance du suivi des valeurs du pH dans l'évolution des propriétés des sols, la valeur de la CEC et le dosage des cations échangeables mesurés au pH du sol, apparaissent des indicateurs précieux de l'évolution actuelle des propriétés des sols.

## BIBLIOGRAPHIE

- Afnor, 1996 - Qualité des sols. Recueil de normes françaises. Afnor, Paris France. 533 p.
- Bigorre F., Tessier D., Pedro G., 2000 - Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. C.R. Acad. Sci. Paris. 330, 1-6.

- Charlet L., Schlegel M. L., 1999 - La capacité d'échange des sols. Structures et charges à l'interface eau/particule. C.R. Acad. Agri. de France. 85, 2, 7 - 24.
- Chenu C., Le Bissonnais Y., Arrouays D., 2000 - Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. Soil Sci. Soc. Am. J., 64, 1479-1486.
- Ciesielski H., Stecherman T., 1997 - Determination of exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions. Agronomie, 17, 1-7.
- Coulomb I., Manichon H., Roger-Estrade J., 1990 - Evolution de l'état structural sous l'effet des systèmes de culture. In: Boiffin J. & Marin-Lafliche A. (Eds) « La structure des sols et son évolution ». INRA, Paris, 137 - 155.
- Duchaufour P., 1997 - Abrégé de pédologie : sol, végétation, environnement. 5e édition. Masson [Ed], 291 p.
- Grignon, 1976 - Colloque international - Essais de fertilisation de très longue durée. 6-7-8 juillet 1976. Ann. Agro. 27, 5/6.
- Jamagne M., 1973 - Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France. Thèse Doct. Univ. Gemboux, 445 p.
- Jamagne M., Begon J.C., 1984 - Les sols lessivés de la zone tempérées. Dans AFES, Livre jubilaire du cinquantenaire, 55-76.
- Julien J.L., Turpin A. 1999 - Surfaces réactives et raisonnement de quelques propriétés chimiques de sols acides. C.R. Acad. Agri. de France. 85, 2, 22 - 35.
- Le Bissonnais Y., Le Souder C., 1995 - Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etude et Gestion des Sols, 2, 1, 43-56.
- Pernes-Debuyser A., Tessier D., 2001 - Influence du pH sur les propriétés des sols : l'essai de longue durée des 42 parcelles à Versailles. Colloque franco-québécois - La pluridisciplinarité dans les problèmes de l'environnement : les interactions Air Sol Eau. Québec, mars 2001. 2, p. 141-155.
- Richards L. A., 1948 - Porous plate apparatus for measuring moisture and transmission by soil. Soil Sci. 66, 105-110
- Roger-Estrade J., 1991 - Effet du travail du sol sur la localisation et l'accessibilité des éléments minéraux ; conséquences sur l'élaboration du rendement du maïs (*Zea mays* L.). Science du Sol, 29, 159-173.
- Tessier D., Berrier J., 1979 - Utilisation de la microscopie à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols soumis à différents pF. Bulletin de l'A.F.E.S., 1, 67-82.

