

Étude de Vertisols à gilgai du Nord-Caucase :

mécanismes de différenciation et aspects pédogéochimiques

Irina Kovda ⁽¹⁾, E. Morgun ⁽²⁾ et D. Tessier ⁽³⁾

(1) Institut de Géographie, 29 Staromonetny, 109017 Moscou, Russie

(2) Institut de Pédologie et de Photosynthèse, 142292 Pushchino, Région de Moscou, Russie

(3) INRA, Science du Sol, route de St Cyr, 78026 Versailles, France

RÉSUMÉ

Dans le sud de la Russie, près de Stavropol, des Vertisols à gilgai ont été étudiés. A l'échelle d'environ trois mètres, une séquence de sol a été mise en évidence. Elle fait apparaître l'importance primordiale du gilgai dans le régime hydrique des sols. Une accumulation d'eau se produit dans la zone dépressionnaire ce qui contribue au maintien d'une forte humidité. En revanche, une nette dessiccation apparaît dans la zone sommitale. Dans la zone intermédiaire, à mi pente, le sol possède une structure verticale fortement développée avec des faces de glissement très bien individualisées. La séquence de sols semble fonctionner actuellement comme un système clos sans que des transferts géochimiques se produisent verticalement entre les sols et la roche mère et latéralement à une échelle supérieure à celle de la séquence. A l'intérieur de la séquence en revanche, on observe des transferts géochimiques importants depuis la dépression jusqu'à la microbutte. Les carbonates sont concentrés dans la zone sommitale et concourent à un affaiblissement des propriétés verticales. Sur la pente, la présence de Na conjuguée à des variations hydriques importantes assure le maintien de la structure typique des Vertisols. Dans la partie basse, l'appauvrissement en cations alcalins et alcalino-terreux et la permanence d'un milieu humide ne permettent pas à la structure verticale de bien s'exprimer. En outre, une ségrégation des oxydes de fer est observée en relation avec l'hydromorphie du sol.

Au total la micro-séquence de sol étudiée présente des tendances d'évolution qui conduisent apparemment à de grands types de sols cités en référence par les pédologues russes (chernoziom verticale, Vertisol et sol hydromorphe à caractère verticale). Par rapport aux toposéquences habituellement décrites dans la littérature, il faut noter l'importance des transferts géochimiques profonds d'aval en amont, ce qui est à l'opposé des transferts latéraux superficiels.

Mots clés

Vertisol, gilgai, pédogenèse, structure du sol, toposéquence

SUMMARY

VERTISOLS WITH GILGAI OF THE NORTH CAUCASUS. DIFFERENTIATION MECHANISMS AND GEOCHEMICAL ASPECTS.

Vertisols with a typical gilgai relief were investigated in southern Russia near Stavropol (figure 1). In this area, a small sequence, of about three meters wide, is typical of the soil development. The results (figure 2) showed the primary importance of the gilgai in the soil

water regime. Water could be accumulated in the lower part of the gilgai relief (depression) and contributed to maintaining a permanent high moisture (figure 3 et 4). By contrast, a relative aridity appeared on the micro-elevation. Study of the intermediate zone, i.e. the slope, showed the best vertic structure of the sequence with well developed slikside features.

The sequence appeared as a closed system without any geochemical vertical or lateral transfer. Inside the sequence, large geochemical transfers could be observed from the depression to the micro-elevation (figure 7, table 1). Carbonates were concentrated in the microelevation (figure 9). They weakened the vertic properties. On the slope, the large variations in the water content together with the presence of Na as an exchangeable cation contributed to developing the typical vertic features. The vertic structure was slightly expressed in the micro-depression because of the loss of alkaline and earth cations and the permanent wet conditions. Furthermore, a segregation of iron oxides was also observed in relation with reducing conditions (table 2).

This work showed that, on a sequence of only few meters, three soils could be identified. They were similar to those described in the Russian classification, i.e. vertic chernozom, Vertisol and wet soil with vertic properties. In contrast to conventional studies, it should be noticed that deep geochemical fluxes were oriented from the depression to the top of the sequence, that is in the opposite direction to that of surface lateral fluxes.

Key-words

Vertisol, gilgai, pedogenesis, soil structure, toposequence

RESUMEN

LOS VERTISOLES CON GILGAÏ DEL NORTE DEL CAUCASIA : MECANISMO DE DIFERENCIACIÓN Y ASPECTOS PEDOGEOQUÍMICOS

En el sur de Rusia, cerca de Stavropol, se estudió Vertisoles con gilgai. A la escala de tres metros aproximadamente, una secuencia de suelos se describió. Hace aparecer la fuerte importancia del gilgai en el regimen hídrico de los suelos. Una acumulación de agua se produce en la zona baja, lo que contribuye al mantenimiento de una fuerte humedad. Al contrario, una relativa aridez aparece en la zona alta. En la zona intermediara, a la mitad de la pendiente, el suelo tiene una estructura vértica fuertemente desarrollada con caras de deslizamiento muy individualizadas. La secuencia de suelo funciona actualmente como un sistema cerrado sin que transferencias geoquímicas se producen verticalmente y lateralmente al exterior de la secuencia. Al contrario, en el interior de la secuencia se observa importantes transferencias geoquímicas desde la depresión hasta el microcerro. Los carbonatos están concentrados en la zona alta y concurren a una atenuación de las propiedades vérticas. En la pendiente, la presencia de Na conjugada a importantes variaciones hídricas asegura el mantenimiento de la estructura típica de los Vertisoles. En la parte baja, el empobrecimiento en cationes alcalinos y alcalinotérreos y la permanencia de un medio húmedo no permiten la fuerte expresión de la estructura vértica. Además, se observo una segregación de los óxidos de hierro en relación con el hidromorfismo del suelo.

En total la microsecuencia de suelo estudiada presenta tendencias evolutivas que llegan a la individuación de grandes tipos de suelos citados en referencia por los pedólogos rusos (chernozium vértico, Vertisol y suelo húmedo con carácter vértico). En comparación con las toposecuencias habitualmente descritas en la literatura, hay que notar la importancia de las transferencias desde río abajo hacia río arriba, lo que es opuesto a transferencias laterales y superficiales.

Palabras claves

Vertisol, gilgai, pedogénesis, estructura del suelo, toposecuencia.

Les Vertisols ont été largement étudiés et un certain nombre de monographies sur leur environnement, leur morphologie et leurs propriétés a été publié (Dudal, 1965 ; Thompson and Beckmann, 1982 ; Ahmad, 1983 ; McGarity et al., 1984 ; Wilding and Puentes, 1988 ; Samoylova, 1990). Le trait le plus distinctif des Vertisols est évidemment la présence de slickensides. Les travaux sur le sujet font souvent référence à une horization "cyclique" plus ou moins importante. Dans ce cas, l'intrusion du matériau inférieur dans le matériel supérieur est la règle. Suivant les sols, on peut observer une sorte de "rotation" des horizons. En outre, la présence d'un microrelief à l'échelle de plusieurs mètres, généralement appelé "gilgai" peut être observée. Selon la classification américaine, le terme Vertisol peut être utilisé dès lors que des faces de glissement sont présentes (Comerma et al., 1988). L'horization cyclique et la présence de gilgai n'est donc pas obligatoire. Il n'en reste pas moins que le rôle du gilgai dans le développement des sols, notamment au plan de leur morphologie, de leur fonctionnement et in fine de leur évolution à long terme, figure parmi les questions les plus actuelles sur la genèse et l'évolution des Vertisols. Pour la formation du gilgai les hypothèses généralement invoquées sont la pédoturbation induite par l'apport de matériau de surface dans les fissures profondes et par le régime hydrique spécifique de ces sols du à la présence de fissures (Wilding et Tessier, 1988 ; Paton, 1974 ; Edelman et Brinkeman, 1962).

