

Pédologie expérimentale et recherches sur les argiles

Deux domaines clés de la science des sols

Georges Pédro

*Correspondant de l'Institut, membre de l'Académie d'agriculture
de France, directeur de recherches Inra (Versailles)*

J'aimerais dire au préalable combien ce genre d'exercice est périlleux, et ce pour plusieurs raisons.

Il y a d'abord l'abondance et la diversité de l'œuvre dans le domaine de la pédologie expérimentale.

Ensuite le fait que, même si l'on a beaucoup pratiqué un maître (et c'est mon cas dans le domaine en question), il n'est pas envisageable de s'y substituer complètement, de connaître tous les arcanes du développement de sa pensée, de savoir comment se sont réalisées telle ou telle association d'idées... Je vais donc essayer de vous présenter ma perception de l'œuvre de S. Hénin à travers nos relations, en essayant de n'être ni trop partiel, ni trop partial.

Enfin, la troisième difficulté vient du fait que, à notre époque, il existe inéluctablement un écart considérable en science entre le début d'une carrière dans la recherche et le moment présent. Ici cela représente 60 ans, une trentaine d'années avant le début de notre collaboration, une trentaine d'années ensuite ; et l'on peut dire en vérité qu'il n'y a aucune commune mesure entre la connaissance des sols de nos jours et celle des années 1955-1960, encore moins celle des années 30. Des phénomènes inconnus alors sont aujourd'hui des évidences, des hypothèses hasardeuses sont devenues des certitudes..., à tel point que certaines d'entre elles par exemple se retrouvent dans les manuels de l'enseignement secondaire.

Cela étant, je vais tenter de vous présenter les problèmes de la pédologie expérimentale à travers le prisme de S. Hénin, en m'en tenant à quelques faits marquants et en essayant de montrer comment ceux-ci ont pu émerger, comment ils s'insèrent dans le dispositif intellectuel d'aujourd'hui et comment ils continueront à irriguer les travaux futurs.

Plusieurs éléments me semblent être à l'origine du développement des recherches par S. Hénin en pédologie expérimentale.

• La première chose est d'abord le petit nombre de connaissances définitivement acquises en science des sols : pas ou peu de références fondamentales, pas de données quantitatives... D'où la nécessité de se référer aux sciences de base, qui constituent les piliers de tout développement scientifique. Mais une telle introduction n'est pas sans poser de problèmes, lorsqu'on a affaire, comme dans le cas des sols, à des objets complexes, à des phénomènes multiples et en interaction... D'où l'idée de s'appuyer sur la méthode expérimentale (S. Hénin avait été en effet très imprégné par les réflexions de Claude Bernard, dont une des idées forces était : « *Nous ne connaissons tout à fait que ce que nous savons reproduire* »), et même de développer des recherches expérimentales en laboratoire (*in vitro*), car, si les dispositifs expérimentaux de plein champ sont nécessaires, ils le sont surtout dans ce domaine du très long terme pour les générations futures.

• Le deuxième point qui a retenu l'attention de S. Hénin vers les années 30 est l'ambiance essentiellement chimique dans laquelle se faisait le développement de la science des sols (avec ses aspects sectoriel et statique). Aucune référence à la minéralogie (et encore moins à la cristallographie), très peu d'appui dans le domaine des phénomènes et des concepts physiques, quelques velléités en microbiologie des sols (en 1922, à la création de l'Institut de recherche agronomique, la station de Versailles s'appelait Station d'agronomie et de biologie des sols), mais vite avortées malgré la présence de S. Winogradsky à l'Institut Pasteur et le fait que S. Waksman était un ami d'Albert Demolon.

Or, pour S. Hénin, le sol forme avant tout un système organisé dont il ne s'agit pas simplement de connaître la composition chimique (résultat d'une analyse brute), mais bien de préciser la constitution et la structure en s'appuyant sur les méthodes de l'analyse immédiate (granulométrie par exemple) et de l'analyse structurale (cristallographie), puis de les mettre en relation avec les conditions de genèse. D'où la référence constante aux diverses sciences de base utiles à la compréhension des problèmes : physique, géochimie, minéralogie, cristalochimie...

• Le troisième élément déterminant dans le développement des recherches a été de centrer les investigations sur les constituants actifs du sol, c'est-à-dire les constituants de petite taille à propriétés « colloïdales », et en particulier les argiles qui forment, avec les composés humiques, ce qu'on regroupe aujourd'hui sous le nom de plasma du sol ; d'où les recherches à développer pour mieux connaître leur nature, leur mode de genèse et leur évolution au sein des sols. Et il est bon de signaler ici le rôle de creuset qu'à joué dans ce domaine le club scientifique qu'était le Groupe français des argiles, fondé en 1947, où, à côté des disparus tels J. Orceel et surtout J. Mering, il faut citer, outre G. Millot et J.J. Fripiat dont il a été question déjà, J. Wyart, Mlle Caillère, G. Sabatier...

De nombreux problèmes afférents à ce domaine ont fait l'objet d'études dans le sillage de S. Hénin. Aussi me contenterai-je d'aborder en pédologie expérimentale les trois thèmes suivants :

- la genèse des argiles : apport de la minéralogie (classique et expérimentale) ;
- le rôle majeur joué par la genèse des argiles dans la caractérisation des sols : apport de l'altération expérimentale (pédologie expérimentale génétique) ;
- l'étude des relations entre les argiles et le fonctionnement géochimique et structural des sols : apport de la pédologie expérimentale *stricto sensu* (ou pédologie expérimentale fonctionnelle).

Les recherches relevant de ces trois rubriques n'ont pas obligatoirement été effectuées suivant l'ordre de présentation retenu ; mais cet ordre de présentation

correspond bien, selon la conception de S. Hénin, à un développement logique des travaux dans ce domaine, depuis les conditions les plus artificielles (laboratoire de chimie) jusqu'à celles se rapprochant de plus en plus du milieu naturel.

Par ailleurs dans ces trois volets, on s'est toujours préoccupé de la nature même des argiles ; aussi, est-ce la résultante des apports dans les différents niveaux qui permet d'avoir aujourd'hui une vision plus complète de ce type de constituants.

Genèse des argiles : apport des synthèses expérimentales

Les argiles des sols étaient au départ considérées comme des composés colloïdaux (on parlait de micelles argileuses), sortes de gels de composition mal définie et susceptibles de se disperser à la manière de floculats ; rien donc, à première vue, qui en fasse des substances minérales spécifiques. L'application aux argiles du rayonnement X vers les années 1935-40, grâce à la mise au point de la méthode dite des poudres par Debye et Scherer, a permis de faire avancer les choses et de montrer sans conteste le caractère cristallin de ces matières argileuses ; même s'il s'agissait plutôt de cryptocristallinité, en relation avec la petite dimension des cristallites et l'existence de réseaux déformés. A partir de cette donnée, il n'a plus été possible de s'en tenir aux hypothèses génétiques en vigueur jusque-là : hypothèse résiduelle (les argiles étant considérées comme de simples résidus de minéraux primaires altérés) ou encore hypothèse isoélectrique (elles sont le produit d'une coprécipitation désordonnée).

