

LA PODZOLISATION SUR CALCAIRE DU SUBALPIN DU JURA

R. MICHALET et S. BRUCKERT *

RESUME

Par l'analyse des minéraux argileux et des complexes organo-minéraux, nous étudions l'action du climat subalpin sur la formation de sols spécialement sélectionnés dans ce but. Les résultats mettent en relief les relations qui unissent l'organisation pédo-lithologique, l'ambiance chimique calcique ou acide et les processus pédogénétiques d'altération et d'humification.

Un flux continu de Ca^{2+} , observé sur calcaire concassé, provoque la formation de sols humo-calciques à complexes organo-argiliques riches en humates de fer et de calcium. Un flux de Ca^{2+} entretenu par le seul jeu du cycle biologique à travers 15 à 30 cm de matériau alumino-silicaté, conduit à des sols bruns à complexes organo-argiliques de plus en plus riches en fulvates de fer et d'aluminium au fur et à mesure que le rapport Ca^{2+}/H^+ des ions échangeables baisse. Au-delà de 35 cm de matériau silicaté, le Ca^{2+} ne joue plus aucun rôle. Les fulvates de fer et d'aluminium se forment en abondance et acquièrent la mobilité caractéristique des sols bruns ocreux humifères soumis à la podzolisation commençante climatique.

INTRODUCTION

L'action du climat général sur la pédogenèse est difficile à étudier en montagne, en raison de la fréquence élevée des sites marqués par un facteur stationnel (pente, roche...). Le subalpin du Jura n'échappe pas à la règle. C'est pourquoi nous avons sélectionné, au cours d'une prospection détaillée du terrain, des sols placés dans des conditions telles que le climat puisse jouer un rôle supérieur à celui des autres facteurs écologiques (MOOR, 1951 ; FAVAGER, 1956 ; DUCHAUFOUR, 1966 ; PEDRO, 1968) :

- substratum à l'affleurement constitué de matériaux silicatés de la série alumineuse ;
- position topographique plane sommitale ;
- drainage vertical librement assuré ;
- durée de l'altération inférieure à 15 000 ans.

De ces quatre conditions, c'est certainement la première qui reste la plus délicate à satisfaire dans le Jura, en raison de la composition essentiellement calcaire des roches. En prospectant de façon systématique tous les sommets de l'étage subalpin, on trouve néanmoins deux situations qui permettent d'étudier des sols

* Laboratoire de Pédologie - Université de Franche-Comté, place Leclerc,
25030 BESANÇON Cédex.

formés aux dépens de matériaux silicatés suffisamment épais pour atténuer ou même supprimer l'interférence des bancs calcaires sous-jacents :

- sur dépôts allochtones limoneux tels que des limons éoliens mis en place au Wurm (POCHON, 1978) ;
- sur argiles et limons libérés rapidement par décarbonatation d'une roche renfermant assez d'impuretés silicatées (résidu insoluble supérieur à 5 %).

Nous analysons ces sols selon deux approches : l'étude des minéraux argileux d'une part, et la composition des fractions organiques et organo-minérales d'autre part. Nous les comparons à des sols brunifiés et calcimagnésiques situés au même étage subalpin.

On sait en effet que « *le climat jurassien favorise l'écoulement aux dépens de l'évaporation. Il est propice aux phénomènes de dissolution* » (AUBERT, 1969). « *Les conditions climatiques régnant sur les zones les plus élevées du Jura, favorables à la dissolution et à l'entraînement des carbonates, impliquent une pédogenèse selon la voie acide* » (BOULAINE, 1972).

Ces caractéristiques associées au seuil climatique de PEDRO (1968) et à la similitude des climats vosgiens et préalpins du nord permettent d'émettre l'hypothèse qu'une pédogenèse climatique peut être podzolisante, ou tout au moins à tendance podzolisante, à l'étage subalpin du Jura.

I. LES DONNEES REGIONALES

Les sols sélectionnés à partir d'une dizaine de stations proviennent des sommets suivants de la chaîne du Jura :

- un sol humo-calciq (37) au Crêt de la Neige (1 723 m) ;
- un sol brun eutrophe (30) au Chasseral (1 610 m) ;
- un sol brun mésotrophe (39) au Récullet (1 720 m) ;
- un sol brun oligotrophe (61) au Mont d'Or (1 463 m).

L'étage subalpin du Jura est soumis à un climat froid et humide d'altitude, sous la dominance des influences atlantiques. D'après UTTINGER (1949), RICHARD (1961), le Reculet (1 720 m), le Crêt de la Neige (1 723 m) et le Mont Tendre (1 683 m) reçoivent plus de 2 000 mm de précipitations annuelles. Les précipitations dans le Haut-Jura sont comparables à celles des Hautes Chaumes des Vosges (CARBIENER, 1966) et à celles des Préalpes savoyardes (RICHARD, 1978).

Au Chasseron, la température moyenne annuelle est de 2,9°C. Par comparaison, sur les crêtes des Vosges, la moyenne annuelle est d'environ 4°C. Des écarts de température extrêmes dépassant 60°C ne sont pas exceptionnels.