En ce qui concerne l'étude des séquences vertisoliques et de leur variabilité latérale, les études se sont principalement focalisées sur la morphologie des termes extrêmes des séquences à savoir les sols au niveau des buttes et des dépressions (Bouzigues et al., 1992). Dans les travaux récents, l'étude de la microvariabilité latérale a montré tout l'intérêt d'étudier aussi la zone intermédiaire, la pente, à mi chemin entre la butte et la dépression (Wilding et al., 1990 ; Kovda et al., 1992). Il est apparu en effet que chacune des zones concernées possède une individualité propre. Ceci concerne principalement la zone intermédiaire qui est spécialement le siège de processus spécifiques, généralement mal identifiés au sein de la couverture pédologique.

L'identification des gilgaïs, l'existence de pédoturbations importantes posent la question de leur formation et de leur renouvellement dans le temps. En effet, suivant les cas, le gilgai peut être encore présent sans qu'il s'agisse véritablement d'un processus actuel. Certaines réponses quant à la formation, la permanence et la différenciation des Vertisols à gilgai peuvent être fournies lors de l'examen détaillé de la structure et des propriétés physiques des sols. L'étude de la redistribution des sels

et des carbonates, mais aussi de l'augmentation de l'âge des matières organiques peuvent aussi contribuer à répondre à cette question (Blokhuis, 1982 ; Southard et Graham, 1992 ; Arai et al., 1996)

Le but principal de cet article est de préciser le rôle du relief gilgai dans la différenciation des propriétés et des processus pédo-géochimiques de Vertisols du Nord-Caucase. Nous tenterons de montrer le rôle possible des pédoturbations sur l'homogénéisation et la différenciation des sols. Un accent particulier sera mis sur les changements intervenant dans la pédogenèse en fonction de la position du profil par rapport au gilgai.

SITE D'ÉTUDE ET MÉTHODES

Le site étudié est situé au Sud de la Russie, dans le Nord-Caucase à 44° 38' de latitude nord et 42° 15' de longitude est (figure 1). Les Vertisols se sont développés sur des argiles marines. Fait presque unique, on peut trouver dans la région de Stavropol dans le sud de la Russie, des Vertisols avec le relief caractéristique à gilgai. Les Vertisols dont il est question se forment sur des terrasses d'érosion orientées nord-est. Les travaux cartographiques ont montré que la roche mère est de composition très homogène et que la séquence étudiée est représentative des Vertisols à gilgai de cette région.

Les sols étudiés se trouvent à l'altitude de 470 m. Le climat régional est de type continental tempéré. La température moyenne de juillet est de 22°C et celle de janvier de -3.5°C. La pluviométrie annuelle moyenne est de 450-500 mm avec une concentration des précipitations en été. Le site présente une végétation naturelle de steppe fortement

Figure 1 - Position du site étudié dans le Nord-Caucase, Russie (v). Les points indiquent la localisation des gilgaïs en Europe d'après F. Verger (1994).

Figure 1 - Location of the site in North Caucasus, Russia (n). The points give the gilgai location in Europe according to F. Verger (1994)



diversifiée en fonction de sa position par rapport au gilgai. Sur la butte et les versants la végétation est herbacée à base de graminées caractéristiques de la steppe : *calmagrostis epigeios*, *elitrigia repens*, *festuca*, *poa compressa*, *medicago*, *betonica*, *hieracium* en particulier. Sur les buttes on trouve en outre *artemisia*, *limonium*, *filipendula* et *achillea*. Dans la dépression et sur la pente, la végétation comprend des espèces se développant en milieu humide : *carex* et *juncus* alors que dans la zone marécageuse on a en outre *lythrum salicaria* et *polygonum*. Au printemps, après le dégel, les dépressions et la partie basse des microversants sont submergés par une lame d'eau de 20 à 25 cm. Cependant il faut creuser à plus de 10 m de profondeur pour atteindre la nappe phréatique.

Le microrelief, que nous dénommerons gilgai, est de forme arrondie avec parfois une tendance à l'allongement des buttes. L'amplitude verticale du relief est 30-50 cm et sa périodicité, de la dépression à la butte, est d'environ 3 m. Le gilgai se compose de trois éléments bien exprimés : la butte, le versant et la dépression (figure 2).

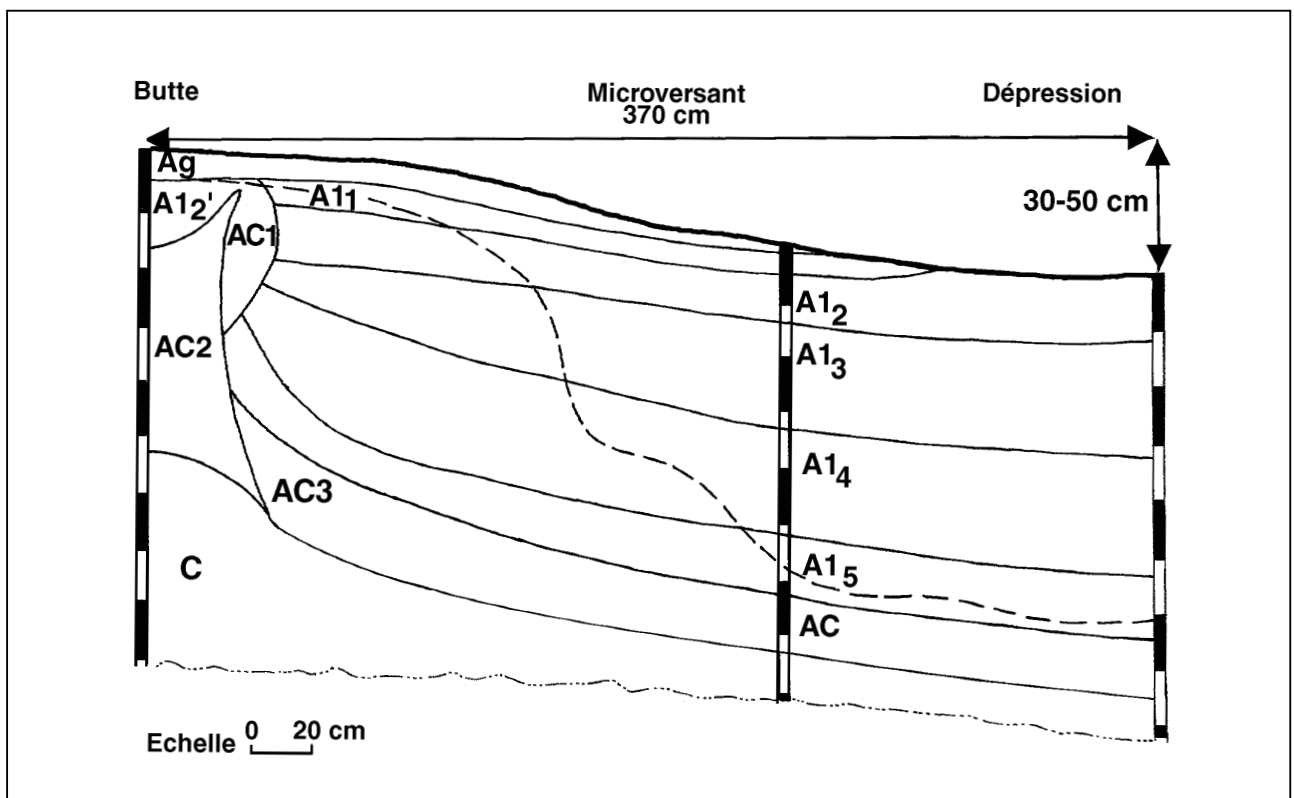
Une tranchée a été creusée afin d'étudier les changements des propriétés morphologiques et physico-chimiques des

Vertisols le long de la microséquence. Seulement trois profils, correspondant à la butte, au versant et la dépression seront décrits ici. La description morphologique a été faite en fin d'été (août - début septembre) et en période sèche. Les mesures de pH et d'Eh, ainsi que la collecte des solutions ont été réalisées au printemps juste après la fonte des neiges et en fin d'été au moment où le sol est le plus sec.

