

La dispersion latérale dans les sols ou : de l'horizontalisme au verticalisme ; essai sur la loxostasie

Jean BOULAINÉ

Institut National Agronomique, 16, rue Claude-Bernard, 75231 Paris Cédex 05

RÉSUMÉ

Au début du siècle, la diffusion horizontale de matières dans les sols était invoquée par de nombreux spécialistes du sol comme un phénomène quasi universel. Les analyses verticales des pédologues ont été proposées en partie pour corriger les excès de cette façon de voir la géochimie, notamment, des éléments fertilisants, et ce n'est par exemple que vers 1930 que le mot profil est devenu d'un usage courant.

Les modalités de transferts obliques sont biologiques, ou en relation avec la pesanteur et la différence de concentrations pour les éléments en solution ou en pseudosolution. Quant aux éléments figurés, l'érosion hydrique ou éolienne et des causes mécaniques sont responsables de leur mobilité dans toutes les directions de l'espace.

Les conséquences de ces mouvements obliques sont étudiées d'abord sur un exemple : le pédosystème constitué par une dépression salée où les eaux d'une nappe phréatique s'évaporent et les dunes d'argiles et de matériaux sont évacués par le vent de la surface des solonchaks. Ces lunettes sont fréquentes en Afrique du Nord et leurs sols peuvent évoluer en solonetz ou même, avec le temps, en luvisols chromiques à encroûtements calcaires sur les points hauts.

Le mot de loxostasie est proposé pour désigner l'ensemble des phénomènes obliques et de leurs conséquences (du grec loxos : oblique).

Quelques caractères originaux de ces phénomènes, notamment leur dimension temporelle, nous invitent à modifier à la fois certaines méthodes et certains concepts de la pédologie pour en mieux tenir compte, ce que l'augmentation de la précision des études pédologiques rend chaque jour de plus en plus nécessaire.

C'est ce que demandait déjà, il y a plus d'un demi siècle, le fondateur de la pédologie géographique NEUSTRUEV.

MOTS-CLÉS : Dispersion — Pédogenèse — Transfert oblique — Loxostasie — Sols salés — Croûtes calcaires.

ABSTRACT

THE SOIL LATERAL DISPERSION OR FROM HORIZONTALISM TO VERTICALISM ; TEST ON LOXOSTASY

At the beginning of our century, the horizontal diffusion of matters in soils has been involved by many soil scientists as a quasi-universal phenomenon. Verticalist analysis have been proposed by pedologists, partly to correct that viewpoint of geochemistry, particularly about fertilizers, and, for instance, the word « profile » after 1930 only.

The modalities of oblique transfers are biological, or related to gravity and concentration differences concerning soluble or pseudo-soluble elements. As for featured elements, hydric or aeolian erosion and mechanical causes are responsible for their mobility following all space directions.

The consequences of those oblique movements are first studied through an example : the pedosystem consisting in a salted hollow where a phreatic water table evaporates, and clay and wind born materials from the surface of solonchaks. Such « lunettes » are common in North Africa, and their soils can develop into solonetz, or even, through time, into chromic luvisols with calcareous crusts, on hill tops.

The word « loxostasy » is proposed to point out the whole of oblique phenomenons and their consequences (from greek loxos = oblique).

Some original features of those processes, particularly their chronologic dimension, lead us to modify both some methods and conceptions of pedology, in order to involve them in a better way, which the rise in accuracy of pedological studies makes every day more necessary.

Such aim was already, more than half a century ago, that of NEUSTRUEV, promoter of geographical pedology.

KEY WORDS : Dispersion — Soil genesis — Oblique migration — Loxostasy — Saline soils — Calcareous crusts.

INTRODUCTION

Dès les premières explorations naturalistes, les transports à la surface de la terre frappèrent les excellents observateurs que furent beaucoup de nos prédécesseurs.

C'est ainsi que DARWIN, au cours de son voyage autour du monde observa dans l'Atlantique une pluie de poussières provenant de l'érosion du Sahara dont il tira argument pour expliquer la fertilité des sols.

Un peu plus tard, à la Société centrale d'Agriculture de France dans la séance du 20 mars 1878, à la suite d'une note de BARRAL sur les expériences de LAWES à Rothamsted, BOUSSINGAULT fait remarquer que la diffusion joue un grand rôle en agriculture.

Il y a un mouvement incessant de matière et non pas seulement d'un champ à un champ voisin, mais encore à des terres éloignées.

Cette diffusion se fait aussi bien de bas en haut que dans le sens horizontal. On trouve des matières azotées aussi bien que des matières phosphatées à de très grandes profondeurs et ces matières peuvent être amenées à la surface par diverses causes qui les mettent à la disposition des plantes. (d'après LENGLEN M., 1937, page 25).

Certains auteurs sont même allés très loin dans la prise en compte de la dispersion chimique entre les sols : F. CAMERON et BELL en 1906 affirment hautement que les éléments chimiques sont pratiquement dans tous les sols dans des teneurs voisines et ils citent de nombreux auteurs pour étayer leur thèse.