Par un effet de crête dû à l'action de vents violents, la pessière de l'étage subalpin inférieur (OZENDA, 1966) est supprimée et remplacée directement par les pelouses de l'étage subalpin supérieur.

L'ensemble de la Haute Chaîne jurassienne est constitué de sédiments calcaires d'âge jurassique moyen et supérieur (Kimmeridgien et Séquanien).

Parmi les quatre sols analysés dans cette note, trois d'entre eux (30 au Chasseral, 37 au Crêt de la Neige et 61 au Mont d'Or) ont été choisis sur calcaire pur recouvert de limons éoliens et le quatrième (39 au Reculet) sur calcaire marneux (7 % de résidu insoluble).

Parmi les quatre sols présentés dans cet article, trois d'entre eux se développent sous pelouse, *Seslerio-Arctostaphyletum* pour l'humocalciq (37), *Seslerio-Caricetum* (30) pour le brun eutrophe et *Nardetum Jurassicum* (61) pour le brun oligotrophe. Le brun mésotrophe (39) est colonisé par une prairie (*Luzulo-Koelerietum* ; BEGUIN, 1970) qui comprend en mélange des espèces acidophiles du *Nardion* et quelques espèces du *Seslerion coeruleae*.

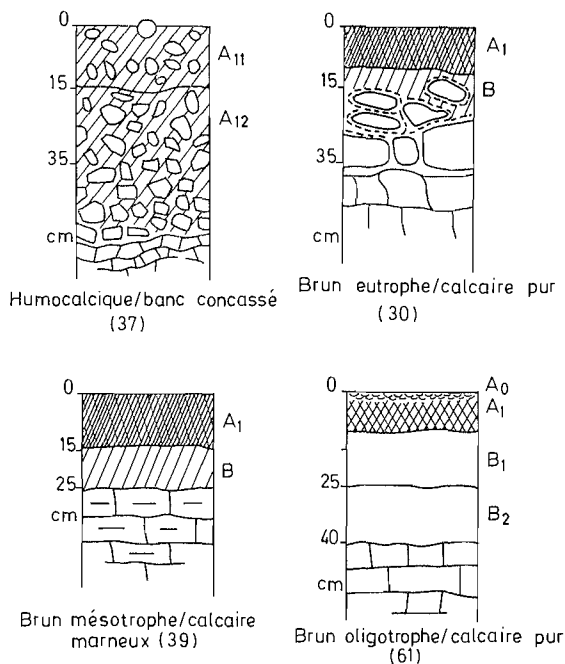
II. MATERIEL ET METHODES D'ETUDE

A) Caractéristiques des sols

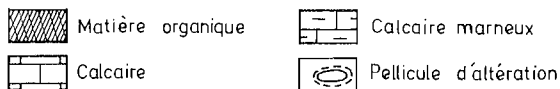
Quatre types de sol ont été choisis (fig. 1) :

— **SOL HUMO-CALCIQUE (37).** — Ce sol choisi en position plane sur calcaire pur fragmenté s'apparente aux sols humo-calciques d'éboulis décrits par BOTTNER (1971). Il renferme 75 % de cailloux calcaires, mais la terre fine ne contient pas de carbonates. L'ion calcium, par contre, sature le complexe argilo-humique. Le profil est de type A/C avec un horizon A très humifère (40 % de matière organique) dans lequel les substances humiques sont très abondantes et lui donnent une forte capacité d'échange cationique (70 m.e./100 g). Le pH est supérieur à 6 et le taux de fer libre de l'ordre de 20 %.

— **SOL BRUN EUTROPHE (30).** — Ce sol se développe en position sommitale de pente inférieure à 20° sur des bancs diaclasés de calcaire pur recouverts de limons éoliens ou des calcaires marneux. L'horizon (B) contient toujours de gros cailloux calcaires déchaussés par les diaclases. L'altération pelliculaire de ces cailloux libère une quantité de calcium suffisante pour saturer l'horizon (B). Seul l'horizon A₁, qui ne contient jamais de cailloux calcaires (sur 10 cm) est légèrement désaturé. La pédogenèse de ces sols est également influencée par le calcium : le pH est toujours supérieur à 6,6 en (B), l'horizon A₁ est très humifère (jusqu'à 30 %). Ce sol contient 2,8 % de fer libre et il n'y a pas de redistribution de cet élément.



LEGENDE



— SOL BRUN MESOTROPHE (39). — Ce sol se développe dans les mêmes conditions topographiques, mais toujours sur bancs marneux compacts. L'horizon (B) ne contient jamais de cailloux calcaires. L'alimentation en calcium est donc beaucoup moins importante que dans les sols bruns eutrophes, ce qui entraîne une acidification du profil qui est nette en A_1 (pH entre 5,2 et 5,6), modérée en (B) (pH entre 5,4 et 5,8). L'aluminium échangeable apparaît sur le complexe absorbant (0,25 à 1,7 méq/100 g en A_1). Enfin, on observe un début de redistribution du fer et de l'aluminium libres dont les valeurs sont toujours plus élevées en profondeur.