D'où l'idée d'envisager le problème par la voie synthétique *in vitro*, en s'appuyant sur deux points.

En premier lieu, la genèse des constituants argileux résulte d'une véritable cristallisation ; elle se fait donc à partir d'ions en solution (anions et cations), les argiles (hydroxysilicates) correspondant à des sels basiques (de 2^e type suivant la nomenclature de Feitknecht, c'est-à-dire plus insolubles que les hydroxydes) ;

En second lieu, étant donné que l'on a affaire à des silicates très insolubles qui sont des sels de polyacides à anions condensés, la genèse ne peut se réaliser qu'en milieu dilué. Ceci est d'ailleurs une application du principe de von Weimar qui avait beaucoup influencé S. Hénin ; de même qu'il avait été frappé par la dilution habituelle des eaux des cases lysimétriques. D'où la mise au point de dispositifs expérimentaux du type de la figure 1, qui permettent en milieu fermé de jouer sur :

- l'apport simultané ou séparé des éléments (silice et cation) ;
- la vitesse des apports respectifs ;
- la concentration des solutions (électrolyte) ;
- le pH du milieu...

Les essais entrepris, qui ont été réalisés de manière systématique, ont porté alors sur les principaux cations donnant lieu à des argiles :

- Mg, Fe^{II}, Ni, Co, Mn, Zn, qui conduisent à des édifices trioctaédriques ;
- Al, Fe^{III}, Cr, qui sont les constituants des édifices dioctaédriques.

De l'ensemble des résultats obtenus, on peut faire ressortir les points suivants :

- il est aisé d'obtenir des argiles trioctaédriques chaque fois que l'hydroxyde du cation présente une structure brucitique (lamellaire) : Mg, Fe^{II}, Ni^{II}, Co^{II} et Mn^{II} ;

– il est possible de synthétiser des argiles trioctaédriques zincifères lorsque les conditions du milieu conduisent à l'hydroxyde brucitique : $\alpha \text{Zn}(\text{OH})_2$; on obtient alors la sauconite (2/1) ou la berthierine zincifère ; en revanche, lorsque le milieu conduit à un autre hydroxyde de Zn – où Zn est tétravalent : $\varepsilon \text{Zn}(\text{OH})_2$ – les silicates synthétisés ne sont pas des minéraux phylliteux, mais de la calamine : $\text{Si}_2\text{O}_7\text{Zn}_4(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}$ (ESQUEVIN, 1958) ;

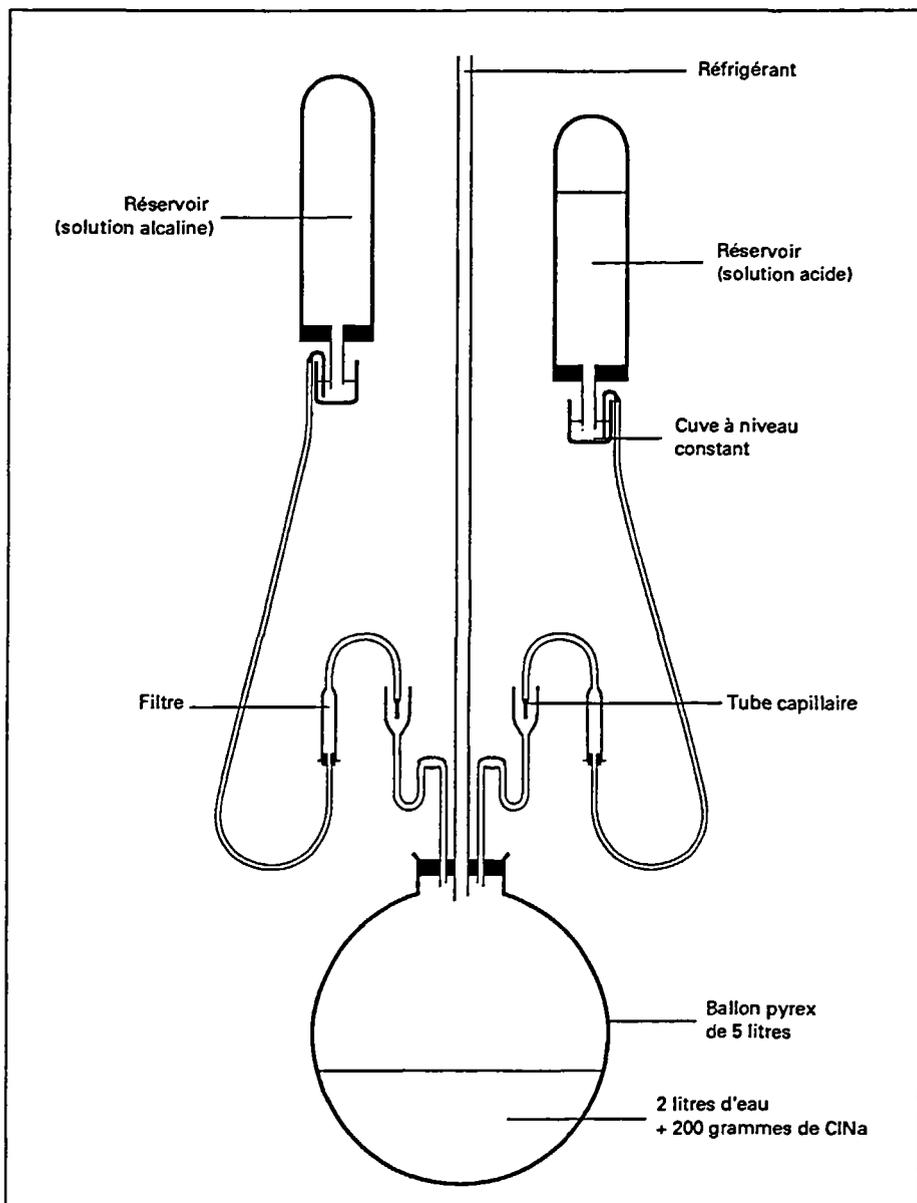


Figure 1. Schéma d'un des dispositifs expérimentaux utilisés pour la synthèse des argiles (ESQUEVIN, 1958).

- il est impossible d'obtenir dans les mêmes conditions des argiles dioctaédriques, alumineuses en particulier, car l'hydroxyde obtenu est alors la boehmite γ $AlOOH$. Tout au plus a-t-il pu être formé des argiles aluminomagnésiennes, mais trioctaédriques. Ultérieurement, ESTEVOULE (1969) a pu d'ailleurs montrer que cette voie trioctaédrique était un passage obligé pour aboutir à des feuillets dioctaédriques alumineux.

D'où l'importance assignée dans la genèse à la couche brucitique et à considérer les argiles comme des sortes d'hydroxydes silicifiés, avec une individualisation en deux phases (fig. 2) : structure embryonnaire et remplissage.