Celle-ci est, à cette époque, la doctrine officielle du bureau des sols du gouvernement fédéral des Etats-Unis dirigé par WITHNEY et celui-ci la professe publiquement. Il écrit alors et diffuse des textes qui ne présentent aucune ambiguïté en la matière. L'un de ces « papiers » a été traduit en français par FABRE et publié, avec celui de CAMERON et BELL dans les Annales de l'Ecole nationale d'Agriculture de Montpellier et n'a donc pas été ignoré des chercheurs français et européens. Aux Etats-Unis et dans les pays anglophones,

WITHNEY et ses collaborateurs eurent une polémique très violente avec HILLGARD et KING que H. JENNY (1961) a rappelé en détail (1). Cette polémique, dont WITHNEY fut le triomphateur, a longuement marqué la science du sol américaine et il a fallu attendre vingt ans pour que MARBUT, successeur de WITHNEY, mais longtemps influencé par celui-ci, finisse par corriger dans les faits, les idées de son prédécesseur... que bien des chercheurs américains, heureusement, avaient d'eux-mêmes abandonné (COFFEY, entre autres, démissionna du Soil Survey : c'est un homme important dans l'histoire de la pédologie américaine, le second après HILLGARD, en quelque sorte : le « SIBIRTSEV » U.S.).

Les « chimistes du sol » de leur côté, y compris en Europe, y compris en France, n'étaient pas hostiles à cette vision des sols où les échanges horizontaux égalaient progressivement les différences dues à la nature des roches, ce que l'homme, par ses récoltes et ses transports de fumiers favorisait largement. Ce gommage relatif des différences de nature donnait toute sa valeur à l'analyse chimique qui y trouvait la justification d'un échantillonnage « moyen » au niveau de la parcelle et d'une prise en compte d'un passé culturel immédiat d'une façon prioritaire pour les diagnostics de fumure. Bien des positions actuelles de nos collègues agronomes s'expliquent largement par ce « passé idéologique » de la science du sol.

Entre 1920 et 1960, le verticalisme des pédologues a fortement réagi contre cette façon de voir le sol et ceci s'est traduit par des inventaires de reconnaissance à large maille aussi bien typologiques que cartographiques. Une autre conséquence a été l'exhumation du mot et de la notion de profil (entre 1927 et 1935) déjà utilisé par MÜLLER vers 1870, mais que les deux premières générations de pédologues n'utilisent pas.

Ce verticalisme s'est traduit en pédologie par les études sur les processus de pédogenèse qui n'étaient d'ailleurs qu'un effort pour éclairer le déterminisme entre le sol et ses facteurs de différenciation que DOKOUCHAEV

(1) HILLGARD et KING soutenaient le point de vue des « agrochimistes européens », c'est-à-dire l'importance des engrais chimiques, au moins pour certains sols et donc le verticalisme.

avait posé en principe sans avoir les moyens, naturellement, de les définir en détail.

C'est ainsi que la pédologie classique a défini et étudié un grand nombre de processus de transport qui se manifestent dans les sols. Le thème le plus fréquemment évoqué dans les textes scientifiques est sans conteste celui des transferts verticaux avec ses deux processus : de départ, *l'éluviation*, dans les horizons de surface et d'accumulation, *l'illuviation*, dans les horizons profonds. Le résultat est *l'horizonation* du sol. Plus récemment, on a défini *l'haploïdisation* du sol, c'est-à-dire la simplification du profil (BUOL *et al.*, 1974). Les processus qui en sont responsables sont essentiellement les composantes de la *pédoturbation*, c'est-à-dire la *bioturbation* (ex : chernozem), la *cryoturbation* (ex : sols polygonaux) et *l'argilo-turbation* (ex : vertisols), etc.

Mais certains auteurs, depuis les premières années de la pédologie probablement, mais surtout depuis les quarante dernières années, ont mis en évidence des mouvements obliques d'éléments figurés ou d'éléments chimiques en solution qui, dans certains cas, peuvent être responsables de caractères très différenciés du sol. Ce sont ces derniers phénomènes dont nous tentons aujourd'hui une analyse ainsi qu'une évaluation de leur rôle pédogénétique.

1. LES MODALITÉS DES TRANSFERTS OBLIQUES

1.1. La dispersion biologique (1)

L'installation et le développement d'un couvert végétal sur une roche, dont l'altération débute, est concomitante du développement d'un sol. La colonisation d'une portion de la couverture pédologique dont la genèse commence, est un phénomène de dispersion biologique. Peu à peu, le sol s'épaissit, se transforme, s'organise, tandis que l'association végétale qui le recouvre se modifie, s'adapte, se spécialise.

Au cours de son histoire, un pédosystème voit se succéder des écosystèmes progressifs ou régressifs.

Si nous considérons le sol à un état de développement donné (par exemple son acmé, J. BOULAIN, 1979), alors qu'il est recouvert d'une végétation adaptée, on peut discerner parmi les modes d'action de la végétation sur le sol les processus suivants.