— SOL BRUN OLIGOTROPHE (61). — Ce sol est installé en position sommitale sur des bancs compacts recouverts de limons éoliens. Il ne contient pas de cailloux calcaires et son épaisseur atteint 35/40 cm. L'acidification est très marquée, surtout en surface (pH entre 4,6 et 4,8 en A_1). Le complexe absorbant est partiellement saturé par l'aluminium échangeable et on observe une migration du fer et de l'aluminium libres de A vers B.

B) Méthodes d'étude

1. Etude minéralogique aux rayons X

Le résidu insoluble des roches est obtenu par dissolution rapide du calcaire par HCl 4N à froid. Il est lavé à l'eau et centrifugé à 3 000 tours/minute pendant 5 minutes ; l'opération est répétée jusqu'à dispersion des argiles.

Par sédimentation et siphonage sont séparées les fractions 0-2 μ et 0-16 μ . La fraction inférieure à 2 μ subit une saturation monocationique Mg^{++} ou K^+ (500 mg à 1 g d'argiles dans 20 ml de $MgCl_2N$ ou $KCl N$) ; agitation par retournement pendant 1 heure, avec interruption de 5 minutes toutes les 10 minutes). Les argiles ainsi saturées sont ensuite lavées, remises en suspension et déposées sur lames de verre afin d'obtenir des préparations orientées (POCHON, 1978). Par la suite, les lames K et Mg subiront un traitement à l'éthylène-glycol. Les lames Mg seront chauffées à 250°C et 550°C.

Après avoir été séchés et tamisés, les horizons A et (B) des sols sont débarrassés de leur matière organique par un traitement à H_2O_2 20 vol. % à chaud (80°C). Les fractions 0-2 μ et 0-16 μ sont également séparées. En plus, et avant de subir les saturations K^+ et Mg^{++} , comme dans le cas des résidus insolubles des roches, les fractions inférieures à 2 μ des sols ont été soumises à un traitement au citrate de sodium [20 ml de citrate de sodium trisodique 1 N au bain-marie à 80°C pendant 1 heure, et ce deux fois avec lavage intermédiaire]. Ce traitement vise à nettoyer les argiles d'éventuels hydroxydes de fer et d'aluminium gênant l'expansion des minéraux gonflants à l'éthylène glycol et la fermeture des vermiculites au potassium et au chauffage (POCHON, 1978).

Les lames orientées ainsi préparées sont soumises à un rayonnement X (CuK) de 40 Kv et 18 mA. L'interprétation des diagrammes a été réalisée d'après les données de LUCAS et al. (1959), CAILLERE et HENIN (1965) et ROBERT et BARSCHAD (1972).

2. Analyse chimique des fractions argileuses des roches et des sols

Les analyses chimiques ont été exécutées selon la méthode proposée par JEANROY (1972) : fusion alcaline et dosage par absorption atomique.

3. Etude de la matière organique et des complexes organo-minéraux

La première partie de l'étude consiste en un fractionnement physique du sol (horizons A ou A_{12} et B) par tamisage, selon la méthode indiquée par BRUCKERT (1979). Cette méthode permet le fractionnement du sol en trois classes granulométriques :

- fraction fine : 0-50 μ ;
- fraction moyenne : 50-100 μ ;
- fraction grossière : 100-2 000 μ .

Le rapport du carbone de la matière organique humifiée (fraction fine avec ou sans la fraction moyenne selon les sols) au carbone total définit le taux d'humification.

La deuxième partie de l'étude consiste en un fractionnement chimique de la fraction fine des horizons (B) ou A₁₂. L'analyse par voie chimique des complexes organo-minéraux s'appuie sur l'action successive de solutions d'attaque alcaline « d'agressivité croissante » (BRUCKERT et al., 1975) :

- le tétraborate de sodium (0,1 N) ajusté à pH 9,7 par NaOH 0,1 N ;
- le pyrophosphate de sodium (0,1 M) à pH 9,8.

Le rapport du carbone extrait au carbone total détermine le taux d'extraction partiel pour chaque réactif, puis focalisé. La fraction du carbone qui reste inextractible après ces deux réactifs est appelée humine globale. Elle comprend l'humine héritée (VEDY, 1973 ; TOUTAIN, 1974), l'humine microbienne (GUCKERT, 1973) et l'humine organo-argilique (BRUCKERT et KILBERTUS, 1980) que nous n'avons pas séparées.

En ce qui concerne les complexes organo-minéraux, plusieurs paramètres permettent de les caractériser (BRUCKERT, 1979) :

- le calcul de la teneur en métal des composés organiques alcalino-solubles, exprimée par le rapport métal-carbone et représentant la charge métallique des complexes ;
- l'estimation du taux de mobilité des complexes donné par le rapport métal complexé au tétraborate/métal complexé au pyrophosphate ;
- le calcul de l'extractibilité relative du fer par rapport à l'aluminium donné par le rapport Fe/Al au tétraborate.

III. RESULTATS

A) Analyse des minéraux argileux et limoneux du résidu insoluble des roches

La fraction limoneuse renferme essentiellement du quartz, des feldspaths potassiques et un peu de kaolinite, que l'on soit sur calcaire marneux ou sur calcaire pur (tableau 1).

