

Fonctionnement hydrodynamique et différenciation pédologique d'une couverture de sol limoneux hydromorphe en Bassin Parisien

J. Nicole^(1, 2), Y. Coquet⁽¹⁾, P. Vachier⁽¹⁾, J. Michelin⁽¹⁾, L. Dever⁽²⁾

(1) UMR Environnement et Grandes Cultures, INRA/INAPG, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon

(2) Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique, Bâtiment 504 - Université Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex

RÉSUMÉ

La stratification des matériaux géologiques du plateau des Alluets-Le-Roi (Yvelines) est classique d'un bon nombre de plateaux de la région parisienne : un placage de limons d'une épaisseur de deux mètres repose sur une formation d'argile à meulière de Montmorency qui couronne les sables et grès de Fontainebleau. La formation d'argile à meulière constitue un imperméable discontinu sur lequel peut se former une nappe perchée temporaire. L'objectif de cette étude est de caractériser le fonctionnement hydrodynamique d'une parcelle du plateau et sa relation avec l'évolution pédogénétique du limon carbonaté originel.

La localisation dans l'espace et le suivi de la nappe temporaire nous ont permis de comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système sol/sous-sol. Une partie importante des précipitations ruisselle et se concentre pour s'infiltrer préférentiellement dans les dépressions topographiques. Au droit de celles-ci se forment les dômes piézométriques de la nappe. Celle-ci s'écoule latéralement vers des exutoires constitués par des chenaux ou fenêtres drainantes au sein de l'argile à meulière, pour aller recharger la nappe sous-jacente des sables de Fontainebleau. L'extension locale de la nappe temporaire est faible : on compte 40 m de distance entre la zone de recharge et l'exutoire. En relation avec les zones d'écoulement préférentiel de l'eau au sein de la couverture pédologique, une différenciation latérale des sols est mise en évidence. Nous observons au niveau des dômes topographiques, la présence d'un LUVISOL dans lequel l'engorgement temporaire laisse des traces d'oxydo-réduction sous forme de taches et de concrétions ferro-manganiques. Par contre, au niveau des dépressions topographiques, correspondant aux zones d'infiltration préférentielle de l'eau, l'évolution pédogénétique est telle que l'on rencontre un LUVISOL-RÉDOXISOL DÉGRADÉ plus ou moins glossique. L'étude géophysique de la parcelle par la méthode électrique (Wenner standard) a permis d'obtenir une image quasi-continue de la répartition de la résistivité dans le sol. On constate une bonne analogie entre la résistivité apparente et l'organisation de la couverture pédologique. Ainsi, il est possible de suivre la limite marquée par le contraste de résistivité existant entre l'horizon E éluviié et l'horizon BT illuvié, cette limite étant plus profonde dans les LUVSOLS-RÉDOXISOLS DÉGRADÉS glossiques.

Mots clés

Sol lessivé, pédogenèse, hydrologie, géophysique, nappe temporaire

SUMMARY**HYDRODYNAMIC BEHAVIOUR AND PEDOLOGICAL DIFFERENTIATION OF A HYDROMORPHIC LOAMY SOIL COVER NEAR PARIS**

The geological stratification of the plateau of Alluets-le-Roi is typical of the Parisian Basin. A 2-m layer of loam covers a buhrstone clay bed called "Argile à Meulières" that crowns the sands and sandstones of the "Sables de Fontainebleau" formation. The clay bed constitutes a discontinuous aquitard on which a temporary perched water table may be formed. The purpose of the study was to characterise the hydrodynamic behaviour of this vadose zone and its linkage to the pedogenetic evolution of the original carbonated loam.

The dynamics of the temporary perched water table was monitored by 16 piezometers spread on a 80-m long, 10-m large, 2-m deep soil volume of a cropped field (planche 1). Piezometric domes appear straight under local topographic depressions (about 40 cm variation in altitude) identified by a detailed DEM of the area. Field observations showed runoff concentration and preferential infiltration in these depressions (figure 1). The temporary perched water table flows out laterally to draining windows or channels located within the clay bed (figure 2), and recharges the underlying sand aquifer. The lateral extension between the refill and discharge zones is around 40 m.

At the localisation of the topographic domes, LUVISOLS can be observed (figure 4) in which temporary saturation leaves redox reddish-brown mottles and iron-manganic concretions. Under the topographic depressions, pedogenetic evolution is more intense with glossic, drained, albic LUVISOLS - REDOXISOLS DEGRADES. On a 40 m transect, the lateral differentiation of the soil cover could be related to preferential infiltration zones.

A quasi-continuous 2D-distribution of the ground resistivity was obtained by a geoelectrical exploration (standard Wenner) along the transect. The resistivity map related well with the pedological differentiations observed within the transect (figure 7). The limit between the eluviated «E» horizon and the illuviated «BT» horizon which is deeper in the LUVISOLS - REDOXISOLS DEGRADE could be matched with a strong resistivity contrast (planche 2).

Key-words

LUVISOL, pedogenesis, hydrology, geophysics, temporary water table

RESUMEN**FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO Y DIFERENCIACIÓN EDAFOLÓGICA DE UNA COBERTURA DE SUELO LIMOSO HIDROMÓRFO DE LA CUENCA DE PARÍS (FRANCIA)**

La estratificación de los materiales geológicos de la meseta de Alluets-le-Roi es típica de las mesetas de la cuenca de París: una capa de limo de dos metros de espesor constituida por un estrato de arcilla con pedernal coronando las arenas y areniscas de la formación llamada «Sables de Fontainebleau». El estrato de arcilla forma una barrera impermeable discontinua sobre la cual pueden aparecer de manera temporal unas capas de agua suspendidas. El objetivo de este estudio es caracterizar el funcionamiento hidrodinámico de una parcela de la meseta y su relación con la evolución edafogenética del limo carbonatado original.

El seguimiento con dieciséis piezómetros (planche 1) de la capa suspendida temporal ha permitido comprender el funcionamiento hidrodinámico del sistema suelo/subsuelo. Así se muestra que una gran parte de las lluvias escorrentían y se reúnen para infiltrarse preferentemente en las depresiones topográficas (figure 1). Unos domos piezométricos de la capa aparecen bajo las dichas depresiones. La capa se desplaza lateralmente hacia exutorios constituidos de canales o huecos dentro de la arcilla con pedernal (figure 2) para ir a recargar la capa subyacente en la «Sables de Fontainebleau». La extensión local de la capa temporal resulta corta: cuarenta metros de distancia entre la zona de recarga y el exutorio.

A nivel de los domos topográficos se encuentra un LUVISOL (figure 4) en el que la hidromorfía temporal provoca alternancias de potenciales de oxido-reducción con la aparición de manchas y concreciones ferromangánicas. En cambio, a nivel de las depresiones topográficas, la evolución edafogenética es más importante: se encuentra un LUVISOL - REDOXISOL DEGRADE más o menos glósico. Así pues en cuarenta metros de largo se nota una diferenciación lateral de los suelos en relación con las zonas de flujo preferencial del agua dentro de la cobertura edafológica.

El estudio geofísico de la parcela con el método eléctrico (Wenner estándar) ha permitido obtener una imagen casi continua de la distribución de la resistividad en el suelo. Se observa una buena correlación entre la resistividad aparente y la organización de la cobertura edafológica (figure 7). Gracias a ello, es posible seguir el límite marcado por el contraste de resistividad que existe entre el horizonte «E» y el horizonte «BT», este límite siendo más profundo en los LUVISOLS - REDOXISOLS DEGRADES (planche 7).

Palabras clave

LUVISOL, edafogénesis, hidrología, geofísica, capa temporal.

La préservation des ressources en eau, comme la protection de l'environnement, est devenue une priorité. La compréhension des mécanismes de contamination des eaux souterraines nécessite la description et la prévision des transferts de masse (eau, solutés) au sein de la couverture pédologique. Le problème de la pollution des nappes est à l'origine de nombreux travaux : influence des pratiques culturales sur la pollution des eaux souterraines (Levesque, 1982 ; Decau et Pujol, 1992), analyse des transferts hydriques dans le sol (Musy et Souter, 1991), sensibilité du milieu à l'infiltration (Cam *et al.*, 1996). Pour pouvoir être utilisés à des fins prédictives, des modèles numériques comme Agriflux (Dupuis *et al.*, 1997), STICS (Brisson *et al.*, 1998), HYDRUS-2D (Simunek *et al.*, 1999) visent à décrire les transferts d'eau dans le sol.

Sur le site d'étude choisi, il est important de comprendre au préalable le fonctionnement hydrodynamique du sol qui guidera le choix du modèle approprié, puis de tester et de valider le modèle à partir de données de terrain. C'est pour partie dans ce cadre que s'inscrit le travail présenté ici.

La nappe des Sables de Fontainebleau (Oligocène) est recouverte par les formations de Beauce (plateaux formés par les calcaires de Beauce et/ou l'argile à meulière de Montmorency). Dans les départements des Yvelines et de l'Essonne, elle est largement exploitée pour l'alimentation en eau potable, car productive et faiblement minéralisée, mais elle reste néanmoins vulnérable (Mercier, 1981). En effet, l'essentiel de la recharge par les précipitations est effectué via les plateaux, majoritairement cultivés, avec une infiltration moyenne annuelle estimée à 80 mm.an⁻¹ (André et Roussel, 1978). L'assise géologique « argile à meulière », classiquement comprise dans la dénomination « Calcaires Oligo-miocène » est considérée comme un niveau globalement semi-perméable pour une approche à petite échelle de la recharge de la nappe Oligocène (Bariteau, 1996).

D'une épaisseur de 3 à 7,5 m (Goguel *et al.*, 1967), la formation d'argile à meulière de Montmorency est vraisemblablement le résultat de l'altération et de la silicification entière ou très importante de calcaires de Beauce (Ménillet, 1974). Elle est recouverte d'une fine épaisseur de dépôt détritique fluviatile : les « sables de Lozère », mélange de sables quartzeux grossiers et d'argiles. Un placage quaternaire d'origine éolienne (lœss) recouvre ces formations tertiaires. D'une épaisseur de l'ordre de 1 à 2 m sur les plateaux, cette formation limono-argileuse carbonatée contient une faible proportion de sables soufflés. Une intense cryoturbation d'âge quaternaire a intimement mêlé les dépôts fluviatiles et les limons à la partie supérieure de la formation à meulière. On identifie nettement un faciès gélif avec la formation de nombreux petits amas limoneux et la remontée de cailloux de meulière au sein du lœss cryoturbé (Crahet, 1981).

Dans le cas des sols développés sur lœss, le processus pédogénétique essentiel est le lessivage des argiles et du fer associé, et leur accumulation dans un horizon BT, qui conditionne le fonction-

nement hydrique du solum (Jamagne, 1969 ; Jamagne et Bégon, 1984 ; Baize, 1995). Le niveau d'accumulation d'argile freinant le passage de l'eau, il en résulte un engorgement temporaire au sein et au-dessus de l'horizon BT qui subit alors une dégradation progressive. En outre, sur plateau d'argile à meulière, la remontée d'une nappe temporaire, retenue sur le substratum géologique argileux, entraîne une hydromorphie de profondeur. Crahet (1981) décrit sur ce type de plateau une pédogenèse essentiellement uni-modale avec des sols correspondant aux différents stades de lessivage (LUVISOLS TYPIQUES, LUVISOLS DÉGRADÉS, LUVISOLS DÉGRADÉS GLOSSIQUES) et plus ou moins nettement hydromorphes selon l'importance de la nappe perchée sur l'argile à meulière.