La plante, grâce à sa transpiration, remonte en surface les solutions et les éléments dissous qu'elle a puisés dans le sol. Cette *remontée biologique* s'oppose en partie aux transferts dus à la seule pesanteur. On peut l'évaluer grossièrement :

L'évapotranspiration potentielle est, dans les pays tempérés et méditerranéens de l'ordre de 500 à 2 000 mm. Il faut 500 cm³ d'eau transpirée pour fabriquer 1 gramme de matière sèche et celle-ci, carbone et azote de l'air enlevés, a 20 % d'éléments chimiques provenant du sol. La remontée d'éléments minéraux est de l'ordre de 2 à 8 tonnes par hectare si ETR est proche de ETP et réduite en proportion si ETR est une fraction de ETP. L'ordre de grandeur de la remontée est donc de la tonne par hectare et par an.

Or, il y a toujours une composante horizontale dans le mouvement de la sève depuis les racines jusqu'aux feuilles. La plante, vivante, disperse les éléments chimiques. Ses organes aériens morts sont dispersés par le vent, ou retombent verticalement par l'effet de la pesanteur et ses racines se minéralisent là où elles ont vécu. Suivant les végétaux, c'est chaque année des mouvements de plusieurs centimètres, décimètres ou mètres qui affectent la tonne d'éléments chimiques ainsi mobilisée.

Les animaux de l'écosystème multiplient la vitesse de dispersion. Ils s'alimentent d'organes végétaux et dispersent leurs déjections, leur cadavre ou même leur corps, proie des carnassiers. Cela représente des déplacements de l'ordre du décimètre, du mètre, ou de l'hectomètre chaque année suivant qu'il s'agit d'un ver de terre ou d'un gros mammifère.

D'après G. AUBERT (1960), qui donne des chiffres, cette « *remontée biologique* » ne joue pas seulement sur les cations dits « *majeurs* » mais aussi sur l'acide phosphorique et sur les oligo-éléments.

L'homme, par ses transports de fumiers, par les cendres des incendies qu'il provoque et des foyers de ses habitations, a considérablement augmenté, depuis quelques millénaires, cette dispersion biologique qui s'ajoute, pour la répartition des éléments chimiques au niveau de la terre à la dispersion des poussières extraterrestres, volcaniques et de l'érosion éolienne qui en est un élément « *structurel* ».

1.2. Transferts latéraux à l'état soluble ou pseudosoluble

De très nombreux auteurs ont étudié en détail les migrations et les transferts verticaux dans les sols : les termes de podzolisation, de lessivage, de lavage, de lixiviation, ont permis peu à peu de distinguer des phénomènes différents mais qui ont tous pour résultat un entraînement vertical des substances dans le sens de la pesanteur.

On a aussi évoqué les remontées à l'état soluble (ou pseudosoluble) mais sauf pour les sols salins, les études précises sont beaucoup plus rares.

(1) Il s'agit évidemment de dispersion au niveau du paysage.

Dans tous ces transferts, une composante horizontale existe et elle peut dans certains cas prendre des valeurs notables qui ont pour résultat un entraînement oblique, c'est-à-dire une *loxoviation*, (du grec *loxos* : oblique et du latin *luo* : laver, le mot est construit par analogie avec *illuviation*).

En France, c'est R. MAIGNIEN, dans sa thèse sur le cuirassement des sols en Guinée (1958) qui, au sujet du fer, a le plus clairement et le premier mis en évidence ces phénomènes.

Il écrit : *Le dynamisme des sesquioxydes est un phénomène banal qui s'observe en toute région suffisamment humide... En Guinée, il atteint une telle intensité que l'on assiste à une redistribution complète de ces produits à travers les sols...*

Le même auteur poursuit, dans ses conclusions : *les sesquioxydes de fer proviennent fréquemment des formations voisines ; il se produit un transport généralisé des reliefs les plus élevés vers les niveaux inférieurs par l'intermédiaire des solutions du sol qui percolent par mouvements verticaux, obliques ou latéraux...*

Et il oppose le devenir du fer qui est d'être transféré à celui de l'aluminium qui est de s'accumuler, relativement, sur place par départ des autres éléments dont le fer.

R. MAIGNIEN ajoute : *le cuirassement est lié... à la présence d'une source de sesquioxydes (de fer), d'un moyen de translation et d'un niveau de réception...* En termes actuels, on dirait plutôt : réserve, agent de transfert et structure-piège, mais les mots ne changent rien à la description des conditions du processus.

Les éléments solubilisés ou mis en pseudosolution migrent aussi longtemps qu'il y a écoulement de l'eau et permanence des conditions physico-chimiques. Dès que les solutions rencontrent dans le sol une ambiance contraire au maintien en solution, les éléments sont déposés. Ils occupent les vides du sol (fer) ou même écartent les éléments pré-existants par cristallisation (calcaire). Ces transferts peuvent avoir lieu chaque année sur des espaces courts, mais à la longue, des centaines de mètres peuvent être franchis.

Il y a donc des unités-sols dans lesquelles la séparation latérale des éléments capables de migrer est aussi importante que la séparation verticale.

Les milieux où il y a transfert possible et où il y a insolubilisation sont séparés par un front d'accumulation qui est une *limite oblique* d'horizon (1).