Les pH et Eh ont été mesurés au moment du prélèvement à un rapport masse d'eau sur masse de sol 1/1 (pH) et à l'humidité du sol en place (Eh). La solution du sol du sol a été extraite à partir d'agrégats frais provenant de chaque horizon ($\phi < 5$ mm), placés dans une colonne de 1,5 m de long et de 3,5 cm de diamètre. Pour extraire la solution on fait percoler de l'éthanol et on dose ensuite les éléments en solution (Komarova, 1956). La masse volumique sèche et la teneur en eau pondérale ont été mesurées sur des cylindres de 100 cm³ et après chauffage à 105°C pendant 48 heures.

Les analyses granulométriques ont été effectuées à la pipette ou après tamisage à sec. Le carbone organique a été dosé par oxydation de l'humus avec de l'acide chromique (Kononova, 1961). Les cations échangeables ont été déterminés à partir d'une méthode adaptée à l'étude des sols

Figure 2 - Représentation schématique de la séquence ; (- - -) est la limite supérieure des carbonates par réaction à HCl).
Figure 2 - Schematic representation of the sequence. ; (- - -) is the effervescence boundary for the HCl reaction.



salés et développée par Molodtsov et Ignatova (1975). Le CO_2 des carbonates a été dosé par acidimétrie (Arinuchkina, 1970). L'étude des formes du fer a été faite en utilisant les méthodes citrate-bicarbonate-dithionite (CBD) selon Mehra et Jackson (1960) et d'extraction à l'oxalate (Tamm, 1922). L'analyse de l'orientation des pores a été effectuée pour les tailles supérieures à $0,05 \text{ mm}^2$ à partir de lames minces à l'aide d'un appareil Megiscan-2.

RÉSULTATS

Morphologie des sols

Nous ne présenterons pas ici une description exhaustive de la morphologie des sols car ceci figure en détail dans d'autres travaux (Kovda et al., 1992 et 1995).

Les profils étudiés présentent certaines ressemblances mais ils se différencient avant tout en fonction de leur position le long de la microséquence :

- La couleur des sols est globalement gris foncé à tendance presque noire. Cependant, au niveau de la dépression (0-20 cm), mais aussi de l'horizon superficiel du micro versant (0-10 cm), la couleur devient un peu plus brune. Ceci correspond à la zone submergée du printemps. Dans l'ensemble, on peut noter une grande épaisseur des horizons humifiés (110-150 cm). Au niveau de la butte, la présence de matériau de

couleur plus claire est observée et on peut voir que l'horizon inférieur remonte jusqu'à 15 cm de la surface (figure 2). Il faut noter que la partie centrale de la zone d'intrusion est aussi la plus claire et la moins humifiée et qu'elle contient la plus forte teneur en carbonates. Au contraire, au niveau de la dépression, le sol est plus noir et présente un caractère un peu tourbeux en surface.

- Les mesures physiques indiquent que du printemps à l'été l'humidité change avec la profondeur et aussi latéralement (figure 3 a et b). Le sol de la dépression est le plus humide et le moins dense. En fin d'été, la masse volumique sèche est comprise entre $1,27$ à $1,46 \text{ g/cm}^3$, sauf dans la dépression où l'horizon organique atteint seulement $0,86 \text{ g/cm}^3$ (figure 4). Nous avons noté que la densité apparente varie peu en fonction de la saison au niveau de la dépression alors que les changements de densité sont plus importants au niveau de la butte et surtout de la pente. Ceci va de pair avec l'évolution de la structure. La présence de faces de glissements et de zones fortement structurées sont observées dès 20 à 30 cm de profondeur. Elles sont particulièrement nettes dans le sol du versant et à moyenne profondeur, c'est à dire entre 50 et 140 cm de profondeur.

- L'expression de la structure est aussi liée au microrelief et à la profondeur. La plus grande différence est observée dans les 50 premiers cm. Au niveau de la dépression, les agrégats sont d'assez petite taille (2×3 à $3 \times 4 \text{ cm}$) et relativement peu compacts. On observe aussi que leur faciès est lamellaire et

Figure 3 - Teneur en eau pondérale des sols au printemps (a) et en été (b).

Figure 3 - Water content (g/gx100) of the soils in spring (a) and in summer (b)

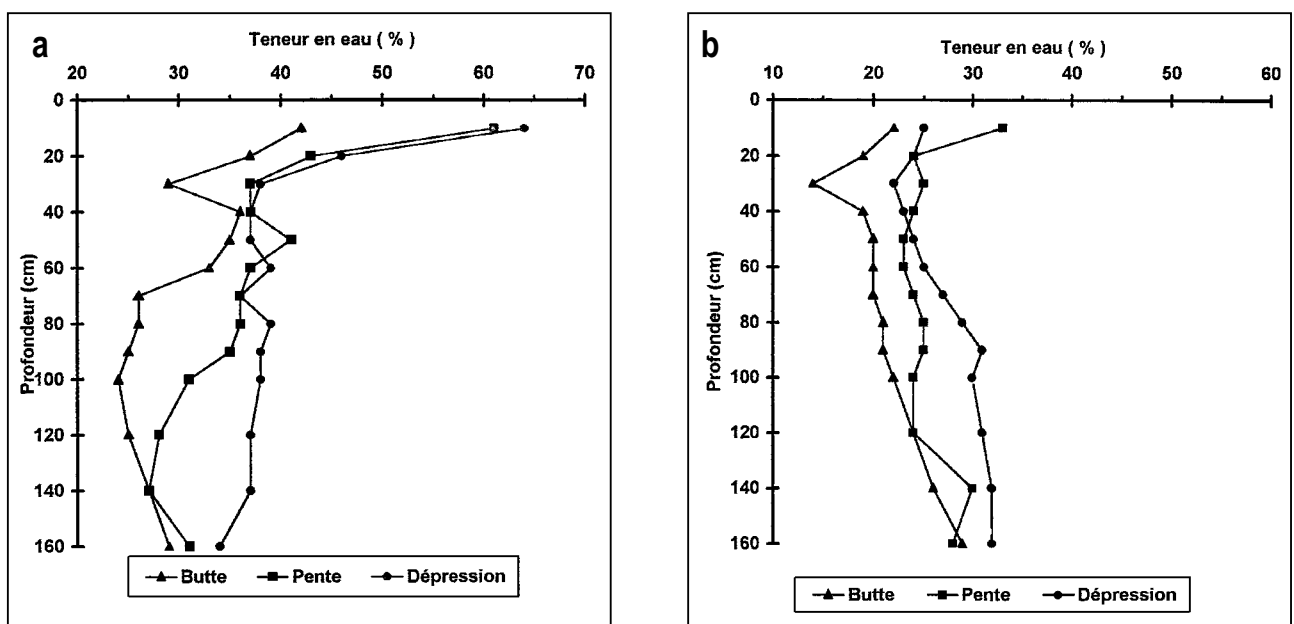


Figure 4 - Masse volumique apparente sèche des sols en été.