Les plateaux d'argile à meulière sont majoritairement exploités pour l'agriculture et la battance de la surface de ces sols limoneux lessivés peut modifier la distribution des précipitations par ruissellement (Boiffin, 1984 ; Boiffin *et al.*, 1986 ; Le Bissonnais et Le Souder, 1995). En effet, les différents auteurs montrent que la formation de la croûte de battance réduit significativement l'infiltrabilité à la surface de ces sols (< 6 mm.h⁻¹ sous croûte structurale et < 1 à 2 mm.h⁻¹ sous croûte sédimentaire). L'intensité des pluies dépasse alors fréquemment l'infiltration, et l'excès d'eau se manifeste par flaquage puis débordement et ruissellement. Les quantités d'eau infiltrées sont alors très différentes sur les points hauts et les points bas d'une parcelle.

L'objectif de cet article est de comprendre et de caractériser l'infiltration des précipitations à grande échelle au sein d'une parcelle cultivée sur un plateau d'argile à meulière recouvert de sols limoneux épais. Dans un premier temps, nous nous attacherons à l'étude du fonctionnement hydrologique de la parcelle. L'observation pédologique des sols nous amènera ensuite à mettre en relation son fonctionnement hydrologique et son organisation pédologique.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

La parcelle

La parcelle est située à la limite des communes de Feucherolles et d'Orgeval dans le département des Yvelines (coordonnées Lambert II : X = 573 ; Y = 2433). Elle se trouve sur le plateau des Alluets-le-Roi dont l'assise géologique, tertiaire, est constituée par l'argile à meulière de Montmorency. La couverture loessique a une épaisseur d'environ 2 m. Située le long de la bordure sud ouest d'un champ cultivé (rotation blé d'hiver - maïs), elle est à environ 177 m d'altitude d'après la carte topographique de la région. Un pluviomètre y est installé, assurant un suivi décennaire des précipitations. Pour avoir une estimation de la pluviométrie journalière, nous avons aussi utilisé les relevés de la station météorologique de l'INRA-Grignon située à 6 km de la parcelle. Ne disposant pas d'un point coté, la topographie de la parcelle (*planche 1a*) a été levée en altitude relative à partir d'un point de référence à l'aide d'un théodolite et d'une mire (altitudes relatives à 2 cm près). Les cotes (x, y) des

points relevés ont été calées sur le terrain par un piquetage mené au décimètre à ruban. Le pas de mesure (maillage carré) est de 10 m.

Suivi hydrologique

Une batterie de 16 piézomètres « profonds » (*planche 1b*) a permis le suivi de la nappe qui peut se former au sein de la couverture limoneuse sur le substratum argileux imperméable. La profondeur d'implantation (~ 2 m) a été déterminée lors du forage par la rencontre de l'argile bariolée franche, permettant par là même de tracer la topographie du substratum. La hauteur de crêpine monte jusqu'à environ 60 cm au-dessus des argiles. Chaque piézomètre est équipé d'une collerette en caoutchouc à la profondeur de 60 cm pour éviter tout mélange, par écoulement préférentiel le long du tube, avec une nappe perchée potentiellement retenue au-dessus de l'horizon BT. Le long de la bordure sud ouest, 9 piézomètres permanents permettent, au pas de 10 m, l'exploration d'un transect de 80 m. Les 7 piézomètres implantés en plein champ sont enterrés sous la zone arable pour ne pas gêner les pratiques culturales. Ils ne sont rendus accessibles (déterrés) que temporairement et ne permettent donc qu'un suivi discontinu. Dans le but de vérifier la formation d'une éventuelle nappe perchée sur l'horizon BT, 4 piézomètres « de surface » ont été implantés le long de la bordure du champ aux cotes ($x = -10, 0, 10, 20$ m) (*planche 1b*). Profonds de 55 cm, ils sont crépinés sur 20 cm et isolés du fond de labour par une collerette de caoutchouc.

Caractérisation pédologique

Quatre fosses pédologiques situées en plein champ à 8 m de la bordure (localisation *planche 1*) ont été creusées pour la description des différents profils de sol. Chaque fosse explore tout le profil de sol jusqu'à la rencontre du substratum argileux. Les descriptions pédologiques de terrain sont complétées par des analyses granulométriques (granulométrie 5 fractions) et physico-chimiques (pH, CEC, Fer total, Carbone, Azote, Manganèse total) (*annexe 2*). Les fosses 1 et 2, toutes deux situées sur un dôme micro-topographique (aux cotes $x = -10$ m et $x = 5$ m) ont été instrumentées pour réaliser un suivi hydrique : 8 niveaux de mesure (à 15, 30, 50, 80, 120, 150, 230 cm de profondeur) permettent d'étudier le comportement de chaque horizon pédologique. Pour chaque niveau, nous mesurons le potentiel de l'eau dans le sol à l'aide de tensiomètres et la teneur en eau volumique à l'aide de sondes TDR. Une fois décrites, prélevées, et éventuellement instrumentées, toutes les précautions ont été prises pour reboucher chaque fosse sans mélanger les horizons du sol.

Prospection géoélectrique

Deux campagnes de mesures géoélectriques ont été effectuées selon la méthode Wenner standard. L'une, explorant une surface de 100 m par 50 m (localisation *planche 1*) avec un écartement constant des électrodes (2 m) a permis d'obtenir une carte de la résistivité

apparente du sol intégrée sur approximativement 1 m de profondeur. L'autre, concentrée sur l'étude d'un transect (localisation *planche 1*), a fourni, à l'aide du modèle d'inversion Res2dinv (Loke, 2002), la coupe de répartition de la résistivité électrique du sol. Avec la géométrie d'acquisition de type Wenner, la sensibilité d'exploration du sol a une forme sub-horizontale (Loke, 1999). Grâce à cette propriété, la méthode est relativement bien adaptée pour l'étude de la variabilité latérale d'horizons tabulaires. Par contre, la profondeur d'investigation est limitée, en comparaison, aux autres configurations d'électrodes, ce qui limite les possibilités d'exploration de la variabilité verticale des horizons profonds du sol.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

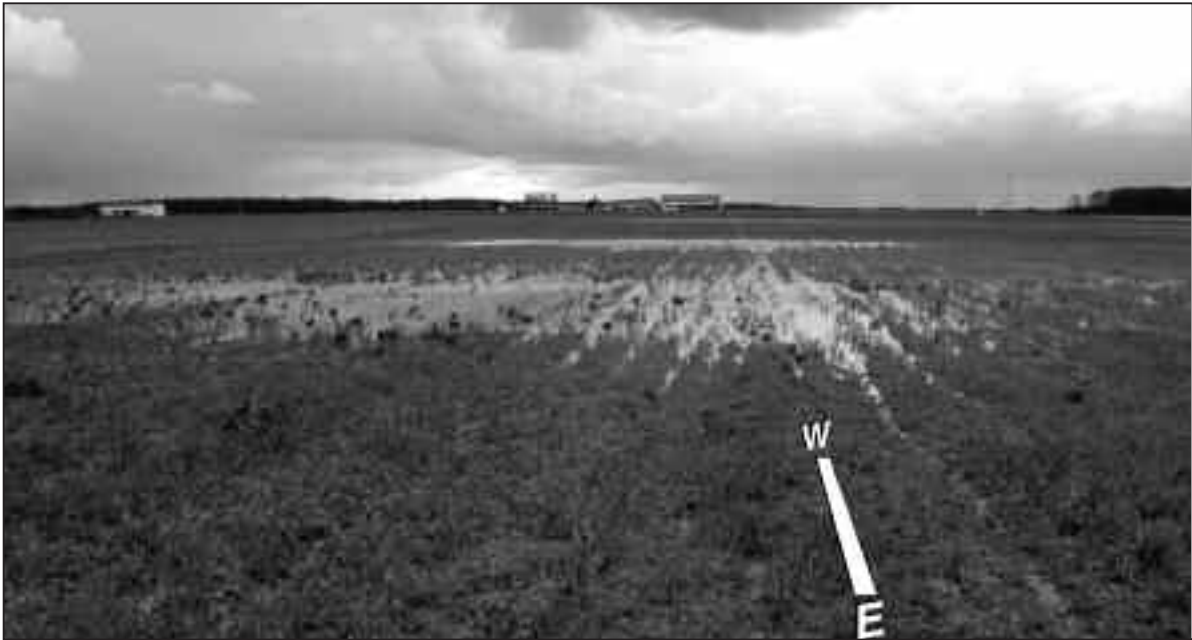
Caractérisation du fonctionnement hydrodynamique de la parcelle

Battance et ruissellement de surface

Deux dépressions microtopographiques, figurées en dégradé orangé sur la *planche 1a*, caractérisent le microrelief de la parcelle, avec des pentes de l'ordre de 1 %. Le sol en surface de la parcelle est très battant selon le calcul du « risque de battance » $R = 2,2$ (Rémy et Marin-Lafleche, 1974) à partir des résultats de l'analyse de surface (*annexe 2*). Après le travail du sol par l'agriculteur, le sol est rapidement battu par les pluies. L'observation de terrain permet d'identifier la formation rapide d'une croûte structurale. Il est difficile d'affirmer que le processus conduise jusqu'à la formation d'une croûte sédimentaire franche. Cependant, on observe clairement le flaquage et le ruissellement de l'eau de pluie qui est guidée vers les dépressions topographiques par la rugosité résiduelle du labour ou les inter-rangs culturaux (façons culturales orientées parallèlement à l'axe des x de la *planche 1*). Au cours de l'année hydrologique 2000-2001, très pluvieuse (980 mm sur le plateau), le ruissellement a entraîné la formation de deux petites mares (*figure 1*) dans les deux dépressions topographiques. Toutefois, la formation de ces mares, était exceptionnelle et le ruissellement observé les années moins pluvieuses n'est pas suffisant pour créer des mares en surface.

Apparition et disparition de la nappe perchée temporaire

Au cours de l'année hydrologique 2000-2001, la nappe perchée temporaire située au-dessus du substrat d'argile à meulrières, est apparue dès novembre 2000. Montrant quelques variations de niveau en fonction de la pluviométrie (*figure 2a*), elle est restée présente dans le sol jusque fin mai 2001 (*figure 2b*). Sa disparition au printemps est concomitante de l'augmentation de l'évapotranspiration. Au cours de l'année hydrologique 2001-2002 moins pluvieuse (770 mm sur le plateau), la nappe est apparue de manière très fugace. Il faut attendre les événements orageux de février-mars pour que

Figure 1 - Flaques dues au ruissellement accumulé dans les dépressions topographiques (mars 2001).**Figure 1** - Water pools due to runoff accumulation in topographic depressions (March 2001).

la nappe perchée apparaisse (*figure 2c et 2d*). Elle disparaîtra complètement vers fin avril, lorsque l'évapotranspiration devient nettement supérieure aux précipitations.