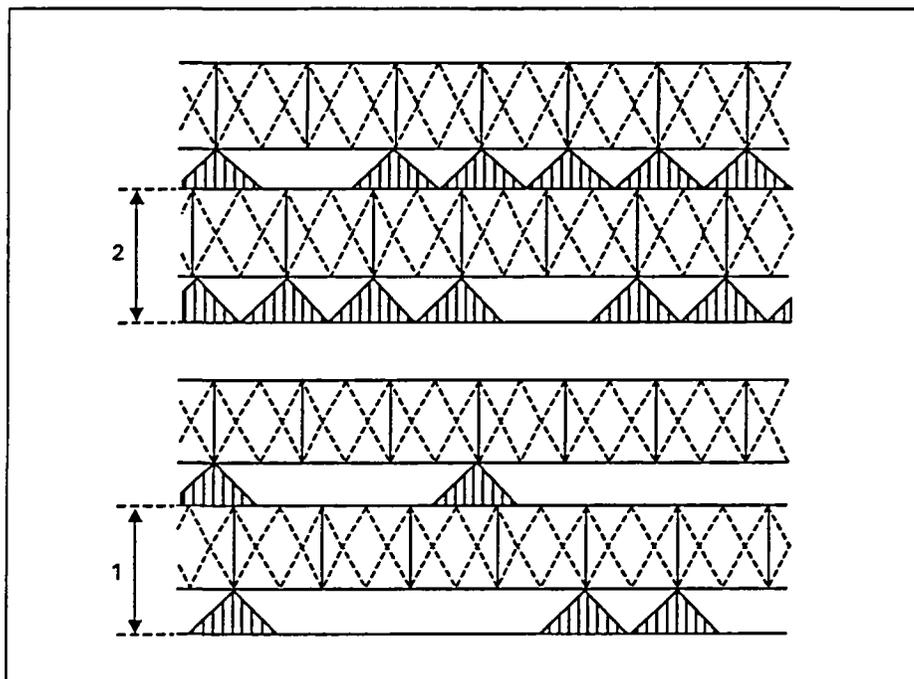
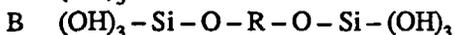


Figure 2. Schéma génétique proposé, basé sur l'importance de la couche d'hydroxyde octaédrique. 1. Structure embryonnaire. 2. Remplissage des couches tétraédriques de silice. (CAILLÈRE et HÉNIN, 1962.)

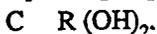
Les essais ultérieurs, notamment ceux réalisés par R. Wey et son élève B. Siffert, ont conduit à aller plus loin dans la compréhension de la genèse des argiles. En effet, il est à noter que, si la synthèse est aisée avec des cations ne donnant que des ions hydroxomononucléaires (Mg, Ni, Co...), elle est plus difficile avec des cations trivalents (Al), où, par suite de l'existence de cations hydroxopolynucléaires, il faudrait obtenir une dilution extrême pour se trouver en présence d'ions hydroxomononucléaires ; ce qui s'avère à peu près impossible expérimentalement, compte tenu de la lenteur de la vitesse des réactions.

D'où, à la suite de SIFFERT (1962), une reformulation des modes de genèse basée sur l'existence en solution de monomères mixtes, avec deux phases :

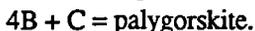
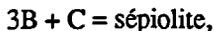
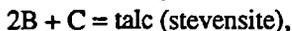
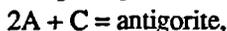
- individualisation suivant les conditions du milieu de deux types de ces monomères mixtes :



ainsi que du groupement :



- suivant la nature du monomère mixte (A ou B) et la proportion de C, S. Hénin montre qu'on peut aboutir, par polymérisation, aux différentes argiles trioctaédriques :



Je m'en tiendrai là, bien qu'après une longue interruption les travaux de synthèse aient été récemment repris (depuis 1980), notamment dans le laboratoire de M. Steinberg à Orsay, à l'initiative de A. Decarreau en particulier.

De cette brève présentation, il est permis de tirer plusieurs leçons.

• Les argiles sont des constituants cryptocristallins, à composition chimique définie, de la famille des phyllosilicates. On peut donc les appréhender à partir des méthodes de la minéralogie la plus stricte, et par référence aux silicates phylliteux macroscopiques (micas, chlorites...), donc en s'appuyant sur deux éléments :

- la structure atomique du feuillet (1/1, 2/1, 2/1/1) ;

- la constitution cristallochimique (couche tétraédrique, couche octaédrique).

D'où le choix par S. Caillère et S. Hénin, à partir de 1956, et en se référant au niveau le plus fin, celui du feuillet, de ces deux critères en vue d'établir une véritable classification minéralogique des argiles phylliteuses (PÉDRO, 1965).

• La genèse des argiles se fait à partir de solutions diluées dans des conditions physico-chimiques déterminées ; d'où l'importance de l'introduction en science des sols des données modernes sur la chimie des solutions, et notamment sur la constitution et l'évolution des ions condensés et des complexes.

A partir de ces quelques éléments, il devenait alors possible de passer à un autre stade et de rendre les recherches moins artificielles, en reliant directement et en système ouvert la genèse des argiles aux processus de la pédogenèse, c'est-à-dire de passer de la chimie à la géochimie. Cela a constitué l'ensemble des recherches sur les phénomènes de l'altération géochimique des roches.

Genèse des argiles et processus géochimiques de pédogenèse : apport de l'altération expérimentale

Présentation

Les conditions chimiques de la synthèse des argiles étant esquissées, il était souhaitable, au cours d'une seconde étape des recherches, de mettre en relation les conditions de laboratoire avec celles qui sont habituellement mises en œuvre dans le milieu de la surface de la planète et, par là même, avec les différents processus qui président à la genèse des sols. Cette seconde étape a constitué la pédologie expérimentale génétique, qui s'intéresse donc aux processus fondamentaux de la

pédogenèse, c'est-à-dire au passage direct par altération des minéraux primaires constitutifs des roches à des minéraux secondaires spécifiques du sol et qui sont donc, eux, parfaitement en équilibre avec les nouvelles conditions du milieu superficiel.

De nombreux essais ont été réalisés à cet effet, qu'on peut classer de différentes façons, suivant que l'on est amené à mettre l'accent sur tel ou tel aspect.

Si on s'intéresse à l'origine et à la nature de l'altération des minéraux primaires et des roches, tout dépend des facteurs qui sont à l'origine de l'altération et de la libération des éléments qui vont aboutir aux argiles :

- si c'est l'eau plus ou moins chargée en CO_2 , comme c'est le cas en général, il s'agit de l'altération géochimique au sens strict ;

- si on a affaire à des solutions contenant des composés organiques solubles résultant de la décomposition par la microflore des matières organiques du sol, on parle d'altération biogéochimique ;

- les organismes vivants, microorganismes, rhizosphère..., peuvent agir seuls sur les minéraux, et on se trouve alors dans le cas de l'altération biologique proprement dite (J. Berthelin et G. Callot, par exemple).

Si on considère plutôt le mode de genèse des argiles, on est conduit à distinguer d'une part les phénomènes de néoformation, qui correspondent à la véritable création de réseaux argileux par cristallisation, comme cela se produit au cours des synthèses, et d'autre part les phénomènes de transformation, où l'argilification se fait essentiellement en phase solide à partir de réseaux phylliteux préexistants : micas, chlorites ou autres argiles.