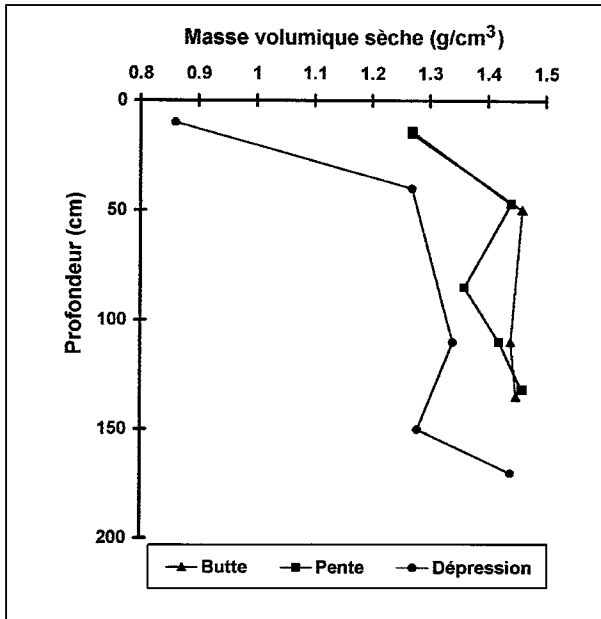
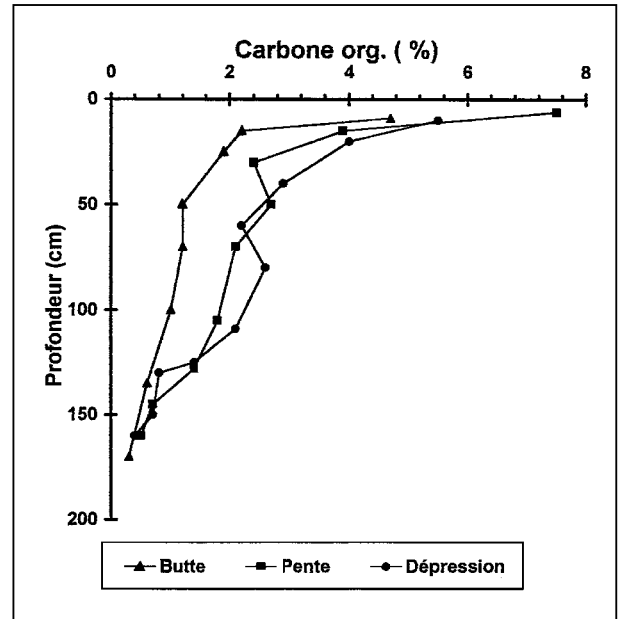


Figure 5 - Teneur en carbone organique des sols.
Figure 5 - Organic carbon content of the soils.



orienté subhorizontalement. A l'opposé, au niveau de la butte, des prismes (5x5 cm) denses et relativement durs sont observés. Cependant, c'est au niveau du versant que la taille des prismes est la plus grande et leur dureté la plus forte en été.

En profondeur, la couleur des trois profils est assez uniforme, du bleuâtre au jaunâtre. La structure verticale est la mieux exprimée au niveau du versant et elle se distingue par la présence de d'éléments structuraux obliques. Au delà de 120-140 cm, la structure n'est plus aussi bien visible. La profondeur et la taille des fissures dépend de leur position dans la micro-séquence. Les fissures atteignent 150 cm de profondeur au niveau de la butte et du versant, mais seulement 60-75 cm dans la dépression. Leur largeur passe de moins 0.5 cm sur la butte à 1 cm environ sur micro versant.

- L'étude des lames minces a permis d'obtenir des informations sur la forme, la taille et l'origine des pores dans les premiers 40 cm. L'orientation des pores est surtout horizontale dans la dépression et la butte (37 et 42 % respectivement). Les pores sont à tendance verticale et oblique (38-40 et 32-36 % respectivement) au niveau du versant.

- Les Vertisols étudiés sont très riches en nodules ferriques de diverses couleurs, formes et dimensions visibles essentiellement au niveau de la dépression et du versant. Six types différents ont été identifiés :

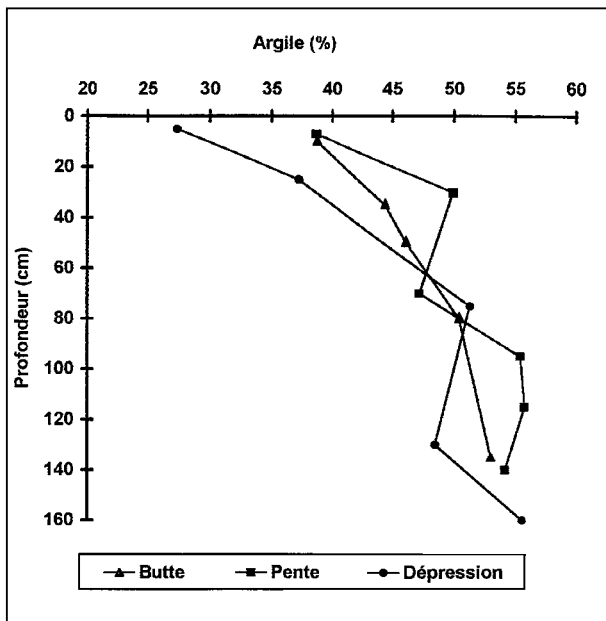
- en revêtements d'agrégats,

- sous la forme de nodules sphériques ($\phi = 0,5-3$ mm),
- en accumulations poreuses et non indurées de couleur ocre à tendance rouille ($\phi = 2-5$ mm) ;
- en accumulations brunes sur les racines ;
- sous la forme de nodules anguleux couleur paille ($\phi = 0,55$ mm),
- en nodules et accumulations rouges ($\phi = 0,5-3$ mm).

La distribution des différentes formes du fer est étroitement liée à l'évolution latérale et à la présence du gilgai (Kovda et al., 1995). Un parallèle peut être fait entre l'expression des oxydes du fer et la présence d'un excès d'eau temporaire dans la dépression ainsi que sur la pente comme cela a été exposé auparavant.

- Les profils se distinguent aussi en fonction de la distribution des carbonates. Ils sont présents sous la forme d'efflorescences, d'accumulations très friables jaunâtre-blanches ou grisâtre-blanches, de nodules durs et de taches claires. Les plus grandes concentrations et diversités des carbonates se trouvent en position sommitale, c'est à dire là où le matériau de profondeur remonte vers la surface. Le sol de la dépression est presque dépourvu de carbonates et ces derniers sont absents au-dessus de 90 cm. Il faut atteindre 100-110 cm dans la dépression, 30-70 cm dans le micro versant pour que l'effervescence à l'acide chlorhydrique se produise. De la pente en allant vers le sommet de la butte le niveau carbonaté atteint progressivement la surface (figure 2).

Figure 6 - Distribution de la fraction < 1 µm dans les sols.
 Figure 6 - Clay fraction (< 1 µm) distribution in the soils.



L'étude des isotopes stables du carbone et de l'oxygène a permis de distinguer les carbonates du climat antérieur, chaud et humide, de ceux formés sous climat actuel (Ryskov, et al., 1995). Il a ainsi été montré que les carbonates des sols sont d'origine pédogénétique.

Propriétés physiques et chimiques

Le teneur et la distribution de la matière organique varient verticalement et latéralement. L'humification est partout assez profonde (1 % de carbone organique à 120 cm). Cependant, au niveau de la butte, le sol est moins humifié, tandis que dans la dépression la teneur en carbone organique est plus importante (figure 5).

La composition granulométrique des sols est à tendance limoneuse dans l'horizon 0-20 cm et argileuse en profondeur (jusqu'à 55 % pour la fraction < 1 µm). La quantité d'argile dans l'horizon supérieur est de 38 % pour la butte et le versant (figure 6). Elle est seulement de 27 % dans la dépression. La somme des cations échangeables varie dans le même sens. Elle est comprise entre 27 et 47 Cmol. kg⁻¹ de la dépression à la microbutte. En profondeur, elle peut atteindre 62 méq/100 g (figure 7).