Les dépressions topographiques, zones de recharge de la nappe perchée

La répartition et la faible densité des piézomètres « profonds » permettent seulement le levé d'une carte piézométrique succincte de la nappe perchée temporaire se formant au-dessus du substrat d'argile à meulrières (*planche 1b*). Elle montre la présence de deux dômes piézométriques localisés sous les dépressions topographiques. D'une année à l'autre, la structure de la nappe temporaire est conservée (*figure 2*). Deux dômes piézométriques (aux cotes $x = -20$ m et $x = 30$ m sur la *figure 2*) sont situés au droit des dépressions topographiques. Il apparaît que la concentration des pluies dans les dépressions topographiques par ruissellement est un facteur prépondérant dans le phénomène de formation de la nappe perchée temporaire. Ainsi, l'eau s'infiltré préférentiellement au droit de ces dépressions, définissant les zones de recharge de la nappe, où se forment les dômes piézométriques.

Les exutoires de la nappe

Outre la localisation des dômes piézométriques, la structure de la nappe est caractérisée par des zones de rabattement fixes visibles sur la *figure 2* aux cotes $x = 10$ m et $x = 40$ m, une troisième étant probablement situé non loin de la cote $x = -40$ m. Partant des

dômes piézométriques, la nappe perchée temporaire, assise sur le substratum imperméable que constitue l'argile à meulrières, s'écoule latéralement vers des exutoires drainants fixes mais curieusement pas situés aux points les plus bas du substrat d'argile à meulrières.

Ménillet (1974) parle d'une formation chaotique, résultant de l'altération des Calcaires de Beauce au cours de nombreuses pédogénèses et au sein de laquelle ont pu être intimement mêlés des limons anciens. Il est donc possible que localement le taux de calcaire résiduel et/ou de limon mêlé à l'argile soit suffisamment important pour augmenter significativement la conductivité hydraulique de celle-ci. Ainsi, elle pourrait contenir des fenêtres drainantes au travers du substratum imperméable, guidant les écoulements jusqu'aux sables de Fontainebleau. Une autre hypothèse peut être envisagée. La topographie du substratum argileux serait marquée par la présence de paléo-chenaux correspondant à un ancien réseau hydrographique. Aujourd'hui ils joueraient le rôle d'exutoires latéraux sous forme de chenaux drainants capables de guider en périphérie de plateau les écoulements retenus sur le substratum imperméable. Ménillet (1974) et Crahet (1981) associent la présence de calcaire au sein et à la base de la formation d'argile à meulrières avec la présence de tels chenaux. Or, les premiers centimètres d'argile à meulière observés au niveau des profils 1 et 2 contiennent une proportion assez importante de calcaire sous forme de graviers centimétriques contrairement aux profils 3 et 4 (*annexe 1*). La carte piézométrique (*planche 1b*) dessine un chenal orienté nord sud passant par la cote $x = 10$ m, alors qu'au niveau de la cote $x = 40$ m, le

Figure 2 - Coupes hydrologiques synthétiques, en altitudes relatives (cm), montrant différents épisodes d'apparition de la nappe perchée sur le substratum d'argile à meulrières : (a) battement de la nappe en période pluvieuse, (b) ressuyage de la nappe avec l'arrivée du climat printanier, (c) première apparition fugace de la nappe depuis l'été après un orage (33 mm le 13/02/02), (d) seconde et dernière remon-tée de la nappe pour l'année hydrologique 2001/2002 en période orageuse (22 mm le 18/03/02).

Figure 2 - Synthetic hydrological transects showing various episodes of perched water table appearance upon the clay bed (relative alti-tude in cm) : (a) water table variation in rainy period, (b) water table disappearance when approaching the spring season, (c) first tran-sient water table appearance since summer after a storm (33 mm on 13/02/02), (d) second and last water table appearance in the hydro-logical year 2001/2002 during a stormy period.

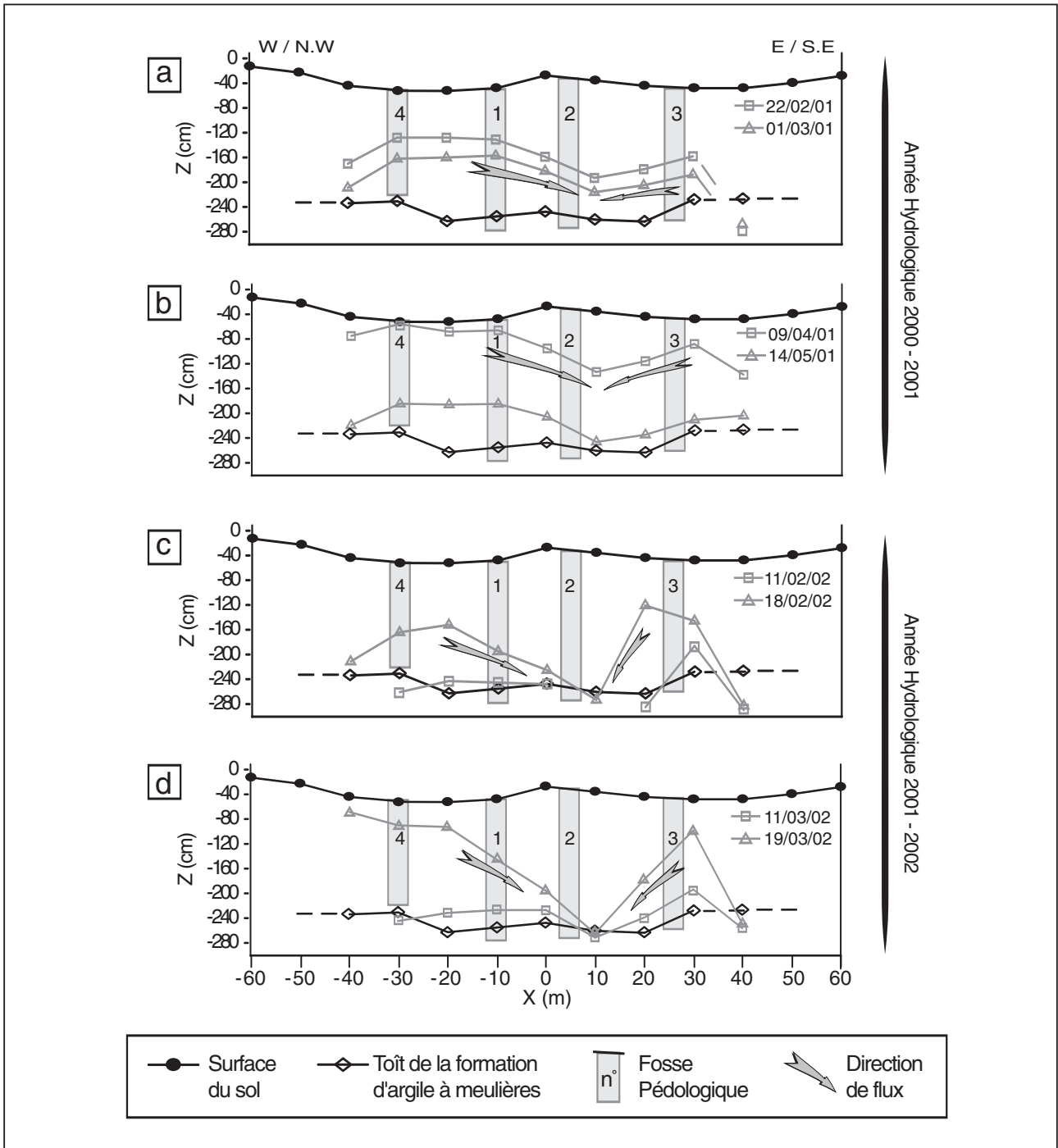
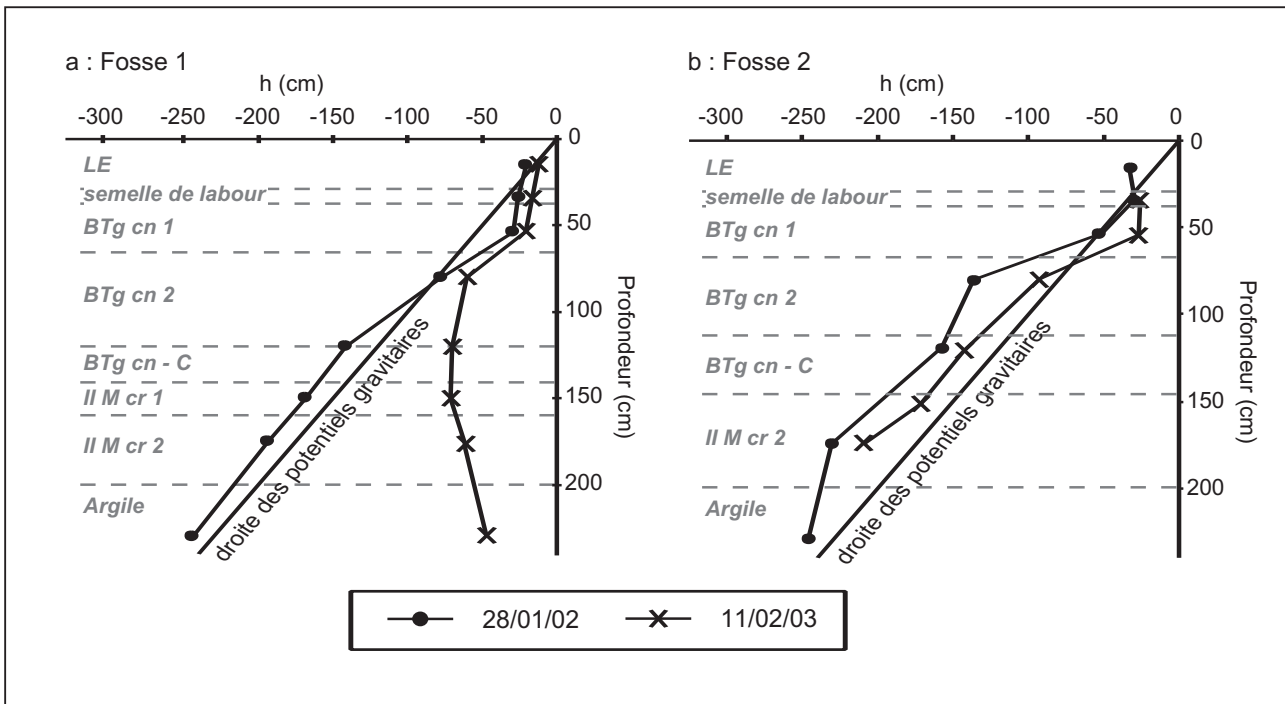


Figure 3 - Profils tensiométriques obtenus au sein des fosses 1 et 2 les 28/01/02 et 11/02/03. Apparition d'une seconde nappe perchée retenue sur et dans l'horizon BTg cn1 : (a) fosse 1, (b) fosse 2.

Figure 3 - Tensiometric profiles on 28/01/02 and 11/02/03 obtained for soil profiles 1 and 2. Appearance of a second perched water table in and upon the BTg cn1 horizon : (a) soil profile 1, (b) soil profile 2.



rabattement de nappe semble matérialiser la présence d'une zone drainante qui correspondrait à une « fenêtre » au travers du substratum.

A noter l'importance des gradients de charge hydrauliques en jeu (pentes piézométriques $> 5\%$ sur la *figure 2*) qui attestent de l'efficacité des exutoires et de la rapidité des transferts expliquant la fugacité de la nappe temporaire. La distance entre les zones de recharge et les exutoires influence la puissance des écoulements. Ainsi au niveau de la cote $x = 30$ m (*figure 2*), le dôme piézométrique, circonscrit entre deux exutoires proches, montre des rabattements très importants avec des gradients piézométriques pouvant atteindre 15% .