Enfin, on peut être amené à mettre l'accent sur les modalités hydriques de l'altération, qui sont effectivement très variées à la surface : si les grands processus de la pédogenèse sont bien caractéristiques de milieux ouverts et en libre drainage (convection), d'autres phénomènes d'altération, en revanche, sont susceptibles d'apparaître en milieu peu hydraté et résulter de la mise en œuvre de phénomènes de diffusion (cas des altérites isovolumes, par exemple).

Je me contenterai d'évoquer ici trois aspects, ayant trait :

- à l'altération géochimique et à la néoformation pédogénétique des argiles ;

- à l'altération biogéochimique et à l'individualisation des argiles de transformation.

- à l'importance jouée par les transferts par diffusion dans certains phénomènes, avec comme exemple l'épigénie calcaire en calcimorphie.

Altération géochimique générale et néoformation des argiles au cours de la pédogenèse¹

L'altération des roches superficielles, qui résulte essentiellement de l'action des éléments climatiques et en particulier des facteurs hydriques, tels que la pluviosité et le drainage, se rattache tout naturellement au cycle de l'eau à la surface du globe. C'est ce qui a conduit à imaginer un modèle expérimental reproduisant un tel cycle à petite échelle et à adopter un dispositif dérivé de l'extracteur Soxhlet (fig. 3), qui remplit la plupart des conditions nécessaires à ce genre d'expérience (PÉDRO, 1964).

¹ G. Pédro, Laboratoire des sols, Inra (Versailles), J. Trichet, Laboratoire de géologie, Ecole normale supérieure.

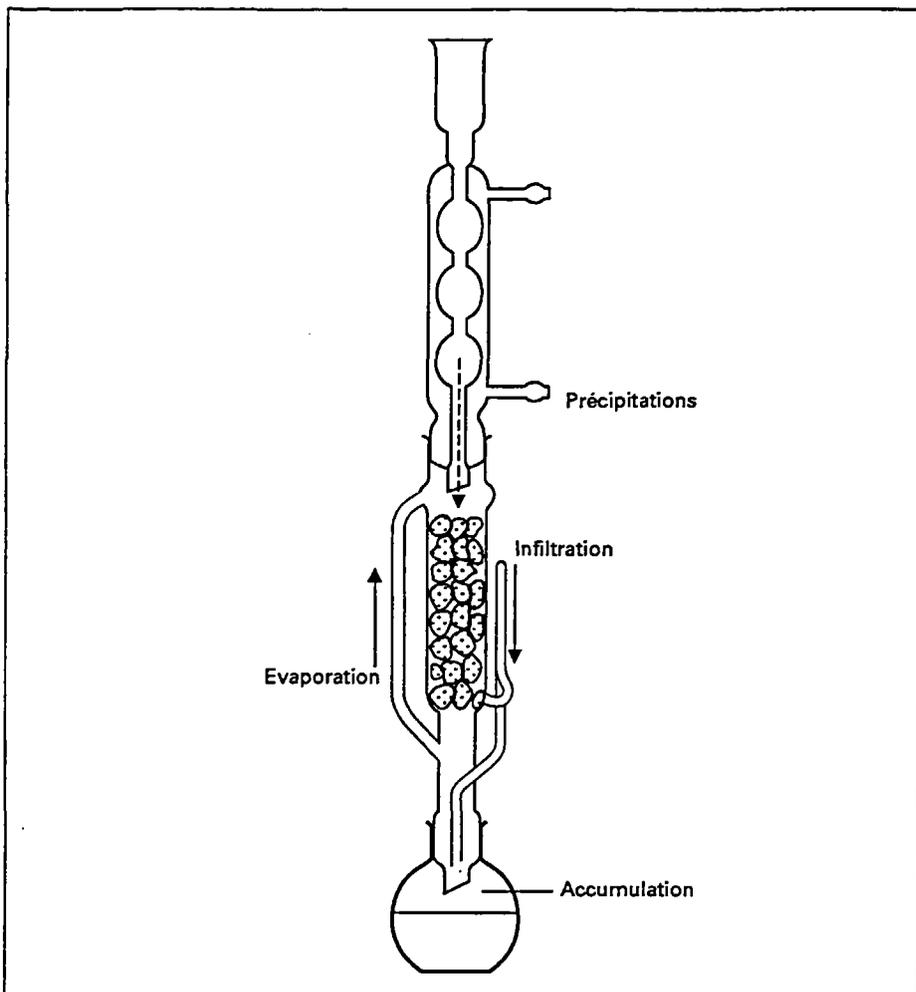


Figure 3. Dispositif expérimental de type Soxhlet pour étudier l'altération géochimique des roches (PÉDRO, 1964).

En effet, ce dispositif permet :

- la séparation aisée des deux phases géochimiques caractéristiques de toute altération : phase solide résultant de l'évolution et phase migratrice lessivée (eaux de drainage), ce qui facilite l'établissement de véritables bilans géochimiques à tout moment des essais et permet d'avoir ainsi une approche quantitative des différents phénomènes reproduits ;

- la mise en œuvre éventuelle d'un certain nombre de conditions physico-chimiques et climatiques contrôlées, qui représentent véritablement les facteurs actifs de l'altération expérimentale ;

- l'étude de l'évolution de n'importe quel matériau de la planète : minéraux, roches, sols ; ceux-ci constituant au demeurant des paramètres passifs lors des transformations enregistrées.

En jouant sur les différents facteurs – nature des roches, composition des solutions d'attaque, vitesse de circulation des eaux, température... – il a été possible avec le temps (il s'agit toujours d'essais de longue durée) :

– de reproduire *in vitro* les principaux processus de la pédogenèse en conditions humides, et notamment la latéritisation et la podzolisation ;

– d'établir qu'il existait une correspondance évidente entre le type géochimique de l'altération et la nature cristallochimique des minéraux secondaires néoformés ;

– de formuler que c'était le comportement simultané des différents groupes d'éléments chimiques – silice (élément structural tétraédrique = [Te]), sesquioxydes (Al-Fe) (cations structuraux octaédriques = [Oc]), cations alcalins et alcalino-terreux (cations compensateurs de charge = [Int]) – les uns par rapport aux autres, qui détermine la tendance évolutive enregistrée ; d'où la mise au point de paramètres synthétiques ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2/\text{bases}$...) qui, évalués conjointement dans les eaux de drainage et dans les roches de départ, conduisent à déceler aisément cette tendance (tableau I, à titre d'exemple, pour des phénomènes d'hydrolyse) ;

– de bien montrer enfin que, si une roche, quelle qu'elle soit, subit l'altération, c'est elle qui, malgré tout, règle le jeu géochimique de l'évolution, en déterminant la composition (et la concentration) des solutions d'altération au sein desquelles se produisent les néogenèses.

Les règles générales de l'altération à la surface du globe étant ainsi établies, il était nécessaire de les compléter pour des conditions moins tranchées et des milieux plus particuliers.

Tableau I. Caractérisation géochimique et cristallochimique des mécanismes d'altération de nature hydrolytique (PÉDRO, 1966-1979).