Les argiles se composent de kaolinite, illite et surtout des smectites. Les minéraux interstratifiés illite-smectite sont caractéristiques de ce type de roche mère argileuse du paléogène-néogène.

- La figure 8 indique que le pH suit un gradient vertical et latéral. Le pH augmente avec profondeur et la valeur maximale est atteinte dans la partie médiane du profil au niveau de la butte. Les fortes proportions du Mg et Na échangeables dans la partie inférieure des profils sont conformes à la composition de la roche mère riche en sels (figure 7). Par ailleurs, on note aussi une forte teneur en potassium dans la zone de dépression, jusqu'à 8,1 % contre 3,7 % au niveau de la butte.

Figure 7 -Distribution des cations échangeables dans les trois profils : (a) butte ; (b) pente et (c) dépression.
 Figure 7 - Exchangeable cation distribution in the three profiles : (a) mound, (b) slope, and (c) depression.

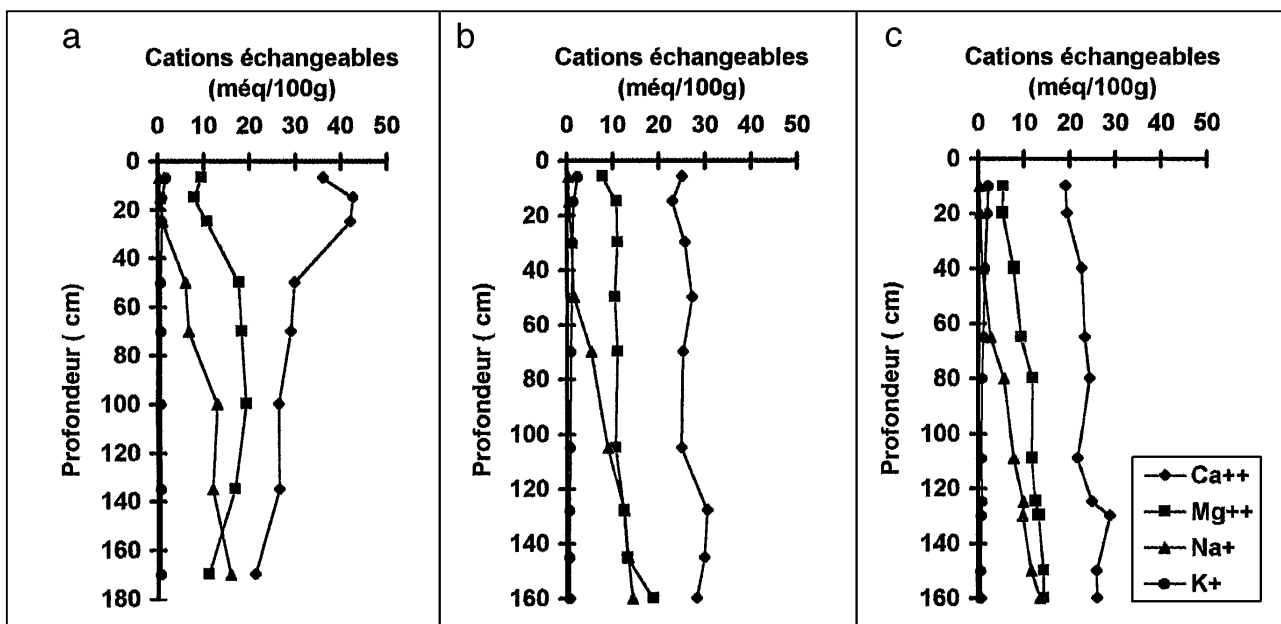


Figure 8 - Valeurs du pH et évolution avec la profondeur pour les trois profils.

Figure 8 - pH values and their variations with depth in the three profiles

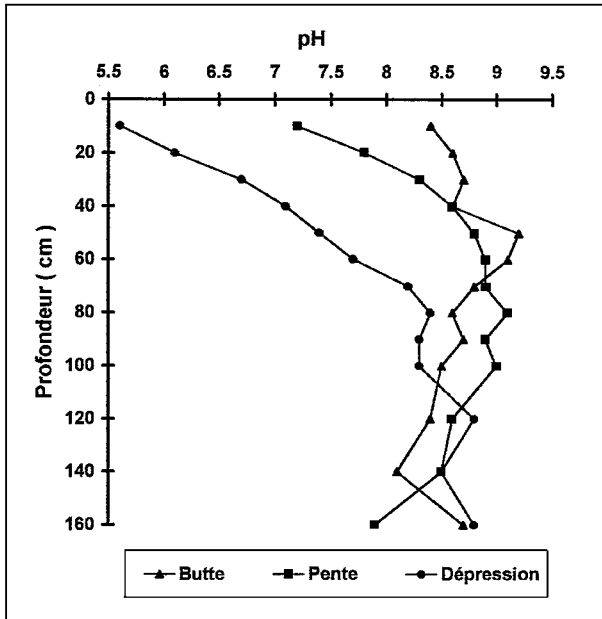
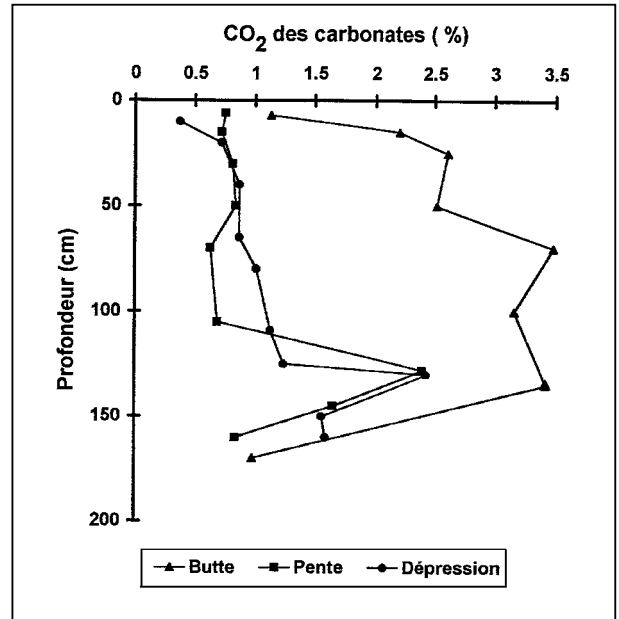


Figure 9 - Teneur en CO₂ des carbonates dans les trois profils.

Figure 9 - CO₂ contents of carbonates in the three profiles



Les analyses indiquent la présence de Si, Al et Fe solubles au niveau de la dépression en plus forte proportion que dans les autres parties de la microséquence (tableau 1). Un processus de dissolution des constituants dans la dépression et d'apport latéral spécifique vers les autres parties de la séquence semble donc se produire.

D'un autre côté, les études de dissolutions sélectives permettent de distinguer les horizons riches en fer extractible à l'oxalate, c'est à dire les horizons affectés par l'hydromorphie, des autres horizons (tableau. 2). La teneur en fer CBD est pratiquement identique d'un profil à l'autre et en fonction de la profondeur. Il en est de même du fer total.

L'étude des carbonates indique que leur teneur globale est faible (figure 9). Il existe cependant un gradient latéral mais aussi vertical. Les plus fortes teneurs se trouvent au niveau de la microbutte ce qui confirme les descriptions des profils. En parallèle, la concentration en chlorures évolue verticalement et surtout latéralement. Une concentration élevée est observée dans les horizons profonds et d'aval en amont. Cette distribution reflète l'intensité du processus éluvial dans les diverses parties de la microséquence.

DISCUSSION

Elle portera sur la genèse des sols et la mise en évidence des processus qui ont conduits à leur différenciation.