Existence d'une seconde nappe perchée sur l'horizon BT

Le suivi des 4 piézomètres de surface implantés dans l'horizon BT (localisation *planche 1b*) n'a pas montré la formation d'une seconde nappe, clairement identifiée. Nous constatons seulement un effet de retard lorsque la nappe « profonde », ayant remonté et dépassé l'horizon BT, se retire : une retenue plus ou moins fugace, pouvant durer un à deux jours, se produit au sein de l'horizon BT alors que la nappe principale a déjà rejoint les horizons inférieurs. Par contre la *figure 3* montre quelques profils tensiométriques obtenus au niveau des fosses 1 et 2 avec le passage du profil de potentiel sous

la droite des potentiels gravitaires, attestant de la mise en charge dans l'horizon BT.

Organisation de la couverture pédologique et pédogénèse

Profils pédologiques et différenciation latérale

Les différents profils de sol discutés dans cette section sont représentés sur la *figure 4*. Leur localisation dans le contexte hydrologique et topographique est indiquée sur les *planche 1* et *figure 2*. Deux profils types sont différenciés en fonction de leur localisation topographique : profil 1 sur dôme micro-topographique et profil 3 en dépression micro-topographique. Leurs descriptions pédologiques détaillées et les analyses physico-chimiques correspondantes sont présentées en annexes (*annexes 1 et 2*).

Au niveau des dômes topographiques (*profils 1 et 2*), le lessivage a conduit à la formation d'un horizon éluvial actuellement labouré LE (comprenant la semelle de labour) à faible teneur en argile ($\sim 17\%$) et $fe_{total} (< 2 \text{ g}/100\text{g})$. Sous la semelle de labour, l'illuviation en revêtements argileux brun franc marque l'apparition de l'horizon BTg cn1, à structure polyédrique anguleuse avec une teneur en argile de l'ordre de 30% . Au sein des horizons illuviés la teneur en fe_{total} est relative-

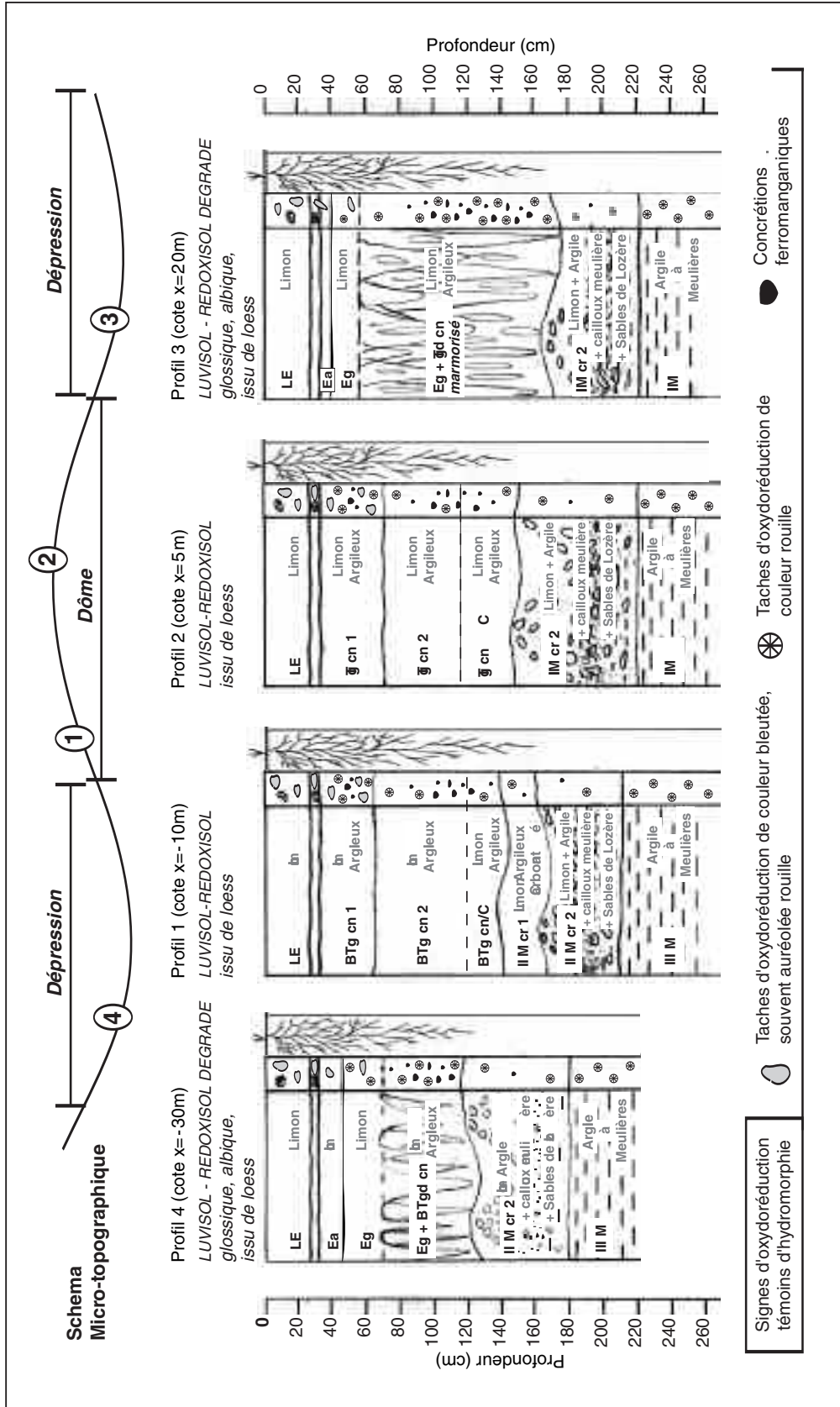
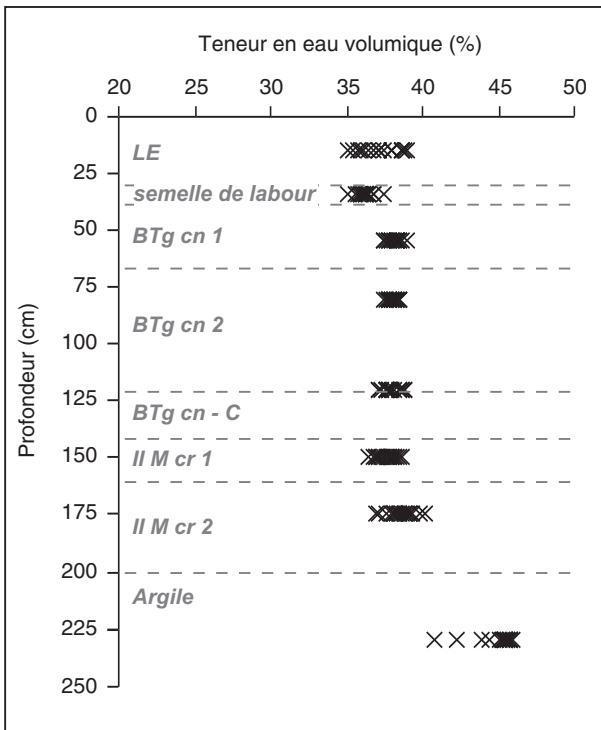


Figure 4 - Les différents profils pédologiques observés sur la parcelle des Alluets-le-Roi. Figure 4 - Various pedological profiles observed at the studied field.

Figure 5 - Variations de teneur en eau volumique dans le profil de sol en période de battement de la nappe perchée temporaire. (20 profils réalisés du 11/01/02 au 26/03/02 à l'aide des sondes TDR implantées dans la fosse 1).

Figure 5 - Variations of volumetric water content in the soil profile during level variation period of the temporary perched water table. (20 profiles realised between 11/01/02 to 26/03/02 using TDR probes established in soil profile 1).



vement importante (≥ 3 g/100g) et l'engorgement temporaire a laissé de nombreuses taches d'oxydation et concrétions ferro-manganiques. Le profil de sol n'est pas complètement décarbonaté avec la présence à environ 140 cm de profondeur d'un front de décarbonatation marquant la fin de l'illuviation d'argile et l'apparition de l'horizon II M cr1 légèrement cryoturbé, puis de l'horizon II M cr2 fortement cryoturbé. Les calculs des IDT (indice de différenciation textural; Jamagne, 1994) pour les profils 1 et 2 sont respectivement égaux à 1,7 et 1,9 montrant que le processus de lessivage est relativement bien avancé. Compte tenu de la présence prononcée de signes d'hydromorphie, nous optons pour le rattachement double aux LUVISOLS-RÉDOXISOLS (solum diagnostique: LE / BTg) (Favrot et Vizier, 1994; Jamagne, 1994) de ces sols développés sur dôme micro-topographique. L'horizon BTg apparaît directement sous la semelle de labour dans le profil 2, situé en haut de dôme topographique. Le profil 1, situé plus dans la pente, présente sous la semelle de labour les prémices d'une pénétration glossique avec de faibles blanchiments dans la partie supérieure de l'horizon BTg.

Dans les dépressions micro-topographiques (profils 3 et 4), le lessivage a développé une éluviation qui descend plus profondément dans le profil. Les horizons élutriés pauvres en argile ($< 17\%$) et en fer total ($< 1,7$ g/100g), sont fortement décolorés dans leur globalité. Ils sont donc tous au moins partiellement albiqes. Sous la semelle de labour, on identifie un horizon nettement albiqes Ea, marqué par l'absence quasi totale de précipitation rouille. En dessous, l'horizon Eg contient encore des concentrations et indurations d'oxydes (tache d'oxydation et concrétions). L'horizon Eg + BTgd cn présente une alternance plus ou moins verticale entre des zones brunes, très oxydées (coloration rouille très étendue et nombreuses concrétions) à taches brun franc avec des restes de structure prismatique (BTgd résiduel), d'une part, et des zones beige claire à blanc, en prolongement de l'horizon E sous forme de langues et digitations (glosses), d'autre part.

Au sein du profil 3, nous avons tenté de réaliser un prélèvement sélectif à environ 70-80 cm de profondeur pour analyser séparément les zones blanchies (glosses) et le BTgd (annexe 2). L'alternance glosses - BTgd étant relativement fine, il n'a pas été facile de prélever correctement ces deux zones. Au sein des glosses, l'analyse révèle une éluviation prononcée avec une très faible teneur en argile (14,5 %) et en fer total ($\sim 1,5$ g/100g) contrastant avec l'analyse moyenne (Eg + BTgd: argile = 17 % ; fer total $\sim 1,8$ g/100g). L'analyse du BTgd, probablement polluée par du Eg (problème de prélèvement) est sûrement biaisée mais atteste tout de même de teneurs supérieures en argile (18,4 %) et en fer total (> 2 g/100g). L'horizon II M cr2 fortement cryoturbé marque la fin de la pénétration glossique. Contrairement aux profils 1 et 2, les profils 3 et 4 sont entièrement décarbonatés en profondeur. L'engorgement du sol se marque par une dégradation importante du BTgd (nombreuses concrétions, taches d'oxydation très étendues) et par la teinte bleu-tée que peuvent prendre l'ensemble des horizons élutriés en période humide, traduisant une réduction temporaire du fer. Nous optons donc pour le rattachement double LUVISOL - RÉDOXISOL DÉGRADÉ glossique, albiqes (solum diagnostique: LE / Eg / Eg + BTgd) (Favrot et Vizier, 1994; Jamagne, 1994) de ces sols développés en dépression micro-topographique. Le profil 3 est nettement plus dégradé que le profil 4 avec une concentration plus importante en glosses et une marmorisation plus prononcée de l'horizon BTgd.