En ce qui concerne la fraction argileuse, l'illite et la kaolinite prédominent sur les autres phyllites. La chlorite est totalement absente. La smectite est présente en faible quantité dans 3 roches sur 4. Les interstratifiés 10-14 m ne sont abondants que dans le résidu des calcaires marneux (39).

B) Analyse des minéraux argileux et limoneux des sols

En ce qui concerne la fraction limoneuse, le sol brun mésotrophe (39) sur calcaire marneux se distingue nettement des trois autres profils (30, 37 et 61) sur calcaire pur (tableau 2) dans le premier, seul le quartz domine très largement le cortège minéral, alors que pour les sols 30, 37 et 61, les feldspaths potassiques, les plagioclases et surtout la chlorite sont très bien représentés à côté du quartz toujours abondant. C'est là le signe d'une importante pollution limoneuse d'origine éolienne sur calcaire pur (POCHON, 1978).

Dans la fraction argileuse, on retrouve le cortège des minéraux présents dans les résidus insolubles des roches et celui des limons éoliens décalés par la chlorite. Dans le sol humo-calcaïque, on note que l'illite est encore la phyllite la plus abon-

dante : elle prédomine notamment sur les argiles provenant de son altération comme la vermiculite et les interstratifiés 10-14 v. Dans les sols brunifiés, la proportion d'illite diminue d'autant plus que le milieu est plus acide (mésotrophe et surtout oligotrophe). La transformation se produit soit au profit de la vermiculite et des interstratifiés 10-14 v, soit au profit de la smectite et des interstratifiés 10-14 m : dans le premier cas, les sols 30 et 61, comme le 37, sont sur calcaire pur ; dans le second cas, le sol 39 est sur calcaire marneux. Il y aurait donc dans les calcaires du Haut-Jura deux sortes d'illites que nous caractériserons mieux plus loin par l'analyse chimique.

Parallèlement à l'altération croissante de l'illite, on constate une augmentation significative de l'agradation aluminifère, comme en témoignent les diagrammes rayons X des argiles prétraitées ou non au citrate.

C) Analyse chimique des fractions argileuses

Le résidu argileux des roches donne à l'analyse des rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ élevés à cause de la présence de quartz vraisemblablement (tableaux 3 et 4). Cela n'empêche cependant pas d'observer que le rapport obtenu avec les roches à *illites se transformant en smectites* (1) est légèrement supérieur à celui qui est noté avec les roches à *illites se transformant en vermiculites* (3,5 contre 3,2). La transformation de l'illite en smectite ou en vermiculite ne serait pas directement dépendante du mode de pédogenèse, mais plutôt liée à la structure de l'illite, plus précisément aux taux de substitution de l'aluminium dans les tétraèdres (ROBERT et BARSHAD, 1972). Les teneurs en fer et en magnésium sont faibles ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,10$). Il s'agit essentiellement d'illites dioctaédriques alumineuses à faible taux de substitution octaédrique.

L'analyse des argiles des sols donne lieu aux observations suivantes :

Dans le sol humocalcique, le rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ augmente très fortement ; le rapport $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ baisse dans les mêmes proportions. Cette nette augmentation du fer est due à l'apport éolien de chlorite primaire ferrifère et non magnésienne. Les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ restent stables, il n'y a ni mouvement de potassium, ni agradation aluminifère.

Dans le sol brun mésotrophe, le rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ est stable, il n'y a pas ou peu de chlorite ferrifère d'origine éolienne. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ baisse également, c'est le signe d'une agradation aluminifère.

Dans le sol oligotrophe, le rapport $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ baisse fortement, le potassium est solubilisé. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ baisse, il y a agradation aluminifère. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ augmente et $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ diminue, c'est toujours l'apport de chlorite ferrifère qui est en cause.

L'ensemble des analyses présentées ici et confirmées par d'autres résultats (MICHALET, 1982) permet de distinguer trois degrés dans l'altération des minéraux argileux des sols étudiés.

Le sol humo-calcique est le siège d'une hydrolyse neutre préservant assez bien la structure originelle de l'illite. Dans les sols bruns eutrophe et mésotrophe, l'illite est nettement attaquée : le potassium est fortement solubilisé et les minéraux de transformation (vermiculite ou smectite) subissent des phénomènes d'agradation aluminifère et sans doute ferrifère. Le processus est bien marqué dans le sol mésotrophe. Dans le sol brun oligotrophe, l'illite est fortement dégradée : l'aluminosiallisatation, signe d'une acidocomplexolyse limitée (PEDRO, 1979), se développe ici pleinement.

(1) Smectites de transformation au sens de ROBERT et BARSHAD (1972), POCHON (1978).