Degré d'hydrolyse	Hydrolyse totale	Hydrolyse partielle	
Géochimie de la désilicification			
Bilan global	Désilicification totale	Désilicification incomplète	
Dynamique relative	$L > R$ (SiO_2) > (bases)	$L < R$ (SiO_2) < (bases)	
Concentration en SiO_2 du milieu	$\text{SiO}_2 < 10^{-4,7} \text{ M}$	$\text{SiO}_2 > 10^{-4,7} \text{ M}$	
Nature cristallochimique des constituants néoformés			
Processus général	Allitisation	Siallittisation	
Constituants néoformés	Hydroxydes d'aluminium	Phyllites 1/1	Phyllites 2/1
Exemple	Gibbsite	Kaolinite	Montmorillonite
Processus cristallochimique	Allittisation	Monosiallittisation	Bisiallittisation
Géochimie de la désalcalinisation			
Bilan global	Désalcalinisation totale	Désalcalinisation incomplète	
Dynamique relative	$L > R_k$	$L < R_k$	

Evolution expérimentale des micas

Altération biogéochimique en conditions acidifiantes

Individualisation des argiles de transformation¹

Les micas et édifices micacés font partie des minéraux primaires et, à ce titre, ont à subir l'altération biogéosphérique. Toutefois, on sait qu'ils possèdent déjà la structure phylliteuse qui représente la structure caractéristique des constituants néoformés au cours de l'évolution superficielle ; c'est la raison pour laquelle leurs modalités d'altération ont des chances d'être plus variées que celles reconnues au cours des études dont il vient d'être question.

Des expériences préliminaires avaient été réalisées au Muséum sur l'évolution des micas et des chlorites. Ultérieurement, une étude systématique a été envisagée au Laboratoire des sols de l'Inra (ROBERT, 1970), en utilisant un dispositif différent (renouvellement des solutions en discontinu), ce qui permettait de diversifier largement les conditions d'altération :

– milieux neutres ou alcalins à forte concentration : NaCl N (pH 5,6) – Na₂CO₃ N (pH 9,5) – NaOH N (pH 14) ;

– milieux neutres ou alcalins dilués : eau distillée – NaCl N 10⁻³ (pH 5,6) – NaCl N 10⁻⁴ (pH 6) ;

– milieux d'acidité élevée : HCl N 10⁻¹ (pH 1) – HCl N 10⁻² (pH 2) et NaCl N + HCl (pH 2) ;

– milieux moins acides : HCl N 10⁻³ (pH 3) – AlCl₃ N (pH 2,5) ;

– milieux complexants : acides organiques de type citrique, oxalique, tartrique... et EDTA (pH 5 à 11).

Les résultats obtenus sont résumés en figure 4, où l'on distingue deux grands domaines.

• Le premier domaine (grisé) est constitué par les milieux fortement acides (pH < 2,5), les milieux complexants et les milieux dilués (< N 10⁻³), où les micas sont détruits au cours de l'altération. Dans ces conditions, on revient aux cas étudiés précédemment : podzolisation, latéritisation...

Le mica se comporte alors comme les tectosilicates, ce qui signifie que les cations compensateurs interfoliaires [Int] ne sont pas extraits préférentiellement par rapport aux cations structuraux du feuillet [F] = [Te] + [Oc] et que l'on peut écrire [Int] < [F].

• Le second domaine (blanc) correspond à des milieux plus concentrés, qu'ils soient acides (pH > 2,5), neutres et salins, ou encore alcalins. Ici, les cations compensateurs sont libérés préférentiellement en ouvrant les espaces interfoliaires et en laissant pratiquement intacte la trame du feuillet 2/1, soit [Int] > [F]. Les modifications principales se produisent alors au niveau de ces espaces interfoliaires et les types d'évolution engendrés ont été désignés sous le terme général de transformation par G. Millot.

Au demeurant, suivant la constitution des espaces interfoliaires, deux grands cas peuvent être envisagés (tabl. II) :

– en milieu neutre ou alcalin relativement concentré, ce sont des cations hydratés à caractère basique qui se trouvent en position interfoliaire : Mg(H₂O)_y et Na(H₂O)_z ;

¹ M. Robert, Laboratoire des sols, Inra (Versailles), J. Berthelin, Centre de pédologie, CNRS (Nancy).

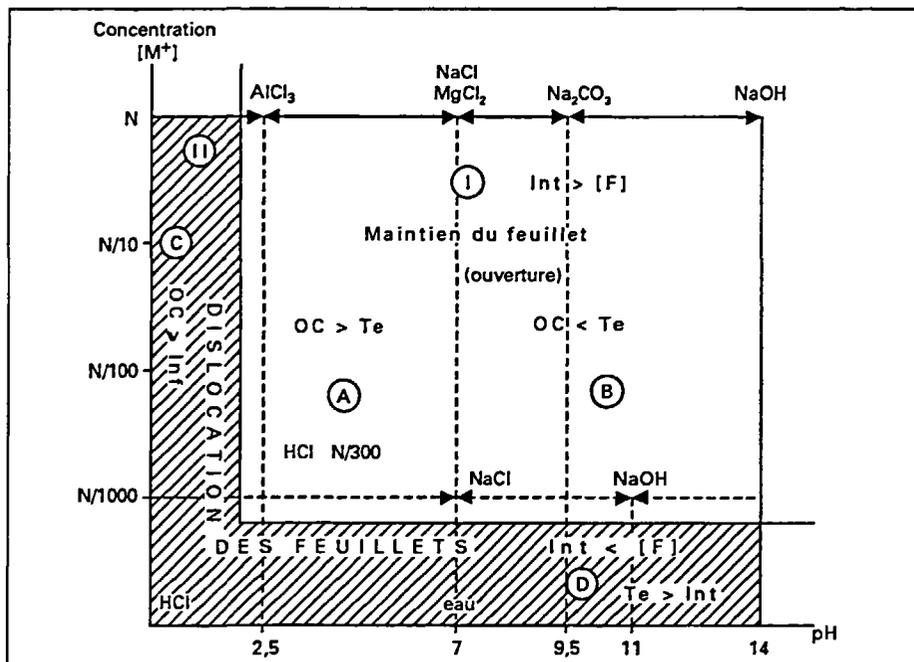


Figure 4. Diagramme de l'évolution des biotites en fonction des conditions expérimentales (pH, concentration). (ROBERT, 1970.)

Tableau II. Schéma général d'évolution des micas trioctaédriques (biotites-phlogopites). (ROBERT, 1970 ; ROBERT et PÉDRO, 1972.)