La différenciation des profils en relation avec la topographie semble s'organiser selon le schéma suivant: Le ruissellement entraîne une évolution pédologique plus poussée dans les zones de réception et infiltration préférentielle.

Résistivité de la couverture pédologique

La méthode géoélectrique est un outil efficace pour apprécier la variabilité spatiale des sols au sein de la parcelle (Michot, 2003). Au champ, la résistivité apparente d'un sol humide est très fortement influencée par la proportion d'argile plus conductrice (Auerwald *et al.*, 2001). Cette propriété est due au fait que les argiles ont une grande capacité d'échange cationique. Elles fixent donc des cations qui augmentent la densité de charges conductrices à leur surface

(Ward, 1990). Les variations de teneur en eau influencent la mesure de résistivité apparente. Toutefois, en période de battement de la nappe, période à laquelle nous avons réalisé nos campagnes de mesure géophysique, la teneur en eau volumique dans le profil de sol varie relativement peu (entre 35 et 40 %, *figure 5*). Auerswald *et al.* (2001) et Michot (2003) montrent sur des matériaux limono-argileux en laboratoire et *in situ* que la résistivité électrique est très peu modifiée par les variations de teneur en eau dans la gamme que nous avons rencontrée, de sorte que nous considérons que ces variations ont une influence minimale sur nos mesures de résistivité apparente.

Il existe une bonne relation entre la résistivité du sol présentée en coupe sur la *planche 2* et les horizons pédologiques : les horizons E d'éluviation apparaissent plus résistants (résistivité supérieure à 80 ohm.m) que les horizons BT argileux (résistivité comprise entre 40 et 60 ohm.m). Ainsi, la coupe isorésistive nous permet d'apprécier l'évolution latérale du lessivage et de la dégradation. Au niveau du dôme topographique (cote $x = 0$), la zone résistante est de faible épaisseur. Elle correspond au labour éluvié (LE) (Profil 2), cette faible épaisseur pouvant être due à une érosion de surface entraînée par le ruissellement. La rencontre de l'horizon BT, directement sous la semelle de labour fait rapidement augmenter la conductivité électrique du sol. En progressant latéralement vers les dépressions topographiques, l'épaisseur de la zone résistante augmente. Elle correspond à l'épaississement des horizons éluviaux et à la dégradation progressive de l'horizon BT. L'épaississement de l'horizon E pourrait aussi être accentué par l'accumulation des produits d'érosion de surface (particules limoneuses entraînées par ruissellement vers les dépressions topographiques).

De manière simplifiée, la carte de résistivité apparente (*figure 7a*) dépend de la proportion d'horizon éluvial pauvre en argile par rapport à la proportion d'horizon BT argileux présent dans le premier mètre du sol. Moins l'horizon E est profond (type profil 2), plus la résistivité apparente résultante est faible. Au contraire, la résistivité apparente augmente à l'approche de profils de sol plus dégradés (type profil 3) où l'horizon E a une épaisseur plus importante. Dans la zone correspondant au profil 3, on retrouve la dégradation plus importante du sol comparativement au profil 4 avec une augmentation plus marquée de la résistivité. Comme précédemment, la confrontation de la carte de résistivité apparente et des différents profils observés montre une bonne relation. Ainsi, l'interprétation de cette carte conduit à la délimitation dans l'espace de zones pouvant correspondre aux différentes unités pédologiques rencontrées sur la parcelle. Cette interprétation est proposée sur la *figure 7b*. La carte isorésistive et son interprétation en zones pédologiques présentent la même organisation que la carte topographique. On constate une relation étroite entre le fonctionnement hydrologique de la parcelle et son organisation pédologique.

Conclusion

Conclusion

Sur le fonctionnement hydrodynamique de la parcelle

La *figure 8* présente un schéma du fonctionnement hydrodynamique de la couverture pédologique. La formation d'une croûte structurale battue à la surface du sol entraîne le ruissellement d'une partie des précipitations qui se concentrent pour s'infiltrer préférentiellement dans les dépressions topographiques. Au droit de celles-ci se forment, au sein de la couverture limoneuse, les dômes piézométriques d'une nappe temporaire, retenue à 2 m de profondeur sur le substratum imperméable d'argile à meulière. Cette nappe s'écoule latéralement vers des exutoires constitués par des chenaux à la surface de l'argile à meulière et/ou des fenêtres drainantes au sein de l'argile à meulière, pour aller recharger la nappe sous-jacente des sables de Fontainebleau. La nappe perchée a une dynamique très locale, limitée par la présence d'exutoires faiblement espacés. Ainsi, dans la partie nord-ouest de la nappe identifiée, on compte 40 m de distance entre la zone de recharge et l'exutoire. Les pentes piézométriques observées sont assez importantes avec des valeurs de 4 à 5 %. Dans la partie sud-est, la distance entre la zone de recharge et l'exutoire est de l'ordre de 15 m. Les gradients piézométriques peuvent atteindre à cet endroit jusqu'à 15 %.

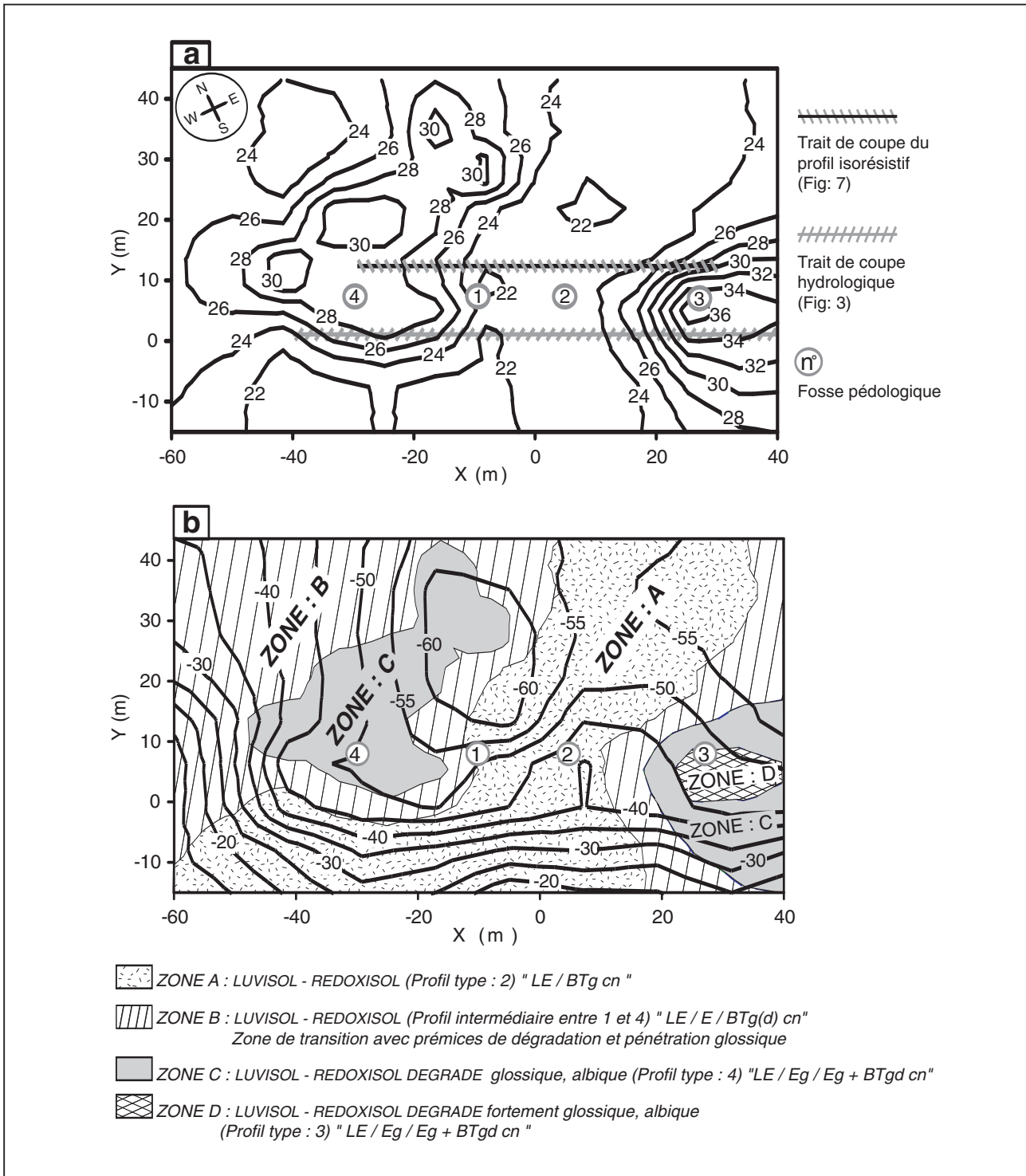
Relation entre hydrologie et pédogenèse

Les précipitations, après ruissellement, s'infiltrent préférentiellement au niveau des dépressions topographiques. Or c'est à cet endroit que l'étude pédologique montre l'évolution pédogénétique la plus importante, avec la présence de LUVISOLS très dégradés plus ou moins glossiques et systématiquement hydromorphes (Profils 3 et 4). La percolation de l'eau est un des moteurs principaux de toute pédogenèse et spécialement des phénomènes de lessivage et de dégradation. Les sols fortement drainés, situés dans les dépressions topographiques, sont les plus évolués pédologiquement au sein de la parcelle. De plus, ces zones, correspondant aux dômes piézométriques de la nappe temporaire, sont sujettes à un engorgement important. On comprend aussi la dégradation plus prononcée du profil 3 par rapport au profil 4 : le dôme piézométrique, pris entre deux exutoires proches, est entouré de gradients piézométriques très importants et l'ampleur des écoulements résultants pourrait avoir accéléré la dégradation du profil.

Au droit des dômes topographiques et des pentes ruisselantes, nous sommes en présence de profils de sol moins évolués (LUVISOLS-RÉDOXISOLS). Aujourd'hui, la formation régulière de croûtes de batance ralentit sans doute l'évolution pédogénétique de ces sols en supprimant une partie de l'infiltration. Le ruissellement pourrait avoir initié une érosion de surface réduisant l'épaisseur de l'horizon E des profils en situation de dôme et pente topographique, les produits d'érosion s'accumulant alors dans les dépressions topographiques. Les marques d'hydromorphie s'expliquent encore par la présence temporaire de la nappe. En outre, nous avons pu constater un engorgement relatif de l'horizon BT par l'infiltration des pluies.

Figure 7 - Carte de résistivité apparente du sol et interprétation en zones pédologiques : (a) Carte de résistivité apparente (ohm.m) du sol - Acquisition géophysique du 22 au 29/01/01 - Méthode Wenner (espacement des électrodes: 2 m), (b) Carte pédologique de la parcelle directement interprétée à partir de la carte de résistivité - sur fond topographique en valeur d'altitudes relatives (cm).

Figure 7 - Apparent resistivity map of the field plot and interpretation in pedological zones : (a) Apparent resistivity map (ohm.m) - Geophysical acquisition between 22 and 29/01/01 - Wenner method (electrodes spacing : 2 m), (b) Pedological map directly interpreted from the apparent resistivity map - with topographic map (relative altitude in cm).