Exemple 1 : Sous climat tropical humide ou équatorial, sur roches cristallines, les points hauts sont caractérisés par une ferrallitisation totale : si le sol est assez vieux et formé sur un matériau cristallin, on y trouve dans les

horizons de surface uniquement les oxydes de fer et d'alumine.

Dans les parties basses, par contre, la silice soluble est moins bien évacuée : elle se recombine aux gels d'alumine et donne de la kaolinite (monosiallisation). Exemple 2 : Dans les régions méditerranéennes sub-humides (P de 300 à 600 mm), c'est le calcaire qui est l'élément dont l'accumulation est la plus spectaculaire avec la formation des croûtes et encroûtements calcaires. Ces mouvements sont parfois descendants, surtout dans les zones les plus humides, mais peuvent aussi être remontants ; les solutions qui sont alors en cause sont celles qui sont liées au sol et qui se déplacent du pôle humide au pôle sec celui-ci étant en général le point haut, car l'évaporation y est la plus forte et le stock d'eau du sol minimal à la fin de la saison humide : les croûtes et les encroûtements sont plus développés sur les sommets des reliefs quand ceux-ci sont en continuité pédologique avec les zones basses. On connaît de très nombreux exemples de modelés de ce type depuis les collines (distance du transfert hectométrique) jusqu'aux microreliefs gilgai des vertisols (distance de transfert métrique). (Cf. JAILLARD, 1980 ; BOULAINÉ, 1957.)

1.3. Transferts à l'état figuré

Le sol reçoit en permanence des matériaux de l'atmosphère, il lui en fournit sous certains climats et il se produit à sa surface des mouvements de matière solide. Enfin, des transferts solides ont lieu dans sa masse.

1.3.1. LES ÉCHANGES PAR L'ATMOSPHÈRE

Le globe terrestre reçoit chaque année des corps et des poussières extraterrestres qui, en général, tombent au hasard pour les plus gros, en relation avec les pluies pour les plus fins. Les évaluations de ces apports varient avec les auteurs. Ils sont de l'ordre du millimètre pour 100 000 ans ce qui est faible. Les poussières et les apports provenant des éruptions volcaniques sont à la fois plus discontinus et probablement plus importants, de l'ordre du centimètre pour 100 000 ans avec probablement des apports beaucoup plus importants au cours de certains paroxysmes volcaniques et à proximité des zones d'émission.

Enfin, les poussières terrestres provenant de l'érosion par le vent des sols arides ont fait l'objet d'études plus précises, et peuvent être beaucoup plus importantes : de l'ordre du décimètre par 100 000 ans avec des concentrations beaucoup plus importantes dans certaines zones où les chutes sont favorisées par les pluies et les apports plus importants du fait des circulations aériennes.

(1) Plusieurs études très détaillées ont été consacrées par les pédologues français aux migrations latérales en solution. On a pu employer à ce sujet l'expression « chromatographie des ions dans les paysages » (Y. TARDY, 1969).

1.3.2. TRANSPORTS HYDRIQUES DE SURFACE

Il s'agit essentiellement de ce que les eaux de ruissellement peuvent transporter au moment des pluies. Il peut s'agir d'éléments plus ou moins grossiers, mottes ou constituants du sol mais le cas le plus fréquent est celui des éléments fins, mis en suspension par destruction de la structure du sol au moment de l'effet splash des gouttes de pluie et entraînés latéralement soit définitivement au profit des exutoires et du réseau hydrographique, soit à une certaine distance au profit des sols voisins si une amélioration de la perméabilité permet à la fois l'infiltration des eaux courantes et le piégeage des éléments fins. En plus de l'érosion, le résultat est le phénomène de l'appauvrissement bien mis en lumière par les pédologues français en Afrique tropicale qui est aussi très fréquent dans certains sols cultivés, notamment dans les vignobles (E. SERVAT : déclaration orale) où il a pour conséquence la formation d'un profil textural contrasté (la semelle de labour s'identifie avec un changement textural brusque).

1.3.3. MOUVEMENTS INTERNES

Ils résultent de la possibilité pour les horizons supérieurs des sols situés sur les pentes de glisser les uns sur les autres par suite de différences de viscosité à l'état mouillé. Les relations entre horizons restent les mêmes, mais il y a décalage des constituants du sol par rapport à leur position primitive.

De plus, les alternances de gonflement normal à la pente et de dessiccation suivie de retrait qui se fait avec action de la pesanteur donc verticalement font peu à peu migrer les constituants des horizons superficiels vers le bas des pentes.

Enfin, la mise en mouvement pour quelque cause que ce soit : action des animaux, chablis d'un arbre, etc., des éléments constitutifs du sol permet immédiatement à la pesanteur de se manifester. Tous ces phénomènes se traduisent par un appel de l'aval où la matière des sols, qui sont en position haute, finit peu à peu par s'accumuler, sauf à être dégagée par les agents de l'érosion.

En dernier lieu, il faut signaler que le lessivage intéresse, outre les argiles, des éléments figurés, limons et sables fins dont les techniques modernes permettent de déceler les mouvements (N. FEDOROFF, 1981).