Mécanisme d'altération	Hydrolyse (soluviation)		Acidocomplexolyse (chéluviation)	
Stabilité relative des couches structurales	[Oc] < [Te]		[Oc] > [Te]	
Taux d'extraction des éléments	Hydrolyse totale SiO ₂ > K ₂ O	Hydrolyse limitée SiO ₂ < K ₂ O	Acidolyse limitée [Oc] < K ₂ O	Acidolyse caractérisée ou complexolyse [Oc] > K ₂ O
Type de transformation	Dislocation complète des feuillets	Maintien de la carcasse 2/1 Ouverture et hydratation des couches interfoliaires Oxydation en couche octaédrique	2/1 (Int > F) Ouverture et hydroxyaluminisation des couches interfoliaires	Dislocation totale des feuillets
Caractérisation minéralogique	Gaëthite Gibbsite (kaolinite)	Vermiculite Montmorillonite	Intergrades Al Chlorite II	Silice résiduelle
Processus d'altération	Ferrallitisation Monosiallitisation	Bisiallitisation « apparente »	Monosiallitisation « déguisée »	Podzolisation

les micas prennent alors un comportement de vermiculite, bisiallite typique du milieu naturel ; aussi ce processus de vermiculitisation par transformation correspond-il à une « bisiallisation apparente » (H. Paquet) ;

– en milieu acide aluminisé, ce sont des cations Al hydroxylés et plus ou moins polymérisés qui jouent le rôle d'ions compensateurs interfoliaires, donnant aux édifices un comportement intermédiaire entre celui des vermiculites et des chlorites. On les appelle des intergrades alumineux, qui sont les minéraux caractéristiques du processus d'aluminosiallisation, l'aluminium jouant le rôle à la fois de cation structural (octaédrique) et de cation compensateur (interfoliaire).

Naturellement, dans les deux cas, des ajustements cristallichimiques interviennent aussi au sein des feuillets, mais sans disloquer la trame de ceux-ci. C'est ce qui fait la grande variabilité de composition des phyllites 2/1 dans la nature. Les travaux récents de ANDREOLI (1989) confirment entièrement cet état des choses.

Enfin, en ce qui concerne les rapports de l'acidocomplexolyse type et de l'altération biochimique, RAZZAGHE (1976) et BERTHELIN (1975) ont bien montré le rôle joué par les acides organiques hydrosolubles, compte tenu du caractère plus ou moins complexant des anions mis en jeu (fig. 5).

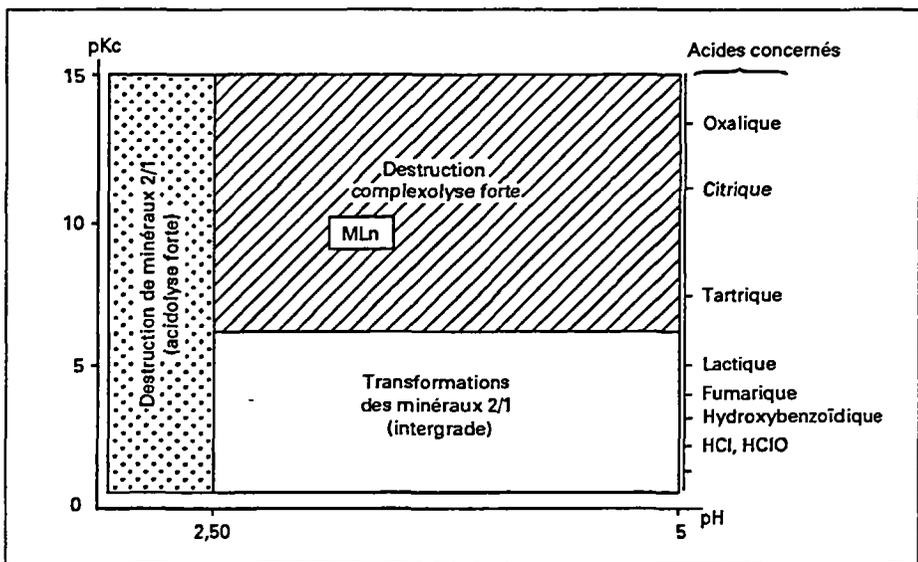


Figure 5. Diagramme de l'évolution des micas en conditions d'acidocomplexolyse : acidité (pH) et degré de complexation (pKc). (RAZZAGHE, 1976.)

Altération expérimentale avec mise en jeu de transferts par diffusion : cas de l'épigénie calcaire

Les processus pédogénétiques impliquent en général que la mobilité des éléments dans le sol, et par suite leur concentration en un site donné, soit réglée par des phénomènes de convection. Mais il existe d'autres cas de figure où l'évolution minéralogique superficielle se produit avec une conservation sensible des volumes

solides ; c'est le cas de l'altération isovolume et aussi de l'épigénie (G. Millot). La compréhension de tels phénomènes impliquait de mettre en jeu des transferts par diffusion et d'imaginer de nouvelles modalités expérimentales, et c'est ce à quoi se sont attachés Hénin, Caillère et Besson dans les années 1975-80, à partir de dispositifs où les divers constituants disposés séparément en sacs à dialyse sont mis en interaction durant plusieurs mois (fig. 6). Cette méthode s'est avérée très féconde et a permis ultérieurement d'élucider les phénomènes d'épigénie calcaire, très caractéristiques des milieux calcimorphes encroûtés.

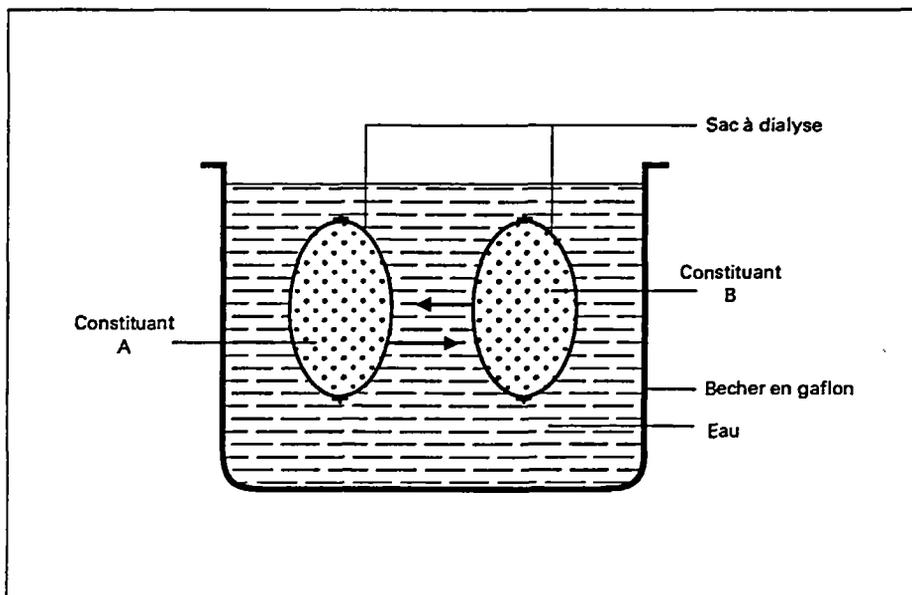


Figure 6. Schéma du dispositif expérimental simulant les milieux confinés (transferts par diffusion). (BESSON *et al.*, 1977.)

Les expériences réalisées à Versailles par HALITM *et al.* (1983), en reprenant le dispositif du Muséum, sont exemplaires de ce point de vue. Effectuées en milieu fermé, soit constamment humide, soit comportant des alternances d'humidification et de dessiccation, elles avaient pour but, en effet, de suivre l'évolution *in situ* du quartz (et de la palygorskite) en présence de carbonates (CaCO_3 et aussi MgCO_3). Les données obtenues, qui sont représentées schématiquement sur la figure 7, ont permis d'aboutir aux résultats suivants.