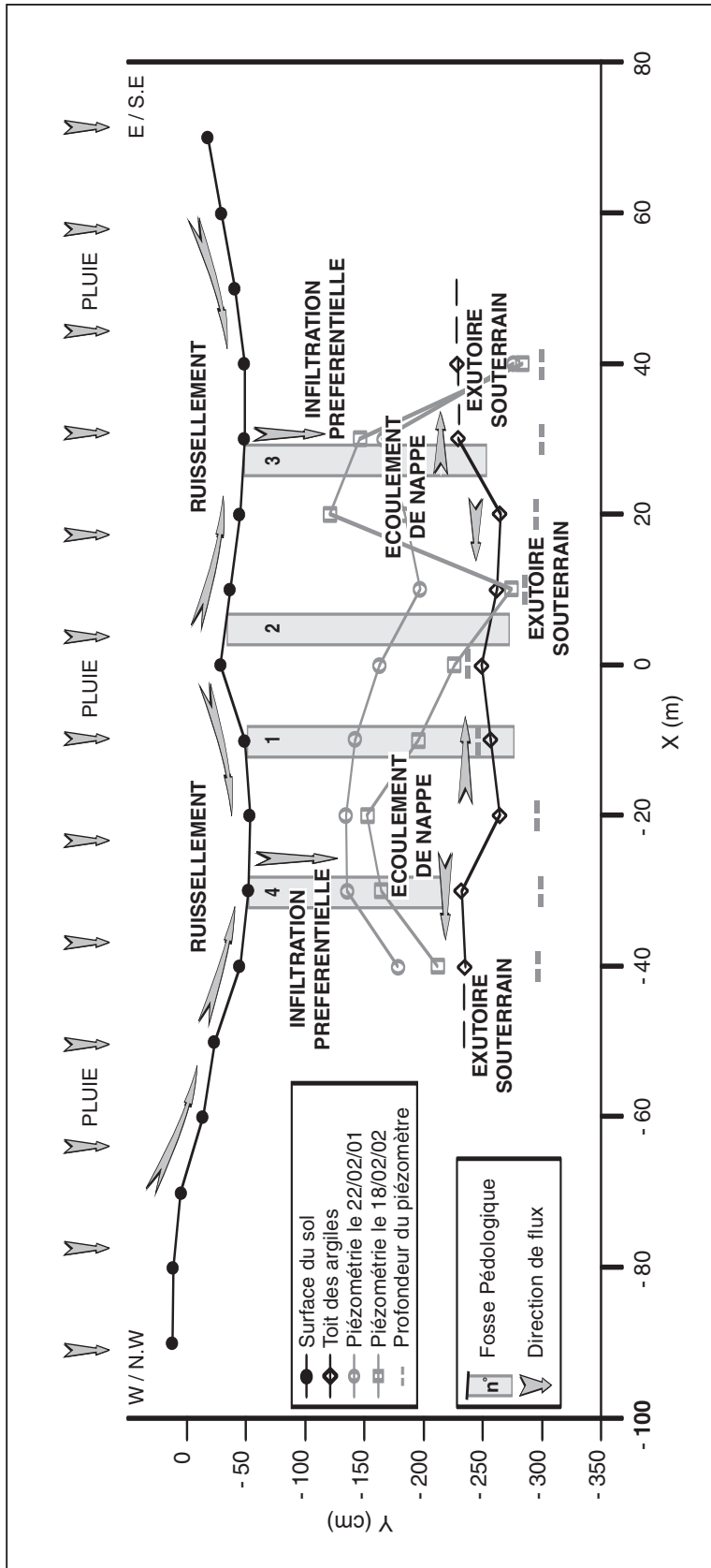


Figure 8 - Fonctionnement hydrodynamique schématique de la parcelle
Figure 8 - Schematic hydrodynamical behaviour of the field plot

L'outil géoélectrique

La mise en évidence d'une correspondance entre la résistivité électrique du sol et son organisation pédologique a permis d'apprécier l'évolution latérale et la répartition dans l'espace des différents types de sol. Dans notre cas, la résistivité du sol est essentiellement influencée par la proportion d'argile plus conductrice et il est possible de suivre la limite marquée par le contraste de résistivité existant entre l'horizon E éluvié (résistivité supérieure à 80 ohm.m) et l'horizon BT illuvié (résistivité comprise entre 40 et 60 ohm.m). Ainsi une image en coupe de la résistivité du sol a permis d'apprécier latéralement l'épaissement de l'horizon E et la dégradation progressive de l'horizon BT à l'approche des dépressions topographiques. Sur le même principe, la carte de résistivité apparente du sol a donné lieu à l'élaboration d'une carte pédologique. Confrontée à la topographie et à l'hydrologie, l'étude géoélectrique a permis de conforter la compréhension des relations existant entre le fonctionnement hydrodynamique de la parcelle et son évolution pédogénétique.

BIBLIOGRAPHIE

- André P. et Roussel Ph., 1978 - Alimentation en eau des communes de la zone rurale de l'Essonne. Vulnérabilité des réservoirs aquifères. BRGM, 78 SGN 610 BDP; 102 p, 3 volumes.
- Auerswald K., Simon S. et Stanjek H., 2001 - Influence of soil properties on electrical conductivity under humid water regimes. *Soil Science*, 166 (6) : 382 - 390.
- Baize D., 1995 - Les sols argileux appauvris en argile sous climat tempéré humide. Planosols texturaux, Pélosols différenciés et autres solums. *Etude et Gestion des Sols*, 2 (4) : 227-240.
- Bariteau A., 1996 - Modélisation géochimique d'un aquifère : la nappe de Beauce et l'altération des sables de Fontainebleau. Ecole des mines de Paris, Mémoires des sciences de la terre, n°28; 178 p.
- Boiffin J., 1984 - La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur-ingénieur INA-PG; 320 p + annexes.
- Boiffin J., Papy F. et Peyre Y., 1986 - Système de production, système de culture et risques d'érosion par ruissellement concentré. I- Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8 : 663-673.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plénet D., Cellier P., Mached J.M., Meynard J.M. et Delécolle R., 1998 - STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I- Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18 : 311-346.
- Cam C., Froger D., Moulin J., Rassinoux J. et Servant J., 1996 - Représentation cartographique de la sensibilité des sols à l'infiltration hydrique verticale. Carte thématique à l'infiltration verticale. *Etude et Gestion des Sols*, 3 (4) : 279-295.
- Crahet M., 1981 - Carte pédologique de la France au 1/100.000. Feuille de Chartres. Notice explicative. INRA, Publ. n°14; 235 p.
- Decau J. et Pujol B., 1992 - Contribution des techniques culturales à la lutte contre la pollution nitrique des nappes phréatiques. *Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA*, 18 : 23-28.
- Dupuis P., Banton O. et Razack M., 1997 - Contamination nitrée des eaux souterraines d'un bassin versant agricole hétérogène. 1- évaluation des apports de la nappe (modèle Agriflux). *Revue des sciences de l'eau*, 1 : 23-40.
- Favrot J.C. et Vizier J.F., 1994 - Solums à caractères hydromorphes (Ensemble Cognat). 12e version. *In: Référentiel Pédologique 1995*. Baize D. et Girard M.C. (Editeurs), INRA Editions; pp. 181-189.
- Goguel J., Cavalier Cl. et Feugueur L., 1967 - Carte géologique de Versailles au 1/50.000 & Notice explicative. CGF/BRGM, n° XXII-14; 20 p.
- Jamagne M., 1969 - Données sur l'évolution pédogénétique des formations limoneuses en Europe occidentale, Mémoire hors série. Société Géologique de France, n° 5 : 37-52.
- Jamagne M., 1994 - Luvisols. 6^e version. *In: Référentiel Pédologique 1995*. Baize D. et Girard M.C. (Editeurs), INRA Editions; pp. 195-203.
- Jamagne M. et Bégon J.C., 1984 - Les sols lessivés de la zone tempérée. Apport de la pédologie française. *In: Livre jubilaire du Cinquantenaire, A.F.E.S.* Paris; pp. 55-76.
- Le Bissonnais Y. et 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.
- Levesque L., 1982 - Elimination des nitrates des eaux potables. Mise à jour de l'étude de synthèse, documents parus de 1976 à 1981. Association Française pour l'Etude des Eaux, Paris; 266 p.
- Loke, M.H., 1999 - Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-d and 3-d surveys. Austin, Texas, Advanced Geosciences Inc.; 57 p.
- Loke M.H., 2002 - RES2DINV ver. 3.51 for Windows 98/Me/2000/NT/XP.0 Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least_squares Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-squares method. Wenner (a, b, g), dipole-dipole, inline pole-pole, pole-dipole, equatorial dipole-dipole Schlumberger and non conventional arrays. On land, underwater and cross-borehole surveys. *Geoelectrical Imaging 2-D & 3D*, Geotomo Software; 118 p.
- Ménillet F., 1974 - Etude pétrographique et sédimentologique des calcaires d'Etampes et de Beauce. Formations dulcaquicoles du Stampien Supérieur à l'Aquitainien dans le bassin de Paris. Thèse de doctorat de l'université Paris-sud, Centre d'Orsay; 138 p + planches.
- Mercier R., 1981 - Inventaire des ressources aquifères et vulnérabilité des nappes du département des Yvelines. Service géologique régional Ile de France, B.R.G.M., 81.SGN.348.IDF; 232 p, 9 volumes.
- Michot D., 2003 - Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire. Thèse de doctorat de l'université Paris VI; 393 p.
- Musy A. et Souter M., 1991 - Physique du sol. Collection Gérer l'Environnement n°6, Presse Polytechniques et Universitaires romande; 335 p.
- Rémy J.C. et Marin-Lafliche A., 1974 - L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Annales Agronomiques*, 25 (4) : 607-632.
- Simunek J., Sejna M. et van Genuchten M.T., 1999 - The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Technical Report Version 2.0, IGWMT-PTS-53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Ward S.H., 1990 - Resistivity and induced polarisation method. *In: Geotechnical and environmental geophysics*. Ward S.H. (Editeur), Society of Exploration Geophysicists, série Investigations in Geophysics, vol 5; pp. 147-189

ANNEXES

Annexe 1 : Description/observation pédologique détaillée des profils types 1 et 3

Profil 1

Localisation : Dôme micro-topographique
(Cote x = -10 m, *planche 1*)

Solum diagnostique : LE/BTg.cn sous culture

Classification : LUVISOL-REDOXISOL issu de loess

Horizon LE (0-28 cm) :

Horizon labouré éluvial brun à brun foncé. Battance en surface. Limoneux très faiblement sableux. Peu de graviers et cailloux : calcaire de chaulage et meulière. Structure typique du labour. En saison humide, les mottes compactes auréolées de rouille présentent une masse bleutée traduisant une réduction temporaire du fer. Nombreuses racines fines et moyennes pénétrant les agrégats. Limite inférieure très nette, légèrement ondulée.

Horizon LE, L5 et L7 Semelle de labour (28-35 cm) :

Zone tassée très compacte, à limites irrégulières. On identifie réellement deux semelles bien distinctes : L7 (31-35 cm) correspondant à un ancien fond de labour ou à la profondeur de l'enfouissement du chaulage. Superposée au niveau L7, on trouve L5 la semelle actuelle (28-31 cm). Cette dernière peut contenir des cailloux calcaires provenant du chaulage, et en saison humide prendre des couleurs de réduction du fer. Les caractéristiques granulométriques (*annexe 2*) et texturales de cette double semelle sont proches de celles du reste de l'horizon labouré (LE). Elle est donc incluse dans la dénomination LE.