2. CONSÉQUENCES ÉPISTÉMOLOGIQUES DE LA DISPERSION LATÉRALE (1)

Au début du siècle, la trop grande importance donnée aux mouvements obliques avait amené certains

auteurs et non des moindres, à nier toute spécificité pédologique et à professer que tous les sols avaient peu ou prou le même stock d'éléments chimiques utiles aux plantes.

A l'opposé, certains pédologues ont eu une attitude très « verticaliste ». En 1967, dans son discours, au Congrès des Sols méditerranéens à Madrid, Georges AUBERT s'élevait contre cette vision trop restreinte des processus pédologiques.

Avant d'étudier les conséquences de ces phénomènes de transport sur nos méthodes et nos concepts, la description d'un exemple va permettre de poser un certain nombre de problèmes.

2.1. Un exemple : le pédosystème des lunettes (fig. 1).

Nous avons décrit, en Algérie, en 1953, un complexe de sols salés, constitué d'une dépression (sebkha) et de sa dune d'argile : la lunette. Des formations analogues avaient été signalées par COFFEY (1909) au Texas et par HILLS (1952) en Australie, à qui on doit ce terme de lunette (colline en forme de croissant de lune).

Avec la terminologie de la F.A.O. (1975), il s'agit de fluvisols argileux à phase phréatique saline qui évoluent par évaporation des eaux de la nappe en solontchaks dont l'horizon salin de surface devient alcalin et prend en été par hypersalure une structure micropolyédrique de pseudosable. Les vents secs et chauds d'ouest les soulèvent et les accumulent sur la bordure est de la zone en déflation, où les plantes des zones moins salées servent de pièges. Les rares pluies ou même les rosées matinales déflocculent l'argile qui fossilise les accumulations. L'hiver suivant, les pluies lavent les sels les plus solubles dont une partie retourne, par gravité, avec les eaux de percolation, mais obliquement à cause de la faible perméabilité des argiles sodiques, vers la zone basse de départ où peu à peu la teneur en sel augmente. Les sulfates et les carbonates restent dans le sol.

Les accumulations d'argiles salées peuvent au fil des ans devenir importantes : plusieurs dizaines de mètres de haut, plusieurs kilomètres de long, quelques centaines de mètres de large. Leur forme, en croissant avec la concavité tournée dans la direction d'où vient le vent (le contraire d'une barkhane) est très caractéristique (J. BOULAIN, 1951, 1957, 1958, etc.).

Le sol des dunes d'argile est d'abord un solontchak, puis un solonetz et peut même, à la longue (plusieurs millénaires), présenter des encroûtements calcaires gypseux (en dessous), alors que le solum se rubéfie en luvisol chromique, et que l'érosion hydrique se manifeste sur la lunette et sur les bordures de la dépression qui se creuse et se couvre d'une croûte de sels à chlorures dominants.

1) Voir note p. 321.