L'épigénie calcaire résulte de la mise en œuvre de deux phénomènes distincts : dissolution du quartz d'un côté et reprécipitation de la calcite de l'autre, qui alternent nécessairement dans le temps : en phase humide, les solutions carbonatées calciques provoquent la dissolution du quartz ; en phase évaporatoire, les solutions se concentrent et aboutissent à la précipitation de calcite.

L'épigénie calcaire en système binaire, quartz- CaCO_3 , ne correspond donc pas à un processus monotone, mais à un phénomène à la fois alternatif à l'échelle de l'année et répétitif pluriannuellement.

Il en est à peu près de même en présence de solutions calcomagnésiennes. Ici, la dissolution du quartz en saison humide s'accompagne de la néoformation d'une argile silicatée fibreuse (palygorskite), la saison sèche restant l'apanage de la précipitation de calcite. Le système d'évolution est ici ternaire : quartz-palygorskite-calcite. Mais, dès que les solutions s'appauvrissent en magnésium, la palygorskite se dissout à son tour et on revient au cas précédent.

Ainsi ce type d'expérience a permis :

- d'élucider la mise en place des phénomènes d'épigénie dans les sols calcaires ;
- de préciser les conditions de formation des argiles fibreuses magnésiennes, type palygorskite, dans des conditions pédogénétiques.

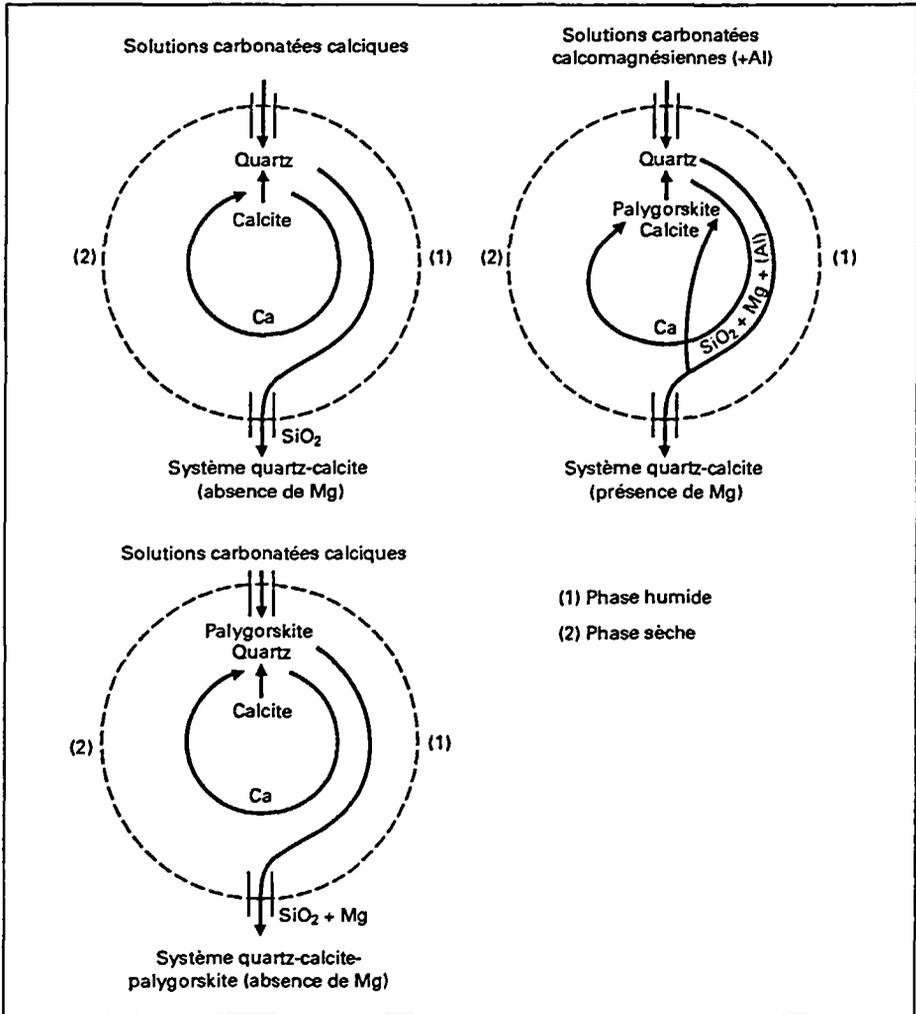


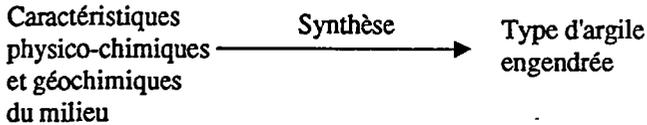
Figure 7. Relations quartz-calcite-palygorskite au cours de l'épigénie calcaire (HAUTIM *et al.*, 1983).

En conclusion

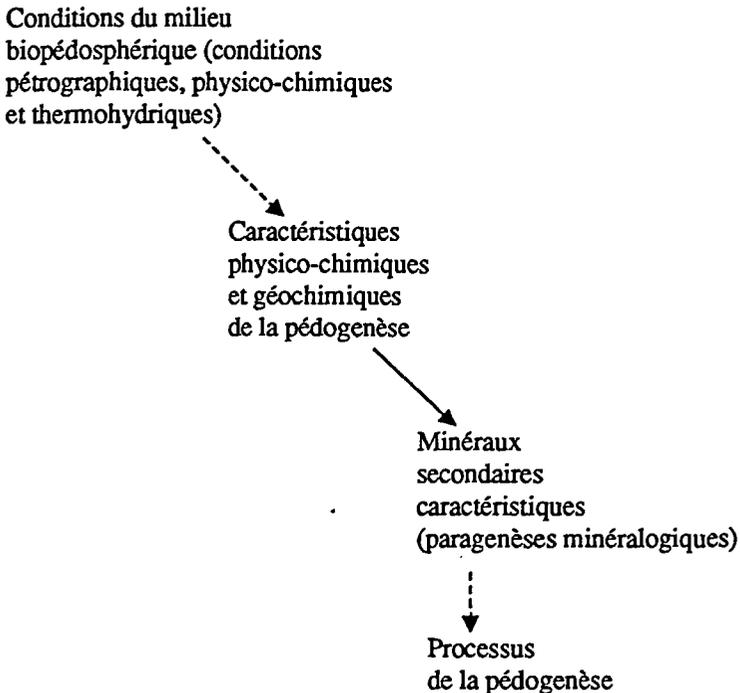
De cet ensemble de travaux de recherche, il est possible de dégager plusieurs enseignements, dont deux en particulier.

- Il existe une logique dans le développement géochimique des phénomènes pédogénétiques à la surface du globe.

A la bijection :



on peut maintenant substituer la séquence :



En ce qui concerne le milieu sialferrique, qui est le plus représenté à la surface du globe, on a pu ainsi aboutir à un cadre général (tabl. III) reliant zone bioclimatique, paragenèse caractéristique, processus pédologique et type de sol (PÉDRO, 1983, 1984).