Horizon BTg cn1 (35-65 cm) :

Horizon brun d'accumulation d'argiles illuviales en revêtements brun franc, avec un caractère rédoxique (taches d'oxydation). Limono-argileux, rares cailloux de meulière épars. Juste sous la semelle de labour, on observe les prémices d'une pénétration glosique avec de faibles blanchiments. Assez massif, structure polyédrique sub-anguleuse marquée par des revêtements argileux sur les faces structurales. Nombreuses taches et zones de couleur rouille. Nombreuses concrétions ferro-manganiques noires (~1 à 2 mm). Entre 45 et 60 cm de profondeur, zone riche en concrétions plus grosses (1 à 3 mm), friables, noires. Nombreuses racines fines et moyennes pénétrant les agrégats. Limite inférieure nette.

Horizon BTg cn2 (65-120 cm)

Horizon brun d'accumulation d'argiles illuviales en revêtements brun franc, avec un caractère rédoxique (taches d'oxydation). Limono-argileux ne contenant quasiment plus de sable. Structure polyédrique anguleuse grossière disparaissant progressivement vers la profondeur et sur-structure prismatique. Revêtements argileux brun sombre sur les faces structurales. Taches et zones de couleur rouille. Concrétions ferro-manganiques éparses de petite taille (~ 1 mm). A partir de 100 cm de profondeur, une zone de concrétions plus grosses et sur-abondantes (1 à 3 mm). Nombreuses racines fines et moyennes pénétrant les agrégats dans la partie supérieure de l'horizon, et diminuant de taille vers la profondeur. Transition peu distincte.

Horizon BTg cn/C (120-140 cm)

Horizon de transition entre l'horizon d'accumulation d'argiles illuviales en revêtements brun franc et l'horizon non structuré sous-jacent. Structure prismatique peu nette. Diminution progressive avec la profondeur de l'abondance des faces structurales marquées par des revêtements argileux brun sombre de moins en moins nets. Matrice limoneuse décarbonatée. Taches et zones de couleur rouille. Nombreuses concrétions ferro-manganiques friables noires (1 à 3 mm). Racines fines peu nombreuses pénétrant les agrégats. Limite inférieure très nette, irrégulière correspondant au front de décarbonatation.

Horizon II M cr1 (140-160 cm) :

Début de mélange de loess carbonaté et de cailloux provenant de l'argile à meulière. Limon carbonaté légèrement argileux et plus sableux que l'horizon sus-jacent, le taux d'argiles augmentant vers la profondeur. Quelques cailloux de meulière. Structure massive, quelques petits éléments carbonatés diffus et en pseudomycélium. Taches rouille et petites concrétions ferro-manganiques éparses. Quelques racines fines. Limite inférieure peu nette.

Horizon II M cr2 (160-200 cm) :

Horizon de transition entre le loess et le substratum d'argile à meulière, remaniés par cryoturbation. Couleur brun jaune à jaune. Limite supérieure ondulée (10 à 20 cm d'amplitude) irrégulière plus ou moins net marquée par des cailloux de meulière. Horizon à matrice carbonatée très fortement argileuse, cryoturbé ; mélange de limon, de sables de Lozère et d'éléments provenant du substratum tertiaire : argiles, cailloux et graviers de meulière, graviers calcaires. On identifie des « cheminées » de remontée de cailloux, typiques de la cryoturbation. Les sables de Lozère, moins volumineux, n'ont pas été remontés suffisamment. Ils apparaissent plus bas dans l'horizon, définissant une bande plus argilo-sableuse à l'approche du substratum. Cailloux de meulière teintés d'ocre-rouille. Structure massive. Rares radicales pénétrant la partie supérieure de l'horizon. Limite inférieure progressive vers l'argile à meulière bariolée franche.

Horizon III Argile à meulière :

Le fond de fosse permet d'observer les 20 premiers centimètres du substratum d'argile à meulière. On constate alors un niveau majoritairement composé d'argile bariolée (passées ocre, gris, jaune), carbonaté dans la masse et contenant des fragments centimétriques à pluri-centimétriques arrondis de calcaire blanc pulvérulent. Nombreux cailloux de meulière teintés d'ocre-rouille.

Profil 3 :

Localisation : Dépression micro-topographique

(Cote x = 27 m, *planche 1*)

Solum diagnostique : LE / E a/g / E + BTgd glossique, sous culture.

Classification : LUVISOL - RÉDOXISOL dégradé glossique, albique, issu de loess

Horizon LE (0-28 cm) : idem profil 1

Horizon LE, L5 et L7 Semelle de labour (28-35 cm) : idem profil 1

Horizon Ea (35-41 cm) :

Horizon éluvial albique. Texture limoneuse. Pas de graviers de meulière. Couleur très claire, beige à blanc, surtout visible à l'état sec. Structure continue à caractère friable. Rares taches rouille (< 0,5 mm). En saison humide, l'horizon peut entièrement prendre une teinte bleutée traduisant une réduction temporaire du fer. Absence totale de nodules noirs ferro-manganiques. Nombreuses racines fines et moyennes. Limite inférieure peu nette (transition).

Horizon Eg (41-60 cm) :

Horizon éluvial à caractère rédoxique. Couleur beige claire à blanc. Texture limoneuse. Pas de graviers de meulière. Structure continue, caractère plus ou moins friable. Taches, zones et indurations de couleur rouille allant croissant vers la profondeur. Quelques petites concrétions ferro-manganiques noires peu indurées (< 1 mm). En saison humide, l'horizon peut entièrement prendre une teinte bleutée traduisant une réduction temporaire du fer. Nombreuses racines fines et moyennes. Limite inférieure peu nette (transition).

Horizon Eg + BTgd cn (60-175 cm) :

Horizon illuvial dégradé glossique. Pénétration de l'horizon Eg sus-

jaçant dans un horizon BTgd sous forme de langues (glosses) beige clair facilement identifiables en coupe horizontale. La dégradation et l'abondance des glosses sont telles que l'horizon présente une alternance, plus ou moins verticale, de zones beige clair (E) et de zones brunes marquées de rouille à taches brun franc (BTgd). Marmorisé. Structuration difficilement identifiable : légère structuration polyédrique, avec des restes de sur-structure prismatique (faces verticales) dans les zones de BTgd. Nombreuses racines fines et moyennes pénétrant les agrégats dans la partie supérieure de l'horizon et allant diminuant vers la profondeur. Limite inférieure peu nette, marquée par l'apparition de cailloux de meulière.

Les zones blanchies (glosses) sont friables et de couleur beige clair uniforme avec de rares taches rouille (< 0,5 mm). En saison humide, elles peuvent prendre une teinte bleutée traduisant une réduction temporaire du fer. La périphérie des glosses est marquée par une auréole d'oxydation rouille et une concentration de nodules ferro-manganiques noirs plus ou moins indurés qui peut être interprétée comme une zone de passage entre la partie éluviale (E) lors des phases de réduction et la partie plus riche en oxydes de fer correspondant au BTgd.

Les zones BTgd contiennent de nombreux signes d'hydromorphie : taches et zones rouille, concrétions ferromanganiques noires. A partir de 100 cm environ de profondeur, la taille et l'abondance des nodules ferro-manganiques augmentent (1 à 3 mm, peu indurés). La concentration en argile augmente notablement dans la partie inférieure de l'horizon.

Horizon II M cr2 (175-210 cm) :

idem profil 1 mais entièrement décarbonaté. Il présente dans sa partie supérieure quelques digitations de zones blanchies (E) en continuité des glosses de l'horizon sus-jacent.

Horizon III Argile à meulière :

Le fond de fosse permet d'observer les 20 premiers centimètres du substratum d'argile à meulière. On constate alors un niveau majoritairement composé d'argile bariolée (passées ocre, gris, jaune) associées à de nombreux cailloux de meulière teintés d'ocre-rouille. Contrairement au profil 1, le niveau observable est totalement décarbonaté.