Origine des sols

Les sols se sont développés sur des argiles marines à forte teneur en smectites. La présence de smectite dans le matériau parental n'est cependant pas suffisante à elle seule pour que la structure verticale puisse s'exprimer. Il est nécessaire que des cycles de dessiccation-humectation à l'origine de variations de volume interviennent. La variation de volume doit être suffisante pour entraîner la fissuration (dessiccation), mais surtout la rupture du sol en compression (plan de cisaillement lors du gonflement) (Tessier et al., 1992).

Le matériau géologique parental sur lequel s'est développé le sol possède globalement les caractéristiques des horizons profonds (Pakchomov et Monuchko, 1988). Ces derniers seront considérés ici comme la référence à partir de laquelle le sol s'est développé. Le matériau profond se distingue par une forte densité apparente, des teneurs en Mg et Na échangeables élevées avec une certaine salinité. Sous l'influence de conditions climatiques correspondant à celle de la Russie du sud, un gonflement important a pu, dans le passé, s'exprimer entraînant la formation du Vertisol initial. On peut concevoir qu'à l'origine les sols de cette séquence

étaient relativement identiques au plan de leur constitution et de leurs propriétés.

Aujourd'hui, on assiste à une différenciation importante des sols le long de la séquence, et ce, à la fois verticalement et horizontalement. Cette évolution concerne le régime hydrique, le statut organique, mais surtout l'environnement géochimique incluant la dynamique des cations alcalins et alcalino-terreux et celle des oxydes de fer.

Dynamique de l'eau et relief

Une bonne partie des propriétés hydrauliques des sols apparaît largement conditionnée par le relief à l'échelle de la séquence. De toute évidence, le relief conditionne la redistribution de l'eau provenant des précipitations (neige et pluie). Au printemps, lorsque la neige fond, l'eau s'accumule dans les parties basses de la séquence. Il est à noter que le sol est alors encore gelé ce qui contribue à l'accumulation d'eau dans le bas fond. Ensuite, le sol de la dépression conserve une grande humidité même en période d'évaporation intense

(figure 3). Le sol de la butte est en revanche toujours relativement sec. C'est le sol de versant qui présente le comportement le plus contrasté : il sèche très fortement en été par évaporation directe mais aussi du fait de la végétation. Au printemps, sous l'effet de la submersion, le sol peut se réhumecter au maximum.

Les conséquences sur la structure apparaissent les suivantes :

- Sur la pente, le matériau argileux (~50 % d'argile) peut exprimer au mieux ses propriétés de gonflement-retrait car les variations de teneur en eau sont fortes. C'est donc à ce niveau que la structure verticale est la plus développée.

En position sommitale en revanche, une bonne partie de l'eau ruisselle en surface et le sol ne peut se réhumecter complètement au printemps. La butte correspond donc à un milieu relativement sec et la structure verticale ne peut s'exprimer aussi bien que sur la pente.

- Dans les microdépressions, là où le sol est en permanence à une humidité élevée, les variations hydriques restent trop

Tableau 1 - Composition de la solution extraite du sol au printemps et en été

Table 1 - Solution composition of the soils in spring and in summer

Profil	Profondeur cm	Total g/l	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄ méq/l	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe mg/l	Si
			→	→	→	→	→	→	→	→	←	→	→
butte	Printemps												
	0-30	1.1	2.0	7.6	2.0	4.0	1.4	2.0	0.021	12.2	0.05	0.02	3.8
	30-90	2.3	1.4	6.8	17.0	10.2	2.0	3.0	0.013	30.4	0.05	0.11	2.4
	120-160	16.0	-	2.4	134.0	119.9	14.6	41.6	0.072	200.0	0.1	0.8	2.2
pente	0-40	0.8	0.2	6.0	3.4	2.0	2.0	2.2	0.005	7.4	0.1	0.01	3.5
	50-90	2.4	0.8	7.0	16.0	11.7	2.6	2.0	0.008	30.9	0.1	0.02	2.1
	120-160	17.1	-	2.0	156.0	118.8	18.8	49.2	0.079	208.7	0.15	1.0	2.0
dépre.	eau*	0.1	-	0.80	1.0	0.2	0.5	0.9	0.29	0.3	9.5	7.6	8.8
	0-40	0.4	0.2	2.0	2.5	1.1	2.2	0.4	0.149	3.0	1.7	0.1	10.0
	50-90	0.9	0.2	2.0	5.0	6.5	1.6	0.8	0.018	11.3	2.0	0.05	3.9
	120-160	6.4	0.2	3.2	5.0	83.5	9.0	9.0	0.036	73.9	<0.05	0.04	2.0
butte	Eté												
	0-30	1.3	1.0	8.5	5.0	3.9	5.5	5.5	0.04	7.4	0.05	<0.04	2.6
	50-90	5.4	1.5	11.5	50.0	22.6	6.5	13.8	0.03	65.2	0.05	0.08	1.6
	120-160	16.4	-	5.0	150.0	114.0	25.0	70.0	0.07	173.9	0.15	0.8	1.6
pente	0-30	2.0	-	5.0	17.4	10.1	15.0	10.0	0.11	7.4	0.1	0.08	4.4
	50-90	2.9	0.5	10.5	25.0	7.9	4.0	6.0	0.015	33.9	0.1	0.1	4.1
	120-160	17.5	-	4.0	200.0	86.7	49.0	46.0	0.087	195.6	0.2	1.2	3.0
dépre.	0-30	4.0	-	0.5	5.0	54.6	28.0	17.0	1.24	13.9	<0.05	0.6	12.2
	50-90	2.2	0.5	9.0	15.0	8.7	3.0	4.5	0.021	25.6	0.05	0.1	1.5
	120-160	7.9	1.0	8.5	75.0	40.5	13.5	11.5	0.038	100.0	0.05	1.0	14.4

* : eau en excès présente dans la dépression.

Tableau 2 - Teneurs et formes du fer dans les sols

Table 2 - Content and form of iron in the soils

Profil	Profondeur cm	Fe total %	Fe CBD %	Fe Ox %	Susceptibilité Magnétique (10 ³ m ² kg ⁻¹)
butte	0-7/9	4.4	1.15	0.48	65
	7/9-25	5.0	1.17	0.40	59
	40-50	4.8	0.64	0.28	64
	50-70	4.6	0.91	0.40	56
	70-100	4.6	0.96	0.44	63
	112-135	5.0	1.01	0.36	42
pente	150-170	5.4	1.65	0.36	50
	0-1/6	3.8	0.75	0.84	47
	Fe zone	4.6	0.87	0.80	868
	9/15-25/30	4.6	1.12	0.68	56
	25/30-50	4.6	1.28	0.68	59
	50-70	4.8	1.12	0.64	90
depression	70-105	4.6	0.96	0.52	83
	128-145	5.2	1.49	0.36	40
	145-160	5.4	1.55	0.28	40
	0-10	3.8	0.96	1.08	123
	Fe zone	4.6	0.87	1.28	732
	10-20	4.0	0.80	1.28	93
	20-40	4.2	0.96	0.88	105
	40-65	4.2	0.40	0.96	85
	80-109	4.8	0.47	0.60	99
	125-130	4.6	1.13	0.40	39
	150-160	5.0	1.60	0.32	29

faibles pour que la structure verticale puisse apparaître clairement. Ceci vient notamment du fait que l'argile ne peut se rétracter suffisamment et donc structurer le sol.

Au total, on peut donc dire que la structure verticale la mieux développée correspond à un régime hydrique particulier où les propriétés de gonflement et de retrait peuvent s'exprimer au maximum. Tout excès de sécheresse ou d'humidité concourt à un affaiblissement de la structure verticale. Dans ces conditions, la permanence de la structure verticale dans le temps et la différenciation des profils à l'échelle de quelques mètres apparaissent essentiellement dépendantes de l'existence du relief gilgai.