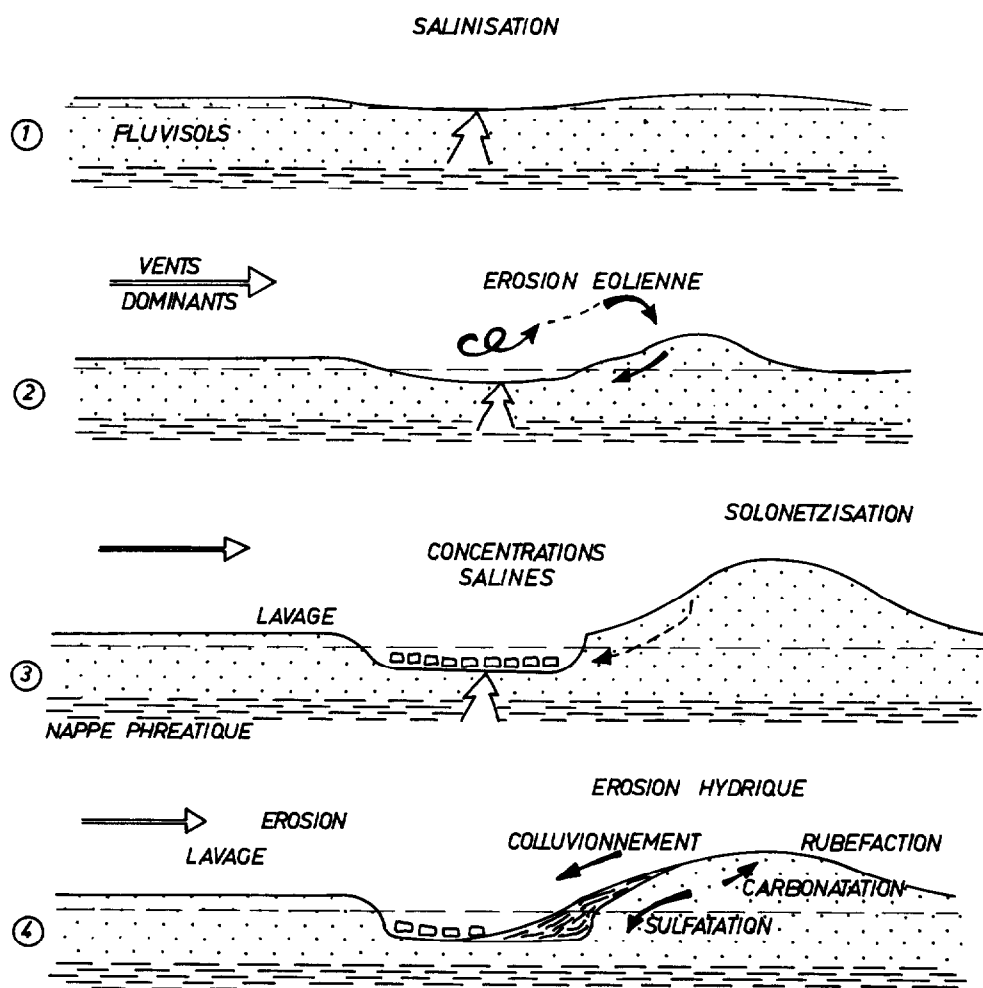


FIG. 1. — Phases successives de la pédogenèse dans le système des lunettes, sous climat méditerranéen sub-humide. Durée totale de l'évolution de l'ordre de 20 000 ans.

Cet exemple a l'avantage de poser le problème, d'ailleurs artificiel, des disciplines scientifiques. Ce système est-il géologique, géomorphologique ou pédologique ? On pourrait d'ailleurs analyser ses différents états successifs en termes d'écosystèmes. Une solution à ce débat académique pourrait être, par convention, de réserver l'analyse pédologique à des transformations limitées de la topographie ; pour fixer les idées, inférieures à un mètre d'épaisseur, ou deux.

Les classifications U.S. et F.A.O. nous y incitent, car elles limitent à 50 cm l'épaisseur des phases pédologiques de recouvrement.

Le système des lunettes et de la sebkha salée qui lui est associée relèverait alors pour sa définition de la géomorphologie.

Mais il existe des systèmes analogues de petites dimensions : stades préliminaires ou stade de dégénérescence, dans lesquels les phénomènes sont amortis, moins intenses, mais existent cependant. Ce sont souvent les plus intéressants à étudier sur le plan pratique.

D'autre part, il existe notamment en Oranie, des systèmes de lunettes emboîtées, qui témoignent de plusieurs phases de paroxysmes d'érosion éolienne et de phases pédologiques de préparation de matériaux par formation des pseudosables, qui se sont déroulées entre ce que les quaternaristes d'Afrique du Nord ont appelé le Soltanien (vers — 20 000) et l'époque actuelle. L'analyse de ces phénomènes dépend-elle de la géologie du Quaternaire, de la géomorphologie ou de la pédologie ?

C'est une question oiseuse que seule notre manie de

découper l'activité de recherche en disciplines justifie.

En fait, il y a pour expliquer l'état de choses actuel et notamment la différenciation de la couverture pédologique, différentes approches et le pédologue se doit d'y faire appel et de veiller à leur convergence.

Ce que nous avons voulu montrer par cet exemple, c'est qu'il y a dans le fonctionnement passé du sol au cours de la pédogénèse et dans le fonctionnement actuel du sol des mouvements de matière qui ne sont pas strictement verticaux ni horizontaux et qui ne sont ni uniquement causés par la pesanteur ni uniquement en solution : entraînements latéraux remontant par érosion éolienne, et latéraux descendant par érosion hydrique de constituants figurés des sols ; entraînements obliques descendant des solutions salines, transferts obliques et remontant des carbonates dans les solutions liées aux sols, remontées verticales à partir de la nappe phréatique, etc. A chaque stade, la couverture pédologique présente un fonctionnement complexe et ce fonctionnement est générateur de différenciations aussi bien verticales que latérales.

Nous désignons l'ensemble de ces transferts obliques et de leurs conséquences par le terme de *Loxostasie* (du grec *loxos* oblique et du grec *stasis* : arrêt ou ralentissement (en médecine stase désigne : « l'arrêt ou le ralentissement considérable d'un liquide organique »). Ce mot est construit sur le modèle de *biostasie* (ERHART) (1).

2.2. Quelques caractères originaux de la loxostasie et leurs conséquences sur nos méthodes et nos concepts

La loxostasie structure la couverture pédologique à la fois dans la séquence des horizons et dans l'assemblage des éventuelles unités cartographiques.

Certains caractères des transferts obliques n'ont pas été suffisamment étudiés par nos méthodes et intégrés dans nos concepts. Un ajustement des uns et des autres est probablement nécessaire.

A. La dispersion peut prendre *accidentellement* une grande importance.

A chaque éruption volcanique, on décrit dans les journaux comme dans les articles scientifiques les apports de cendres sur des milliers d'hectares. Chacun d'entre nous a en mémoire des recouvrements éoliens ou colluviaux qui sont à l'origine de sols peu évolués que nous avons cartographiés un peu partout.

Il s'agit de phénomènes apériodiques et accidentels.

De même, l'érosion consécutive à un changement climatique ou une pluie de gros météorites sont accidentelles compte tenu des valeurs moyennes de temps et d'espace du phénomène sol. Mais que dire des terriers d'animaux ou des incendies de forêts ou des chablis des arbres ?