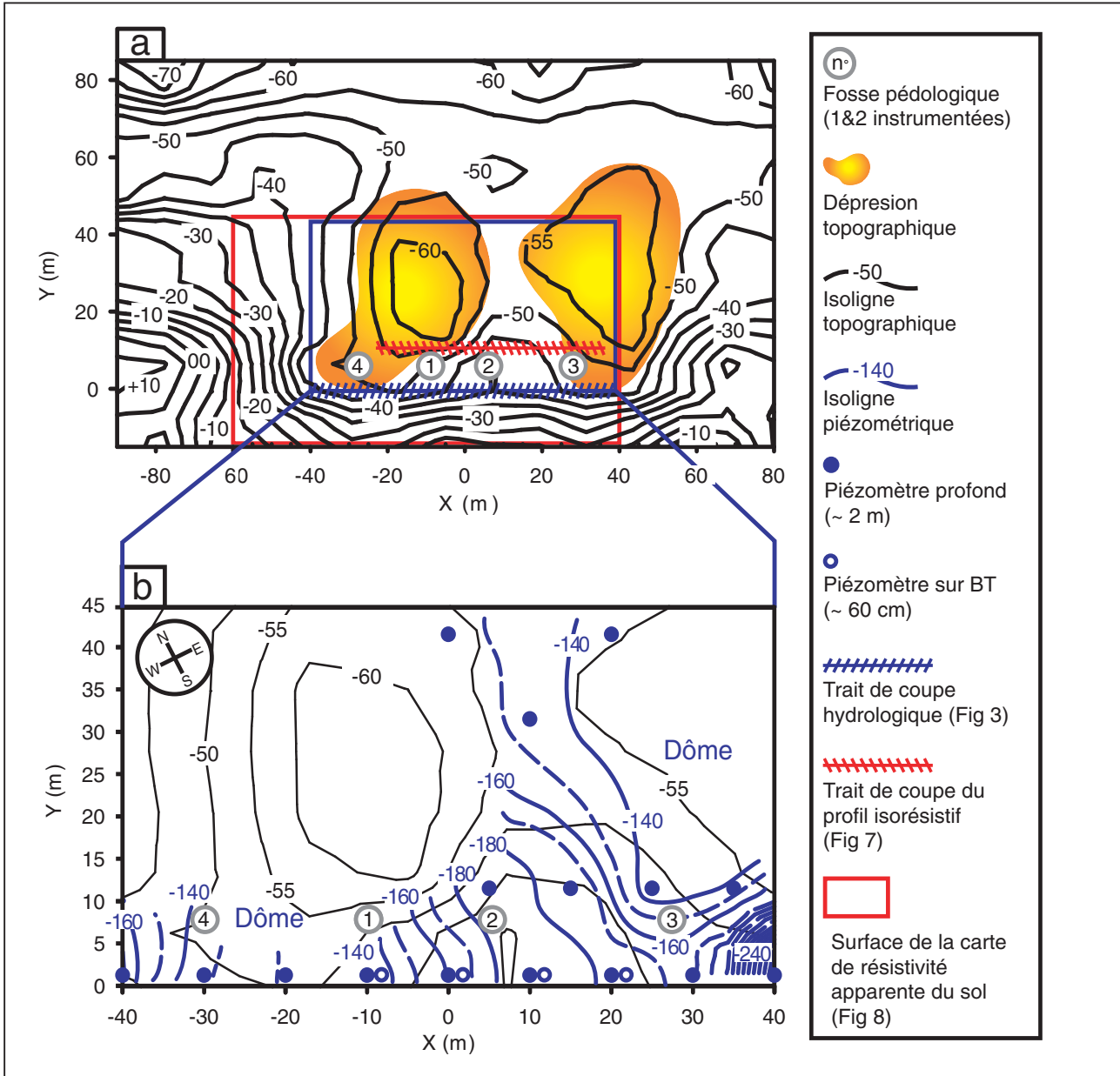
ANNEXE 2

| Fosse n | Profondeur Échantillonnage (cm) | Horizon pédologique | Granulométrie 5 fractions (sans décarbonatation) | | | | | Matières Organiques (g/Kg) | Carbone organique (g/kg) | Azote organique (g/kg) | C/N | pH Eau | CEC (Meison) (cmol-H/kg) | Fer total (HF) (g/100g) | Manganèse Total (HF) (mg/kg) |
|------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------|--------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| | | | % Argile (<2µm) | % Limon fin (2/20µm) | % Limon grossier (20/50µm) | % Sable fin (50/200µm) | % Sable grossier (200/2000µm) | | | | | | | | |
| 1 | 0-30 | Labour LE | 17,0 | 26,9 | 49,5 | 5,8 | 0,8 | 17,50 | 10,16 | 1,08 | 9,41 | 6,5 | 8,7 | 1,92 | 536,4 |
| 1 | 30-38 | Semelle | 18,0 | 26,9 | 49,1 | 5,3 | 0,7 | 13,70 | 7,97 | 0,90 | 8,86 | 6,8 | 8,8 | 1,97 | 548,9 |
| 1 | 42-52 | BTg cn 1 | 29,7 | 24,1 | 41,5 | 4,1 | 0,6 | 6,50 | 3,79 | 0,53 | 7,15 | 6,9 | 12,5 | 3,24 | 635,3 |
| 1 | 75-90 | BTg cn 2 | 27,5 | 21,6 | 47,0 | 3,4 | 0,5 | 3,60 | 2,08 | 0,35 | 5,94 | 7,3 | 12,0 | 3,23 | 467,1 |
| 1 | 115-130 | BTg cn / C | 28,0 | 24,9 | 42,3 | 3,7 | 1,1 | 3,00 | 1,73 | 0,26 | 6,65 | 7,6 | 12,8 | 3,39 | 633,3 |
| 1 | 150-160 | II M cr 1 | 27,2 | 26,6 | 37,8 | 6,5 | 1,9 | 3,10 | 1,78 | 0,24 | 7,42 | 8,4 | 12,5 | 3,03 | 455,5 |
| 1 | 175-190 | II M cr 2 | 38,5 | 20,3 | 29,6 | 7,3 | 4,3 | 1,60 | 0,95 | 0,21 | 4,52 | 8,4 | 18,3 | 4,05 | 444,5 |
| 1 | 240-260 | III M | 43,7 | 19,7 | 26,0 | 7,7 | 2,9 | 0,50 | 0,28 | 0,17 | 1,65 | 8,4 | 21,1 | 4,11 | 144,7 |
| 2 | 28-35 | Semelle | 16,7 | 28,7 | 49,4 | 4,3 | 0,9 | 15,30 | 8,88 | 0,97 | 9,15 | 7,1 | 8,4 | 1,82 | 552,3 |
| 2 | 45-55 | BTg cn 1 | 32,8 | 25,5 | 38,4 | 3,3 | 0,0 | 3,60 | 2,07 | 0,38 | 5,45 | 7,5 | 13,8 | 3,36 | 455,9 |
| 2 | 75-85 | BTg cn 2 | 26,0 | 20,9 | 51,6 | 1,5 | 0,0 | 3,00 | 1,73 | 0,31 | 5,58 | 7,7 | 11,2 | 2,90 | 357,9 |
| 2 | 115-125 | BTg cn / C | 24,0 | 25,7 | 47,1 | 2,7 | 0,5 | 2,70 | 1,56 | 0,28 | 5,57 | 7,8 | 11,0 | 2,90 | 667,3 |
| 2 | 145-155 | II M cr 2 | 27,6 | 27,2 | 35,8 | 5,3 | 4,1 | 2,60 | 1,52 | 0,24 | 6,33 | 8,5 | 12,9 | 3,19 | 431,2 |
| 2 | 175-185 | II M cr 2 | 37,5 | 22,3 | 28,3 | 5,8 | 6,1 | 1,90 | 1,12 | 0,21 | 5,33 | 8,6 | 17,0 | 3,81 | 354,2 |
| 3 | 35-45 | Ea + Eg | 15,7 | 28,4 | 50,1 | 5,1 | 0,7 | 6,80 | 3,96 | 0,50 | 7,92 | 6,9 | 6,7 | 1,64 | 436,3 |
| 3 | 65-75 | Eg + BTgd | 17,1 | 27,8 | 49,5 | 4,8 | 0,8 | 5,10 | 2,98 | 0,41 | 7,27 | 7,2 | 6,6 | 1,77 | 467,8 |
| 3 | 100-120 | Eg + BTgd | 21,5 | 26,3 | 46,6 | 5,0 | 0,6 | 2,70 | 1,57 | 0,27 | 5,81 | 7,5 | 9,1 | 2,28 | 575,0 |
| 3 | 145-155 | Eg + BTgd | 21,3 | 26,5 | 46,7 | 4,9 | 0,6 | 2,10 | 1,21 | 0,22 | 5,50 | 7,6 | 9,2 | 2,15 | 562,5 |
| 3 | 175-185 | II M cr 2 | 46,7 | 18,3 | 23,1 | 7,3 | 4,6 | 2,40 | 1,42 | 0,22 | 6,45 | 7,7 | 22,1 | 4,49 | 366,2 |
| 3 | 70-80 | Glosse | 14,5 | 28,2 | 51,1 | 5,3 | 0,9 | 4,90 | 2,86 | 0,36 | 7,94 | 7,1 | 5,9 | 1,48 | 357,1 |
| 3 | 70-80 | BTgd | 18,4 | 27,9 | 47,8 | 4,5 | 1,4 | 3,60 | 2,07 | 0,31 | 6,68 | 7,3 | 7,6 | 2,10 | 696,9 |
| 4 | 40-50 | Ea | 18,2 | 29,2 | 47,2 | 4,9 | 0,5 | 6,90 | 4,00 | 0,55 | 7,27 | 7,6 | 7,1 | 1,69 | 334,9 |
| 4 | 60-70 | Eg | 17,2 | 28,6 | 48,9 | 4,8 | 0,5 | 4,30 | 2,51 | 0,37 | 6,78 | 7,2 | 6,3 | 1,73 | 364,8 |
| 4 | 80-90 | Eg + BTgd | 18,8 | 26,2 | 46,4 | 5,1 | 3,5 | 3,20 | 1,87 | 0,32 | 5,84 | 7,3 | 8,0 | 2,52 | 929,5 |
| 4 | 105-120 | Eg + BTgd | 23,0 | 24,7 | 47,7 | 4,0 | 0,6 | 2,80 | 1,62 | 0,27 | 6,00 | 7,5 | 10,0 | 2,54 | 724,8 |
| 4 | 130-140 | II M cr 2 | 44,1 | 19,0 | 27,5 | 5,9 | 3,5 | 2,80 | 1,63 | 0,24 | 6,79 | 7,7 | 20,5 | 4,46 | 522,7 |

$$\text{Risque de battance : } R = \frac{(1,5 \text{ "Limon fin"} + 0,75 \text{ "Limon grossier"})}{(\text{"Argile"} + 10 \text{ "Matières Organiques"})} = 2,2$$

Planche 1 - Cartographie de la parcelle. (a) Carte topographique en valeurs d'altitudes relatives (cm), (b) Carte piézométrique (20/02/01) sur fond topographique en valeurs d'altitudes relatives (cm).

Planche 1 - Field plot cartography. (a) Topographic map (relative altitude in cm), (b) Piezometric map (20/02/01) and topographic map (relative altitude in cm).



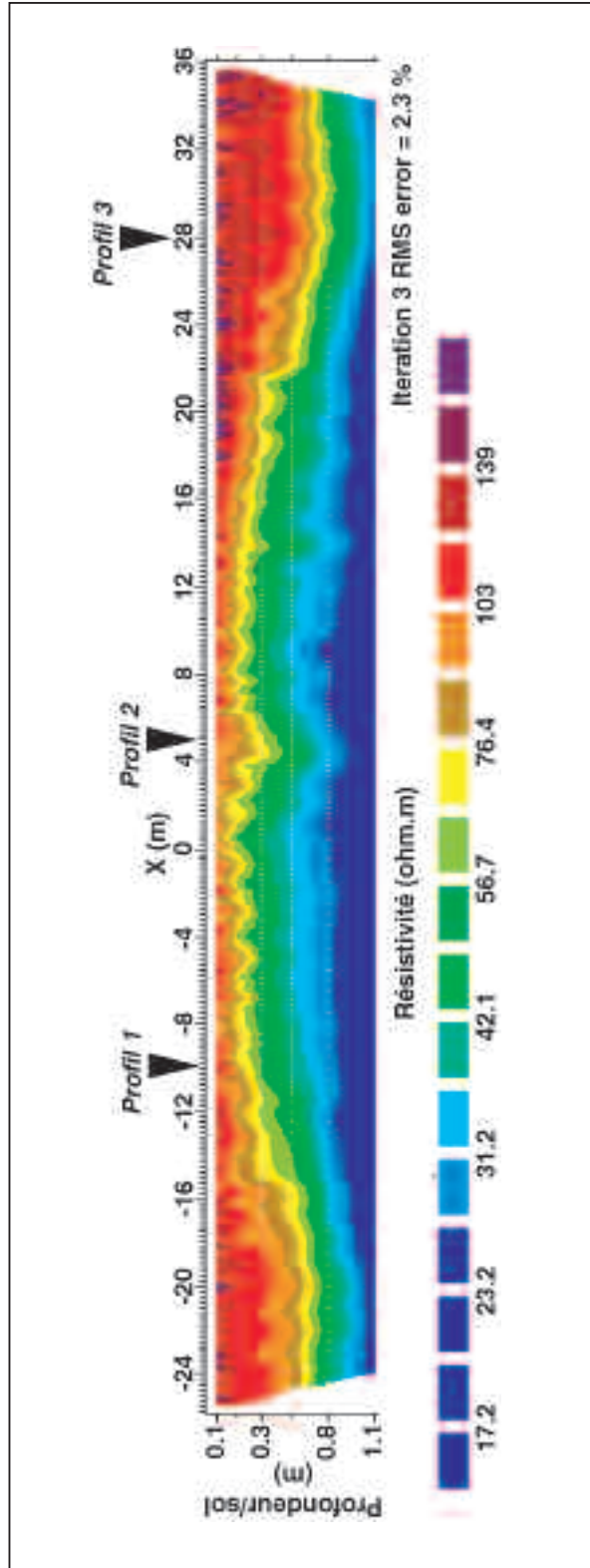


Planche 2 - Transect isorésistif mesuré le 18/02/02. Méthode Wenner (32 électrodes, espacement unitaire : 0.25 m). Modèle d'inversion numérique Res2dinv.

Planche 2 - Resistivity section measured on 18/02/02. Wenner method (32 electrodes, spacing unit : 0.25 m). Inversion model Res2dinv.