Redistribution des ions et structuration géochimique

La différenciation pédogénétique des sols à gilgai s'explique également par différents processus géochimiques. Suivant la division traditionnelle, une toposéquence peut présenter trois zones

(Glazovskaya, 1964) :

- une zone d'éluviation, en général la partie sommitale de la séquence,
- une zone de transit sur le versant et,
- une zone d'accumulation, le bas fond.

Nos observations ont montré que les horizons inférieurs des sols étudiés sont peu affectés par les processus pédogénétiques. Nous considérerons donc qu'ils sont représentatifs du développement initial du sol. En fonction de ce qui précède, il apparaît que le raisonnement habituel sur les toposéquences ne peut être appliqué à l'échelle de cette microséquence à gilgai. L'étude des sols révèle en effet des processus exactement opposés en fonction de la topographie. Il apparaît ainsi un appauvrissement du sol en Ca et Na dans la dépression et une accumulation relative de Ca sous la forme de CaCO₃ sur le sommet. Le sodium se concentre sous la forme de NaCl en position de pente. On peut donc dire que la zone de pente constitue une zone de transit particulièrement importante pour les ions.

En ce qui concerne les sels, leur mobilité dépend largement de la structure des sols. Dans un matériau argileux à base de smectites il apparaît que les discontinuités submacroscopiques à macroscopiques c'est à dire les fissures, les slickensides et les discontinuités d'origine biologique peuvent assurer un transfert rapide des solutés, aussi bien verticalement que latéralement.

Compte tenu de l'accumulation d'eau dans la dépression en fin de période hivernale, la circulation et la concentration des solutions sont alors principalement latérales, c'est à dire de la dépression vers le sommet.

Ceci indique que le gilgai tend à induire un système géochimique structuré qui a des répercussions sur l'évolution à long terme des sols. Tout d'abord, compte tenu des caractéristiques du matériau parental (forte teneur en argile, densité apparente élevée, ~ 2.0 g/cm³), il est probable que la couverture pédologique considérée fonctionne en milieu fermé. Autrement dit, le transfert des solutés vers les horizons profonds, au delà de 160-180 cm, doit être faible. Ceci a été vérifié par ailleurs avec des mesures isotopiques ((Kovda et al., 1995). Jusqu'à 120 cm, la composition isotopique du soufre δ34S est de -3.1 à + 0.7‰ Cette valeur correspond à la composition des précipitations atmosphériques. Au-dessous de 120-160 cm, la composition isotopique du soufre δ34S est de -14.5 à -4.6‰, c'est à dire celle des dépôts marins. Nous considérerons donc que la migration des produits d'altération vers la profondeur est extrêmement faible

et que la séquence fonctionne en milieu fermé au sein de la couverture pédologique. En revanche, des transferts géochimiques latéraux et verticaux se produisent entre horizons avec des zones d'éluviation, de transition et d'accumulation. Les différences de pH et les variations de concentrations en carbonates par rapport aux horizons profonds et au sein de la séquence témoignent de la durée des phénomènes.

Pour expliquer cette structure géochimique, le premier facteur à considérer est là encore le microrelief. En effet, la condition d'existence des gradients géochimiques réside dans la présence de gilgai qui permet l'accumulation de l'eau dans la dépression au moment de la fonte de la neige. Ainsi le gilgai est-il à l'origine de flux d'eau latéraux qui eux-mêmes induisent des transferts géochimiques latéraux conduisant à la structure géochimique particulière de ces sols.

Pour que ce système se mette en place, il a probablement été nécessaire qu'une stabilisation du microrelief se produise dans le passé, après la formation des Vertisols initiaux, entraînant un affaiblissement des pédoturbations. A cet effet, le climat aurait pu devenir moins humide et à saisons moins contrastées que dans la période antérieure. Si tel est le cas, le changement volumique à l'intérieur du sol n'aurait plus été suffisant pour conduire à la formation d'un nouveau gilgai, même si une certaine homogénéisation verticale a pu se produire.

Redistribution et formes du fer

Le fer est un des éléments les plus mobiles dans les sols dès lors que de phénomènes de réduction sont mis en jeu. Ceci est confirmé dans la zone inondée par des mesures de potentiel rédox. Par exemple la valeur du potentiel rédox peut s'abaisser jusqu'à 220 mV au printemps dans l'horizon superficiel de la dépression. Les valeurs atteintes sont suffisamment basses pour engendrer avec certitude la présence temporaire d'une forte teneur en fer ferreux. Compte tenu de l'organisation du sol dans les horizons inférieurs, on peut vérifier que les phénomènes de migration, concentration et ségrégation du fer sont importants dans la zone submergée. En revanche, au niveau de la butte, les oxydes de fer sont moins visibles. Dans ce cas, le mécanisme de la stabilisation des formes du fer est certainement déterminé par la présence de carbonates et la prédominance des conditions d'oxydation.

Si l'individualisation du fer dans les profils est marquée dans les parties inondées, les analyses indiquent que la teneur globale en fer reste presque identique. Comme dans les autres horizons on ne peut mettre en évidence de concentrations, nous considérons que la migration du fer, quel que soit l'horizon, se fait à courte distance, c'est à dire essentiellement d'une réorganisation très locale à l'intérieur des horizons.

L'identification des formes du fer n'est pas sans poser quelques questions. Ils sont difficilement identifiables en diffraction des rayons X. Une information sur les processus peut être obtenue en comparant les résultats des tests de dissolu-

tion au Citrate-Bicarbonate-Dithionite (CBD) et à l'oxalate. Dans la dépression, la quantité extraite à l'oxalate dépasse celle du CBD, alors que dans les horizons non affectés par l'hydromorphie elle est largement inférieure. Ce résultat a été vérifié sur l'ensemble des horizons affectés par l'hydromorphie. Le haut rapport Feo/Fed indique la possibilité de la présence du ferrihydrite. Les conditions existant dans ces horizons correspondent bien à celles de la littérature (Schwertmann et Taylor, 1989). Nous avons aussi noté que dans certains horizons, surtout dans la dépression et même localement, le fer présente une susceptibilité magnétique tout à fait particulière par ces hautes valeurs, ce qui suggère la présence d'oxydes à forte activité magnétique. Cette haute susceptibilité magnétique n'a pas été mise en évidence dans le matériau géologique parental, ni dans les horizons profonds des sols. Nous concluons que la présence d'oxydes de fer de haute susceptibilité magnétique a certainement pour origine un phénomène pédologique, alors qu'habituellement on considère que ce genre de minéral se forme seulement à haute température. En tenant en compte des données de Maher et Taylor (1988) nous admettons que de la magnétite d'origine pédogénétique se forme localement dans ces horizons.

CONCLUSIONS

L'étude du Vertisol à gilgai du Nord-Caucase a révélé la présence d'une microséquence pédologique comportant une grande partie des processus qui peuvent être identifiés dans les sols des régions tempérées et des régions arides. Il est à noter qu'à l'échelle de quelques mètres on peut observer les trois grands tendances d'évolutions citées en référence par les pédologues russes, à savoir le chernoziom en position sommitale (présence de carbonates et structure), le Vertisol sur la pente et le sol hydromorphe dans la dépression. Par rapport au Référentiel Pédologique (1995) l'ensemble de la séquence est du type lithovertisol. Le sol en position sommitale évolue en paravertisol et probablement, à plus long terme, vers le chernovertisol. Le sol de la dépression évolue vers le paravertisol et le phaeosol. Le sol de la pente quant à lui demeure un véritable Vertisol.