D) Analyse de la matière organique

Les taux d'humification ont été calculés en additionnant les pourcentages de carbone des fractions granulométriques inférieures à 100 μ ; leur observation à la loupe binoculaire montre en effet qu'elles sont constituées essentiellement d'agrégats argilo-humiques. Les résultats (tableaux 5 et 6) nous permettent de sélectionner les horizons A₁₂ et B qui renferment un pourcentage plus élevé de matière humifiée, dans le but de procéder aux extractions chimiques des composés humiques et des complexes organo-métalliques. Les valeurs obtenues partagent les sols en trois groupes :

- le sol humo-calcaïque qui se caractérise par un taux d'extraction global élevé (48,9 %), lié à l'efficacité du pyrophosphate fortement prépondérante sur celle du tétraborate ; corollairement, le taux d'humine est relativement bas (39,8 %) ;
- les sols bruns eutrophe et mésotrophe dans lesquels les taux d'extraction sont faibles (43,1 et 43,9 %) et les taux d'humine forts (53,7 et 52 %), par comparaison avec les autres sols ;
- le sol brun oligotrophe dont la matière humique est très extractible (60,2 %) et solubilisée avant tout par le tétraborate ; on note en contrepartie un taux d'humine bas (36,9 %).

L'efficacité solubilisatrice du pyrophosphate dans les trois premiers sols et du tétraborate dans le quatrième sont bien mis en évidence par le rapport C tétra/C pyro.

Quand on analyse les extraits, on constate que les acides humiques sont plus abondants dans les sols humo-calcaïques, bruns mésotrophes et bruns eutrophes, alors que les acides fulviques forment la majorité des composés obtenus à partir du sol oligotrophe.

E) Composition des complexes organominéraux

On a dosé les éléments Ca, Fe, Al dans les extraits tétraborate, puis pyrophosphate (tableaux 7 et 8). Le calcium obtenu avec le premier réactif correspond à une large fraction du calcium échangeable, déplacé ici par Na⁺. Les teneurs dosées, qui n'ont pas été portées dans le tableau 7, sont très élevées dans le sol humo-calcaïque et baissent très fortement avec l'augmentation d'acidité dans les sols bruns.

Le fer, qui s'associe aux composés humiques par liaison de coordination, se subdivise en deux formes complexées : l'une, mobile, est obtenue au tétraborate ; l'autre, stabilisée dans le sol, est extraite par le pyrophosphate. La différence de charge entre ces deux complexes est nette. Les complexes mobiles du fer sont dosés en très faible quantité dans le sol humo-calcaïque et les sols bruns eutrophe et mésotrophe. Par contre, ils augmentent très significativement dans le sol brun oligotrophe (0,44). Les complexes stables du fer sont abondants dans tous les sols étudiés, même dans le sol humo-calcaïque (2,16 ‰). Cependant, si l'on examine le rapport Fe/C des produits extraits, on se rend aisément compte que la charge métallique des complexes augmente de façon considérable du milieu calcaïque (33) au milieu le plus acide (760).

En ce qui concerne l'aluminium, on observe un comportement analogue à celui du fer. Les résultats sont cependant plus difficiles à interpréter, les quantités dosées provenant de trois formes, échangeable, complexée et libre.

Il est important de comparer le critère d'extractibilité relative du fer et de l'aluminium dans le tétraborate (BRUCKERT, 1979) : on peut constater que le rapport obtenu avec le sol brun oligotrophe augmente de façon très nette par comparaison avec les valeurs observées pour les autres sols.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les résultats (tableau 9) démontrent qu'il existe d'étroites relations entre l'organisation pédolithologique et les processus pédogénétiques d'altération et de complexation organo-minérale, le lien entre les deux étant l'ambiance chimique induite par l'intensité du flux de calcium ou de protons.

Lorsque les cailloux calcaires produisent, en se dissolvant, un flux continu et important de calcium, il se forme des sols à complexes organo-argilliques dominants à base d'acides humiques : il s'agit de sols humo-calcaïques à litho-dépendance très forte.

Lorsque les cailloux calcaires sont absents sur 15 cm (brun eutrophe) et jusqu'à 35 cm (brun mésotrophe), le flux de calcium passe par le cycle biologique : son intensité dépend alors de l'épaisseur de matériau silicaté recouvrant le banc calcaire. Il se constitue des sols bruns à complexes organo-argilliques partiellement saturés par le calcium et, selon le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^{+}$, les complexes restent encore dominés par les acides humiques ou renferment de plus en plus d'acides fulviques. Al^{3+} finit par occuper une place importante dans le cortège ionique du complexe adsorbant et le sol devient brun acide.

Quand l'épaisseur de matériau silicaté dépasse 35 cm, le calcium ne joue plus aucun rôle. L'acidification est très marquée et la formation de complexes organo-métalliques à base de fulvate de fer et d'aluminium devient dominante. La pédogenèse bascule dans la podzolisation qui progresse néanmoins de façon ménagée. La mobilisation du fer par rapport à l'aluminium étant modérée (Fe/Al tetra inférieur à 1) : il s'agit de sols bruns ocreux humifères.

C'est donc essentiellement la faible épaisseur des profils qui freine dans le Jura l'évolution podzolisantje caractéristique de l'étage subalpin des montagnes de la zone climatique tempérée. La proximité du calcaire favorise les remontées biologiques du calcium par l'absorption des racines qui s'étalent au contact de la roche. A l'action du calcium s'ajoute aussi la composition des résidus insolubles et des limons éoliens, plus riches en argiles (supérieur à 40 %) et en fer, que pour les roches cristallines à résidu sableux important d'autres massifs montagneux (SOUCHIER, 1971).