Il s'agit alors de phénomènes qui peuvent présenter une certaine périodicité. Plus celle-ci est courte, de l'ordre du millénaire pour fixer les idées, et aussi plus les distances concernées sont petites (moins du décamètre), plus la pédogénèse est concernée.

Les notions d'impureté dans les unités cartographiques, de phases pour les classifications et certains sous-groupes et familles permettent assez bien de tenir compte de ces phénomènes exceptionnels.

B. *Les phénomènes périodiques* sont cumulatifs en fonction du temps. Leurs conséquences sont d'autant plus importantes que les sols sont plus vieux. Les apports exogènes réguliers, la dispersion biologique, l'appauvrissement, la pédoturbation, ne sont des processus de différenciation que pour des sols recouvrant de vieilles surfaces, en tous les cas des surfaces dont l'âge est compatible avec l'apparition, au-delà du seuil de perceptivité, des résultats du phénomène en cause.

Réciproquement, si nous voulons les mettre en évidence, il faut chercher des sites où l'action cumulative du temps a pu leur permettre de se manifester.

La difficulté majeure pour la connaissance de ces phénomènes est que leur résultat, pour le sol, dans les espaces de temps courts qui sont ceux de l'observation, sont peu importants, souvent à la limite de nos capacités d'observation et de mesure. Il est en outre difficile de faire la somme, en fonction du temps, de ces phénomènes dont les conséquences annuelles ou mensuelles sont limitées. Il existe par exemple une énorme littérature en zoologie sur la production de carbonate de calcium par les animalcules du sol, mais la détermination du rôle de ces excréments zoogènes dans la différenciation des encroûtements calcaires reste à faire.

La taxonomie actuelle (notamment la *Soil Taxonomy* U.S. de 1975) possède quelques concepts : sous-groupes *cumulic vermic* par exemple ; mais ils sont essentiellement verticalistes et c'est dans les unités cartographiques complexes que la loxostasie peut être exprimée, par les combinaisons liées notamment.

(1) Le terme « loxostasie » a l'avantage de combiner la dimension spatiale (loxo) et la dimension temporelle (stasie). En revanche on peut se demander s'il n'existe pas des systèmes dont le fonctionnement latéral s'autodéveloppe ou s'autoaccélère.

C. En l'absence d'érosion et d'apports superficiels, dans les domaines pédologiques où les roches-mères sont homogènes, les transferts obliques se *compensent*. Par contre, lorsque les formations géologiques sont hétérogènes et pour les sols dont la pédogenèse a été longue, de plusieurs milliers d'années à plusieurs dizaines de milliers d'années, les effets croisés des transferts obliques ont « gommé » les différences et diminué la spécificité.

L'âge de la couverture pédologique et l'hétérogénéité des affleurements de roches-mères sont donc deux facteurs majeurs de la plus ou moins grande importance que peuvent prendre ces phénomènes de dispersion latérale : il y a donc des domaines pédologiques où la loxostasie se manifeste fortement et d'autres où elle reste très limitée dans ses effets.

La notion de contraste et la notion de courbure permettent d'exprimer, dans les combinaisons de sols les passages plus ou moins progressifs d'un pôle à un autre, ce que les intergrades ne font qu'imparfaitement en termes de typologie.

D. Les *limites* des unités cartographiques peuvent, notamment dans le cas de formations géologiques hétérogènes et de couvertures pédologiques anciennes, être affectées d'un « flou génétique ». Il en est de même pour des formations plus récentes mais affectées par des transferts accidentels : plaques d'érosion-nappe, zones d'apports de cendres volcaniques, colluvions, proluvions et alluvions, etc.

La précision d'une limite pédologique comporte donc un aspect génétique : ce n'est pas uniquement une caractéristique liée au travail du pédologue ou aux moyens qu'il met en œuvre. Il y a des limites nettes et des limites floues du fait même des processus de pédogenèse.

A part de rares exemples, ce caractère très fondamental des limites pédologiques a été rarement exprimé même s'il a été signalé (M.-C. GIRARD, 1983). C'est, pour les cartes à échelles moyennes ou grandes (1/50 000 et plus grandes), une amélioration souhaitable.

E. En ce qui concerne l'*alimentation végétale*, les éléments nécessaires en faible quantité (oligo-éléments) et facilement transportés et diffusés (sodium des embruns marins) ne posent de problèmes que dans des cas extrêmes : sols très jeunes ou sites abrités des apports. Le cas de l'iode, dont la carence entraîne le goître et qui n'était absent que de quelques vallées alpêtres a été célèbre dès le début du siècle dernier.

En dehors de l'action de l'homme, les carences en éléments nutritifs dans les sols sont la résultante de la nature de la roche-mère et des phénomènes géochimiques élémentaires : solubilisation, insolubilisation, transferts, etc., *mais aussi* de l'existence éventuelle d'une dispersion latérale.

Les recherches pédogénétiques en matière d'oligo-éléments ont donc une limite structurelle qui varie d'ailleurs avec les domaines pédologiques où elles s'exercent.