Ce qui précède indique que la séquence a évolué en deux étapes. Le microrelief est en fait l'héritage d'un pédogénèse initiale avec une forte pédoturbation. Actuellement le microrelief est en partie fossilisé. Ceci provient du fait que les phénomènes de gonflement-retrait sont limités à la fois pour des raisons de différenciation hydrique et géochimique dans la partie haute et basse de la séquence. Seule la zone de pente est encore fonctionnelle en tant que Vertisol car elle conserve une forte activité de gonflement.

A l'échelle de la séquence, la différenciation des horizons est toutefois fondamentalement différente de ce qu'elle peut

être dans des toposéquences classiques. Cela provient du fait que la séquence fonctionne au sein de la couverture pédologique comme un système en milieu fermé verticalement par rapport au substrat géologique et latéralement si l'on considère une échelle plus large que celle de la séquence. En revanche, à l'intérieur de la séquence, des transferts géochimiques latéraux se font à l'échelle de la séquence. L'originalité est ici que les transferts géochimiques se produisent essentiellement de l'aval (la dépression) vers l'amont (la butte). Cela est rendu possible grâce aux conditions climatiques et à la présence du relief de type gilgai.

La séquence de sol dont il est question semble donc à un stade d'évolution où progressivement la dépression perd peu à peu une partie de son argile et de ses cations alcalins et alcalino-terreux, mobilise ses oxydes de fer et tend vers une acidification de plus en plus poussée. La zone sommitale en revanche concentre préférentiellement les carbonates. Les oxydes de fer sont mobilisés plus localement et s'individualisent au sein de la dépression.

Pour conclure on peut donc dire que la micro-séquence étudiée diffère grandement du point de vue de ses processus d'évolution d'une toposéquence à plus grande échelle où les différences d'altitude entre le sommet et la base de la séquence sont autrement plus importants. La toposéquence fonctionne alors comme un milieu largement ouvert avec des gradients géochimiques d'amont en aval.

BIBLIOGRAPHIE

- Arai S., Hatta T., Tanaka U., Hayamizu K., Kigoshi K., Ito O. 1996 - Characterization of the organic components of an alfisol and a Vertisol in adjacent locations in Indian semi-arid tropics using optical spectroscopy, ¹³C NMR spectroscopy and ¹⁴C dating. *Geoderma*, 69 : 59-70.
- Arinuchkina E. 1970 - Manuel des analyses chimiques des sols (en russe). Université de Moscou : 487 p.
- Blokhuys W.A. 1982 - Morphology and genesis of Vertisols. In : Vertisols and rice soils of the tropics. Proc. 12-th Int. Congr. Soil Sci. New Delhi, India : 23-47.
- Bouzigues R., Favrot J., Herrera J., Cid G. 1992 - Valeur diagnostique des caractères hydromorphes et halomorphes de Vertisols de la vallée du Cauto à Cuba. Application à l'évaluation des besoins en drainage agricole. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVII, 2 : 297-313.
- Comerma J.A., Williams D., Newman A. 1988 - Conceptual changes in the classification of Vertisols. In : Vertisols : their distribution, properties, classification and management. Technical Monograph n° 18. Eds. Wilding L. and Puentes R. Texas A and M University, College Station, Texas : 41-54.
- Dudal R. 1965 - Dark clay soils of the tropical and subtropical regions. Rome, FAO, 161p.
- Edelman C.H. and Brinkman R. 1962 - Physiography of gilgai soils. *Soil Sci.*, 94 : 366-370.
- Glazovskaya M.A. 1964 - Principes géochimiques de la typologie et de la méthodologie des études de paysages naturels (en russe). Edition de l'Université de Moscou : 230 p.
- Kononova M.M. 1961 - Soil organic matter : its nature, its role in soil formation and in soil fertility. Oxford.
- Kovda I., Morgun Ye., Alekseyeva T., 1992 - Development of gilgai soil cover in Central Ciscaucasia. *Eurasian Soil Sci.*, 24, 6 : 28-45.
- Kovda I., Morgoun E., Ryskov Ya ; 1995 - Analyse structurale et fonctionnelle du microcomplexe de sols a gilgai : propriétés morphologiques et dynamique de l'eau. *Pochvovedenye*. 11.
- Maher B.A. et Taylor R.M. 1988 - Formation of ultra-grained magnetite in soils. *Nature* 336 : 368-370.
- McGarity J.W., Houltz E.H., So H.B. (Eds) 1984 - The properties and utilization of cracking clay soils. *Rev. in rural sci.* n° 5. Univ. Of New England, Armidale, NSW, Australia.
- Mehra O.P. and Jackson M.L. 1960 - Iron oxide removal from soils by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*. 7-th Conf. : 317-327.
- Molodtsov V.A., Ignatova V.P. 1975 - Determination de la composition des cations changeables dans les sols salins (en russe). *Pochvovedenye*. 6 : 123-127.
- Paton T.R. 1974 - Origin and terminology for gilgai in Australia. *Geoderma*, 11, 3 : 47-62.
- Pakchomov S.I., Monuchko A.N. 1988 - Ingénierie et aspects géologiques du changement des propriétés des argiles (en russe). Moscou, Nauka : 119 p.
- Référentiel pédologique 1995 - INRA, Paris.
- Ryskov Ya., Mergel S., Kovda I. and Ye. Morgun, 1995 - Isotopes stables du carbone et de l'oxygène comme indicateurs des conditions de formation des carbonates dans les sols (en russe), *Pochvovedenye*, 4 : 405-414.
- Samoylova E.M. - Eds. 1990 - Sltozems et sols compactés (en russe). Edition Univ. de Moscou : 144 p.
- Schwertmann U. and R.M.Taylor 1989 - Iron oxides. J.B.Dixon and S.B.Weed (Eds). *Minerals in soil environments*. Second edition. Publ. by Soil Sci. Soc. of Am., Madison, Wisconsin, USA : 380-438.
- Southard R.J. and R.C.Graham, 1992 - Cesium-137 distribution in a California pelloxerent : evidence of pedoturbation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 : 202-207.
- Tamm O. 1922 - Um Bestfmning of de oorganiska komponenterna i markens gelkomplex. *Medd. statens skogsf-lanst (Swed.)* 19 : 385-404.
- Tessier D., Bouzigues R., Favrot J-C. et Valles V., 1992 - Influence du microrelief sur l'évolution texturale des argiles dans les sols lessivés de la vallée de la Garonne. *Différenciation des structures vertique ou prismatique*. C.R. Acad. Sci. Paris, 315 : série II, 1027-1032.
- Thompson C.H. and Beckmann G.G. 1982 - Gilgai in Australian black earths and some of its effects on plants. *Trop. Agric.*, 59 : 149-156.
- Verger F. 1994 - Un microrelief provoqué par l'alternance dessiccation/humification : les gilgais. *Sécheresse*, 5 : 211-217.
- Wilding L. and Puentes R. - Eds. 1988 - Vertisols : their distribution, properties, classification and management. Technical Monograph n° 18. Texas A and M University, College Station, Texas : 193 p.
- Wilding L., Tessier D. 1988 - Genesis of Vertisols : shrink-swell phenomena. In L.P.Wilding and R. Puentes (Eds), *Vertisols : their distribution, properties, classification and management*. Technical Monograph n° 18. Texas A and M University, College Station, Texas .
- Wilding L.P., Williams D., Miller W., Cook T. and H. Eswaran. 1990 - Close interval spatial variability of Vertisols : a case study in Texas. *Proceed. Sixth Int. Soil Correlation Meeting (VI ISCOM) : Characterization, Classification and Utilization of Cold Aridisols and Vertisols*. August 6-18, 1989. Ed. by J.M.Kimble. Soil conservation Services, Soil Management Support Services, USDA, p.232-247.