Grâce à une étude minéralogique associée à une analyse très complète de la matière organique et des complexes organo-minéraux, nous avons :

- démontré l'existence du processus de podzolisation dans les sols argileux sur calcaire de l'étage subalpin du Jura ;
- établi les seuils de profondeur qui, sous ce climat et sur ces matériaux argileux, déterminent l'existence d'une pédogenèse brunifiante acide et d'une pédogenèse podzolisante.

Reçu pour publication : Février 1986

Accepté pour publication : Octobre 1986

REMERCIEMENTS : Nous exprimons ici nos remerciements à D. BRESSON qui a accepté de lire ce manuscrit et de le critiquer d'une manière constructive.

PODZOLISATION ON CALCAREOUS ROCKS IN SUBALPINE CLIMATIC ZONE OF JURA

Clay minerals, organic compounds and clay-organic matter complexes of specially selected soils (tab. IX, fig. 1) in subalpine climatic zone of Jura are studied. Results shown that pedologic and lithologic organisation, Ca^{2+} of H^{+} environment and weathering-humification processes are related (tabl. I to VIII).

With breaked calcareous rocks in pedon, an important content of Ca^{2+} influences the formation of clay-iron-organic complexes and calcium-humic compounds. With limited amount of Ca^{2+} furnished throught 15/35 cm of silicate material, soils with iron-aluminium-fulvic compounds are preferentialy formed, when the proportion of $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^{+}$ decreases Beyond 35 cm of silicate material, Ca^{2+} action becomes very slight. Iron-aluminium-fulvic compounds are largely formed and begin to migrate throught the profile of soil. Climatic podzolisation starts with ochreous brown soil development (typic dystrochrept).

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT D., 1969. — Phénomènes et formes du harst jurassien. *Eclogae Geol. Helv.*, 62 (2), 326-399.
- BEGUIN D., 1970. — Contribution à l'étude phytosociologique et écologique du Haut-Jura. Thèse, Fac. Sci. Univ. Neuchâtel, 190 p.
- BOTTNER P., 1971. — La pédogenèse sur roche-mère calcaire dans une séquence bioclimatique méditerranéo-alpine du sud de la France. Thèse Doct. ès Sci. Nat., Montpellier, 257 p.
- BOULAIN J., 1972. — Au sujet de quelques sols formés sur roches calcaires en climat perhumide frais (Jura méridional). *Science du Sol*, 1, 79-84.
- BRUCKERT S., ANDREUX F., CORREA A., AMBOUTA K.J.M., SOUCHIER B., 1979. — Fractionnement des agrégats appliqué à l'analyse des complexes organo-minéraux des sols. 11^e Congrès AISS Edmonton, Canada.
- BRUCKERT S., BRETHERS A. et SOUCHIER B., 1975. — Humification et distribution des complexes organo-métalliques des sols brunifiés et podzolisés. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 280 D, 1237-1240.
- BRUCKERT S., 1979. — Classification des sols bruns ocreux et cryptopodzoliques par analyse des extraits tétraborate tamponnés à pH 9.5. *Geoderma*, 22, 205-212.
- BRUCKERT S. et KILBERTUS G., 1980. — Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux de sols bruns et de chernozems. *Plant and Soil*, 57, 271-295.
- CAILLERE S. et HENIN S., 1965. — Minéralogie des argiles. Masson, Paris, éd., 355 p.
- CARBIENER R., 1966. — La végétation des Hautes-Vosges dans ses rapports avec les climats locaux, les sols et la géomorphologie. Thèse, Fac. Sci. Paris, 112 p.
- DUCHAUFOUR Ph., 1966. — Le problème du climax et l'évolution des sols. *Oecol. Plant*, 2 (1), 165-174.
- FAVARGER G., 1956. — Flore et végétation des Alpes. Delachaux et Niestlé éd.
- GUCKERT A., 1973. — Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les mécanismes d'agrégation. Thèse, Fac. Sci. Nancy, 124 p.
- JEANROY E., 1972. — Analyse totale des silicates naturels par spectrométrie d'absorption atomique. Application au sol et à ses constituants. *Chimie Analytique*, 54 (3), 159-166.
- LUCAS J., CAMEZ T. et MILLOT G., 1959. — Détermination pratique aux rayons X des minéraux argileux simples et interstratifiés. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 12, 21-23.
- MICHALET R., 1982. — Influence du climat général sur l'évolution des sols à l'étage subalpin dans le Jura. Thèse, Université de Nancy I, 103 p + annexes.
- MOOR M., 1951. — Les associations climatiques et les associations spécialisées. *J. Forest. Suisse*, 102.
- OZENDA P., 1966. — Perspectives nouvelles pour l'étude phytogéographique des Alpes du sud. *Doc. Carte Végét. Alpes*, IV, Univ. Grenoble, 198 p.
- PEDRO G., 1968. — Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, X (5), 457-470.
- POCHON M., 1978. — Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse. Phénomènes d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide. *Mém. Sté Helv. Sci. Nat.*, 190 p.
- RICHARD J.L., 1961. — Les forêts acidophiles du Jura. Etude phytosociologique et écologique. *Matériaux pour le levé géobotanique de la Suisse*, 38, 164 p.
- RICHARD L., 1978 (avec la collaboration de M.C. VATANIAN). — Carte écologique des Alpes au 1/100 000. Feuilles de Chamonix et Thonon-les-Bains. *Doc. Cartogr. Ecol.*, XX, Univ. Sc. Med. Grenoble, 1-41.
- ROBERT M. et BARSHAD I., 1972. — Transformation expérimentale des micas en vermiculites ou smectites. Propriétés des smectites de transformation. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, 24 (2), 137-151.
- SOUCHIER B., 1971. — Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). Thèse Doct. Etat, Univ. Nancy I, 134 p.
- TOUTAIN F., 1974. — Etude écologique de l'humification dans les hêtraies acidiphiles. Thèse Doct. Etat, Univ. Nancy I, 124 p.
- UTTINGER H., 1949. — Les précipitations en Suisse de 1901 à 1940, avec carte pluviométrique de la Suisse (1/500 000), Zürich.
- VEDY J.C., 1973. — Relations entre le cycle biogéochimique des cations et l'humification en milieu acide. Thèse Doc. Etat, Univ. Nancy I, 118 p.