CONCLUSION

L'existence d'une composante horizontale dans les mouvements qui affectent les composants du sol et l'importance que prennent ses conséquences dans la différenciation et le fonctionnement de portions non négligeables de la couverture pédologique sont de mieux en mieux perçues par les pédologues.

NEUSTRUEV le disait déjà en 1927 et ce fut en quelque sorte le testament scientifique d'un des plus grands spécialistes de la géographie pédologique.

Il n'y a rien d'étonnant à ce que, après un demi-siècle de grandes reconnaissances et d'inventaires à larges mailles, les études pédologiques détaillées et à grande échelle qui sont effectuées depuis une vingtaine d'années apportent des faits précis à cette conception du sol qui existait d'ailleurs chez DOKOUCHEV dès le début mais sous la forme d'un acte de foi dans le déterminisme. Il disait que les sols sont reliés à des facteurs de différenciation :

caractères des sols → facteurs de formation

Un siècle après, I.P. GERASSIMOV (1983) écrit :

caractères des sols → processus → facteurs de formation

et ce faisant, il résume et schématise un siècle de recherches concernant le déterminisme (dialectique !) qui relie le sol et ses facteurs de différenciation qui était implicite chez DOKOUCHEV et qui a été maintenant explicite dans un grand nombre de cas.

Un des aspects de ce déterminisme, et dont nous reconnaissons l'existence dans des cas chaque jour plus nombreux, est la dispersion latérale des constituants du sol. Cette loxostasie est une des grandes causes de structuration de la couverture pédologique.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 13 octobre 1986.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1960. — Influence de la végétation sur le sol en zone tropicale humide et semi-humide *in* : rapports du sol et de la végétation. Paris, Masson, ouvrage collectif publié sous le nom de Viennot-Bourgin G.
- BOULAIN (J.), 1951. — La Sebkhia de Ben Ziana et sa lunette... Paris, *Rev. de géomorphologie Dyn.*, 5^e année, n° 3, 22 p. (1954).
- BOULAIN (J.), 1953. — Les lunettes des basses plaines oranaïses. Rome, Actes du IV^e Congrès de l'Assoc. Int. Et. Quaternaire (INQUA).
- BOULAIN (J.), 1954. — La Sebkhia de Ben Ziane et sa lunette ou bourrelet, exemple de complexe morphologique formé par la dégradation éolienne des sols salés. Paris, *Rev. Géomorph. Dyn.*, n° 3, 5^e année : 102-123.
- BOULAIN (J.), 1957. — Etude des sols des plaines du Chelif. Alger, S.E.S., 582 p.
- BOULAIN (J.), 1958. — Sur la formation des carapaces calcaires. Alger, Service Carte géol. de l'Algérie, bull. n° 20, p. 7 à 19.
- BOULAIN (J.), 1979. — Acmé et climax, pédosystème et écosystème. Essai de définition. Paris, C.R. Acad. Agriculture de France : 640-646.
- BUOL (S.W.), HOLE (F.D.) et Mc CRACKEN (R.J.), 1980. — Soil genesis and classification. 2^e éd., Ames, U.S.A., The Iowa State University Press.
- COFFEY (G.N.), 1909. — Cité par PRICE dans la discussion qui a suivi la communication de J. BOULAIN (1953) au 4^e congrès de l'INQUA à Rome.
- F.A.O., 1975. — Carte des sols du monde au 1/5 000 000. Notice. Rome, F.A.O.-U.N.E.S.C.O.
- FEDOROFF (N.) *et al.*, 1981. — Essai d'interprétation des transferts sous forme figurée dans les podzols du Québec méridional à partir de l'étude micromorphologique. Amsterdam, Elsevier, *Geoderma* n° 26 : 25-45.
- GIRARD (M.C.), 1983. — Recherche d'une modélisation en vue de la représentation spatiale de la couverture pédologique. Paris, INA PG, Sols, n° 12, 430 p. Thèse Paris VII.
- HILLS (E.S.), 1952. — The Lunette a new land form or eolian origin. *Australian Geol.*, vol. 3-7 : 1-7.
- JAILLARD (B.), 1980. — Fonctionnement hydrique d'un sol carbonaté. Incidences sur la chlorose ferrique. Montpellier, U.S.T.L., thèse 3^e cycle.
- JENNY (H.), 1961. — E.W. HILGARD and the birth of modern soil science. Pise, *Collona Della Revista Agrochimica*, n° 3.
- LENGLEN (M.), 1937. — Un aspect peu connu de l'œuvre de J.B. BOUSSINGAULT. Beauvais, Imp. cent. admin., 190 p.
- MAIGNIEN (R.), 1958. — Contribution à l'étude du cuirassement du sol en Guinée française. Strasbourg, thèse Doct. Etat, fac. Sciences, 311 p.
- NEUSTRUEV (C.C.), 1977. — Genesis y geografiia potch (en russe). Moscou, morceaux choisis de Neustruev publiés par l'Académie des Sciences d'U.R.S.S. Isdatelstvo NAUKA.
- WHITNEY (M.), 1907. — La fertilité des sols (traduit par H. FABRE). Montpellier, *ANN. Ecole Nat. Agric.*, t.-7-2, p. 89-135.