Tableau 1. — La fraction limoneuse et argileuse des roches

Echantillons	37	30	39	61		37	30	39	61
fraction limoneuse					Fraction argileuse				
Quartz	3	2	3	4	Kaolinite	4	4	3	4
Feldspaths K+	1	1	1	1	Chlorite	—	—	—	—
Plagioclases	traces	—	—	—	Illite	4	4	4	4
Chlorite	—	—	traces	traces	Smectite	1	—	1	1
Kaolinite	2	traces	traces	1					

4 : très abondant

2 : important

3 : abondant

1 : faible

Tableau 2. — La fraction limoneuse et argileuse des sols

Echantillons	37 A ₁₁	37 A ₁₂	30 A ₁	30 (B)	39 A ₁	39 (B)	61 A ₁	61 B ₁	61 B ₂
fraction limoneuse									
Quartz	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Feldspaths K+	1	1	2	2	1	1	2	2	2
Plagioclases	1	1	2	2	1	traces	2	2	2
Chlorite	2	2	3	3	1	1	4	3	3
fraction argileuse									
Kaolinite	2	3	3	3	2	1	2	3	3
Chlorite	2	2	2	2	1	1	3	3	2
Illite	3	3	2	2	1	1	1	1	2
Smectite	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10-14 m	1	1	1	1	4	4	1	1	1
Vermiculite	1	1	3	2	—	—	2	2	2
10-14 v	2	2	2	2	—	—	3	3	2
Agradation	—	—	1	1	4	4	4	4	4

4 : très abondant

2 : important

3 : abondant

1 : faible

Tableau 3. — Eléments totaux de la fraction argiles des roches et des sols
(résultats exprimés en %/100 de l'échantillon calciné)

SOLS ET ROCHES	Hor.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	TiO ₂	
[37]										
Humo-calcaïque	A ₁₁	536	288	76	1,5	30,7	28,7	21,2	6	12
Crêt de la Neige	A ₁₂	518	304	59	2,9	31,5	28,9	38,3	5,1	13
Roche		584	307	24	0,6	19,5	28,8	12,6	8,4	15
[39]										
Brun mésotrophe	A ₁	568	298	47	1,9	29,9	34,9	9,3	3,2	8
Reculet	(B)	567	297	47	1,7	30,5	36,1	9,6	2,9	8
Roche		571	277	43	0,2	32,4	56,1	9	3,1	7
[61]										
Brun oligotrophe	A ₁	554	311	55	1,5	30,8	29,3	4,8	3,9	10
Mont d'Or	B ₁	553	302	61	1,9	30,8	29,1	6,1	4,1	12
Roche		558	296	41	0,2	31	51,3	9,9	5	7

Tableau 4. — Rapports moléculaires dans les argiles des sols et des roches

SOLS ET ROCHES	Hor.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	MgO/Fe ₂ O ₃	K ₂ O/Al ₂ O ₃
(37)					
Humo-calcique	A ₁₁	3,2	0,17	1,6	0,11
Crêt de la Neige	A ₁₂	2,9	0,12	2,1	0,10
Roche		3,2	0,05	3,2	0,10
(39)					
Brun mésotrophe	A ₁	3,2	0,10	2,5	0,13
Reculet	(B)	3,2	0,10	2,6	0,13
Roche		3,5	0,10	3	0,22
(61)					
Brun oligotrophe	A ₁	3	0,11	2,2	0,10
Mont d'Or	B ₁	3,1	0,13	2	0,10
Roche		3,2	0,09	3	0,19

Tableau 5. — Taux d'humification obtenus par fractionnement physique de la matière organique des horizons A et (B)

N°	Type de sol	Horizon	C. % du C. organique du sol			Taux d'humification
			100-2000 μ	50-100 μ	0-50 μ	
37	Humo-calcique	A ₁₁	31,3	32,3	36,4	68,7
		A ₁₂	11,3	18,1	70,6	88,7
30	Brun eutrophe	A ₁	10,6	22,4	67,0	89,4
		(B)C	2,6	13,5	83,4	96,9
39	Brun mésotrophe	A ₁	5,6	21,0	73,4	94,4
		(B)	3,9	15,3	80,8	96,1
61	Brun oligotrophe	A ₁	12,2	31,0	56,7	87,7
		B ₁	2,7	4,7	92,5	97,2

Tableau 6. — Fractionnement chimique de la matière organique humifiée des horizons (B) ou A₁₂ (fraction inférieure à 50 μ)

N° Horizon	Type de sol Lieu	Taux d'extraction			Hum. C % du C.	C. tét. C. pyr.	AF/AH	
		Tétra.	Pyro.	Total			Tétra.	Pyro.
37 A ₁₂	Humo-calcique Crêt de la Neige	12,7	36,2	48,9	39,8	0,35	1,45	0,34
30 (B) C	Brun eutrophe Chasseral	11,6	31,5	43,1	53,7	0,37	3,04	0,37
39 (B)	Brun mésotrophe Reculet	17,7	26,2	43,9	52,0	0,68	4,54	0,65
61 B ₁	Brun oligotrophe Mont d'Or	40,0	20,0	60,2	36,9	2,00	5,25	3,50

Tableau 7. — Composition des complexes organo-minéraux

H O R I Z O N	Type de sol Lieu	Métaux complexés ‰ de la fraction fine				Charges métalliques des complexes			
		Fe		Al		Fe/C (mg/g)		Al/C (mg/g)	
		Tétra.	Pyro.	Tétra.	Pyro.	Tétra.	Pyro.	Tétra.	Pyro.
		37 A ₁₂	Humo-calcique Crêt de la Neige	0,10	2,16	0,42	1,5	5,9	33,7
30 (B) C	Brun eutrophe Chasseral	0,08	1,14	0,44	1,44	9,0	47,3	49,4	59,7
39 (B)	Brun mésotrophe Reulet	0,18	3,5	1,16	1,9	13,5	178,6	87,2	96,9
61 B ₁	Brun oligotrophe Mont d'Or	0,44	3,8	1,1	1,46	44,1	760,0	110,0	292,0

Tableau 8. — Extractibilité relative du fer et de l'aluminium

Horizon	Type de sol Lieu	Fe Tétra.	Al Tétra.	Fe	Fe
		Fe Pyro.	Al Pyro.	Al	Al
37 A ₁₂	Humo-calcique Crêt de la Neige	0,06	0,25	0,21	1,44
30 (B) C	Brun eutrophe Chasseral	0,07	0,30	0,18	0,79
39 (B)	Brun mésotrophe Reulet	0,05	0,61	0,15	1,8
61 A ₁	Brun oligotrophe Mont d'Or	0,12	0,75	0,40	2,6

Tableau 9 : Caractéristiques des sols soumis au climat subalpin en fonction de la composition et des propriétés initiales des matières minérales

Dénomination initiale des sols	HUMO-CALCIQUE	BRUN EUTROPHE	BRUN MESOTROPHE	BRUN OLIGOTROPHE
<u>Caractéristiques des matières minérales</u>				
Epaisseur du profil (cm)	35	30	25	35
Epaisseur sans cailloux calcaires	5	10	25	35
Origine des matières minérales	Résidu insoluble et limons éoliens	Résidu insoluble et limons éoliens	Résidu insoluble	limons éoliens
Argiles (% de la fraction minérale)	Taux supérieur à 40% dans tous les sols			
<u>Environnement chimique et pédoclimatique</u>				
Ambiance chimique	Calcique	Neutre	Acide	Très acide
Ions échangeables dominants	Ca ⁺⁺	Ca ⁺⁺	H ⁺ , Ca ⁺⁺	H ⁺ , Al ⁺⁺⁺
Taux de saturation	100	90	50	30
Drainage	Libre	Libre	Libre	Libre
<u>Altération des minéraux argileux</u>	Légère perte en K	Perte en K Agradation faible en A ₁ seulement	Forte perte en K Agradation des smectites ou vermiculites de transformation	Forte perte en K Agradation des smectites ou des vermiculites de transformation
<u>Complexes organo-minéraux</u>				
Complexes organo-métalliques	Humates de Ca	Humates de Ca	Humates et fulvates de Ca, Al, Fe	Fulvates de Al, Fe
Complexes organo-argiliques	Dominants	Dominants	Dominants	Minoritaires
<u>Mode de pédogenèse</u>	Calcique	Prunification	Brunification	Podzolisation ménagée
	sols à complexes organo-argiliques dominants			Sols à complexes organo-métalliques dominants
Dénomination proposée des sols	HUMO-CALCIQUE	BRUN HUMIFERE	BRUN ACIDE HUMIFERE	BRUN OCREUX HUMIFERE

ar l'Etude d