- Les notions de stabilité et d'instabilité des minéraux ne sont pas des constantes définitives, en rapport seulement avec les caractéristiques structurales des édifices cristallins. C'est seulement en envisageant à chaque fois le couple « minéral-conditions du milieu » qu'on pourra envisager tous les cas de figure susceptibles d'être mis en œuvre à la surface du globe. Et c'est ce qui a permis de proposer le concept aujourd'hui si fécond de *système d'agression* (HÉNIN *et al.*, 1968).

Tableau III. Inventaire des processus pédologiques mis en jeu dans les principaux types de sol (PÉDRO, 1983, 1984).

Zone bioclimatique	Paragenèse caractéristique	Processus pédologique	Type de sol
Climat boréal	–	Podzolisation	Podzol
Climat tempéré froid	Aluminosiallite Goëthite	Feraluminisation	Sols ocre-podzoliques
Climat tempéré	Phyllite 2/1 Complexe ferohumique	Humosiallisation	Sols bruns
Climat tempéré chaud	Phyllite 2/1 Hydrates ferriques	Fersiallisation	Sols rouges fersiallitiques
Climats arides	Phyllite 2/1 CaCO ₃	Calcosiallisation	Tchernozem-Aridisols
Climats tropicaux			
Tropical sec	Smectite aluminoferrifère	Sialferrisation s.s	Vertisols
Tropical semi-humide	Smectite ferrifère (nontronite), kaolinite	Sialferrisation s.l	Sols bruns eutrophes tropicaux
Tropical humide	Kaolinite, gibbsite, goëthite, hématite	Ferrallitisation (latéritisation)	Sols ferrallitiques (oxisols)

Relations entre les argiles et le fonctionnement des sols : apport de la pédologie expérimentale fonctionnelle

Jusqu'ici nous nous sommes préoccupé de processus génétiques, c'est-à-dire en quelque sorte des processus princeps conduisant à l'édification de nouveaux minéraux au cours de la pédogenèse (argiles et autres constituants secondaires), en équilibre avec les conditions géochimiques du milieu de genèse. Mais il s'agit généralement de phénomènes à cinétique lente (conditions peu agressives : $\theta < 50$ °C, pression atmosphérique). Si l'on veut être complet, il faut s'intéresser aussi au comportement de tels minéraux en réaction aux variations permanentes des conditions pédoclimatiques, d'origine externe ou interne, qui sont inhérentes à la vie d'un sol. C'est toute la question de l'étude des phénomènes pédologiques à court terme (relativement rapides), qui sont à la base du fonctionnement récent et même actuel des sols.

De ce point de vue, qui a trait en définitive à la pédologie expérimentale fonctionnelle ou pédologie expérimentale *stricto sensu*, on peut aborder les choses de différentes manières :

- si on envisage le milieu même d'étude, il est possible de présenter les essais de laboratoire, puis les essais effectués *in situ* dans les conditions naturelles et dont les modalités sont orientées par les résultats obtenus *in vitro* ;

- si, en revanche, l'accent est mis sur la nature de l'évolution engendrée, géochimique ou microstructurale, c'est celle-ci qui doit servir de guide. Ce sera la voie choisie ici.

Au plan géochimique

Il faut citer tout d'abord les études expérimentales anciennes réalisées par BETREMIEUX (1951) et LOSSAINT (1959) notamment, consacrées à l'examen du comportement du fer en fonction des conditions physico-chimiques, en particulier des caractéristiques de l'oxydoréduction, et à la compréhension des processus d'hydromorphie (gley-pseudogley). Ces recherches ont été complétées ultérieurement par d'autres travaux, comme ceux de VIZIER (1983) sur l'hydromorphie tropicale et de divers auteurs sur le phénomène de ferrolyse (ESPIAU et PÉDRO, 1983). La cinétique de l'altération des minéraux et notamment ceux qui sont les plus solubles, étudiée en particulier par DELMAS (1979), fait partie aussi de cette approche.

Pour l'heure, la pédologie expérimentale fonctionnelle semble se déplacer vers le terrain et tente de préciser le comportement actuel des sols grâce à la méthode des minéraux tests ou minéraux indicateurs de milieu. Il s'agit de minéraux dont les types d'évolution ont pu être mis en relation, grâce aux études de laboratoire, avec des conditions de milieu bien déterminées. On peut citer par exemple la calcite, dont les formes de croissance ou de décroissance cristalline ont été précisées (DELMAS *et al.*, 1987), ou encore la vermiculite, qui est le prototype des minéraux phylliteux à interfaces très réactives (RANGER *et al.*, 1986). A partir de là, en plaçant des macrocristaux ou bien des sachets de minéraux, si ceux-ci sont en poudre, au sein même d'horizons de sols donnés, on est à même non seulement de préciser le fonctionnement géochimique annuel du sol en question, mais encore la nature de l'évolution saisonnière au sein des différents horizons du profil. Par exemple, décalcification ou calcification, protonisation ou aluminisation d'une argile vermiculitique... La figure 8 est une illustration de ce genre d'études dans le cas d'un sol du Jura (BERRIER *et al.*, 1987).

Actuellement, cette méthodologie en pleine expansion est en cours d'application, sous l'impulsion de M. Robert, aux principaux types de sol et dans différentes régions du monde.

Au plan microstructural

Cette approche concerne l'étude expérimentale de problèmes de pédoplasation, c'est-à-dire des modalités de l'arrangement des constituants plasmiques au sein des horizons du sol en fonction des conditions du milieu pédologique. Cette voie s'est beaucoup développée depuis cette dernière décennie, en particulier à Versailles, sous l'impulsion de D. Tessier.

En effet, les minéraux argileux du sol sont des minéraux hydratés, et tout le problème de la pédoplasation repose sur l'étude des relations morphologiques et énergétiques entre la phase solide (réseaux argileux) et la phase liquide (solution) qui lui est liée. Le schéma de la figure 9 montre à cet effet que les contraintes énergétiques, qui caractérisent toute solution interstitielle, dépendent des conditions climatiques (température, humidité, air...) pour la phase eau et des conditions géochimiques qui, par voie interne ou externe, déterminent sa composition, sa concentration et son acidité.

A partir de là, les travaux à réaliser impliquaient (TESSIER, 1984 ; ROBERT *et al.*, 1983 ; CHENU, 1985 ; AZZAOU, 1988) :

– tout d'abord de produire un ensemble de conditions expérimentales en rapport direct avec le milieu pédologique superficiel ;

– ensuite de disposer de moyens et de méthodes permettant d'étudier et d'observer des échantillons argileux hydratés et non remaniés (ce qui était loin d'être évident jusqu'à ces dernières années) ;

– enfin de pouvoir éventuellement s'appuyer sur de nouveaux outils conceptuels.

En ce qui concerne le premier point, pour avoir une vue synthétique des choses, il suffisait de faire varier au cours des essais les différents paramètres susceptibles de jouer un rôle, à savoir :

– le type minéralogique des argiles : kaolinites, illites et smectites notamment, en tenant compte en particulier de la charge des feuillets ;

– la nature des cations interfoliaires : Na, K, Ca, Mg, Al... ;

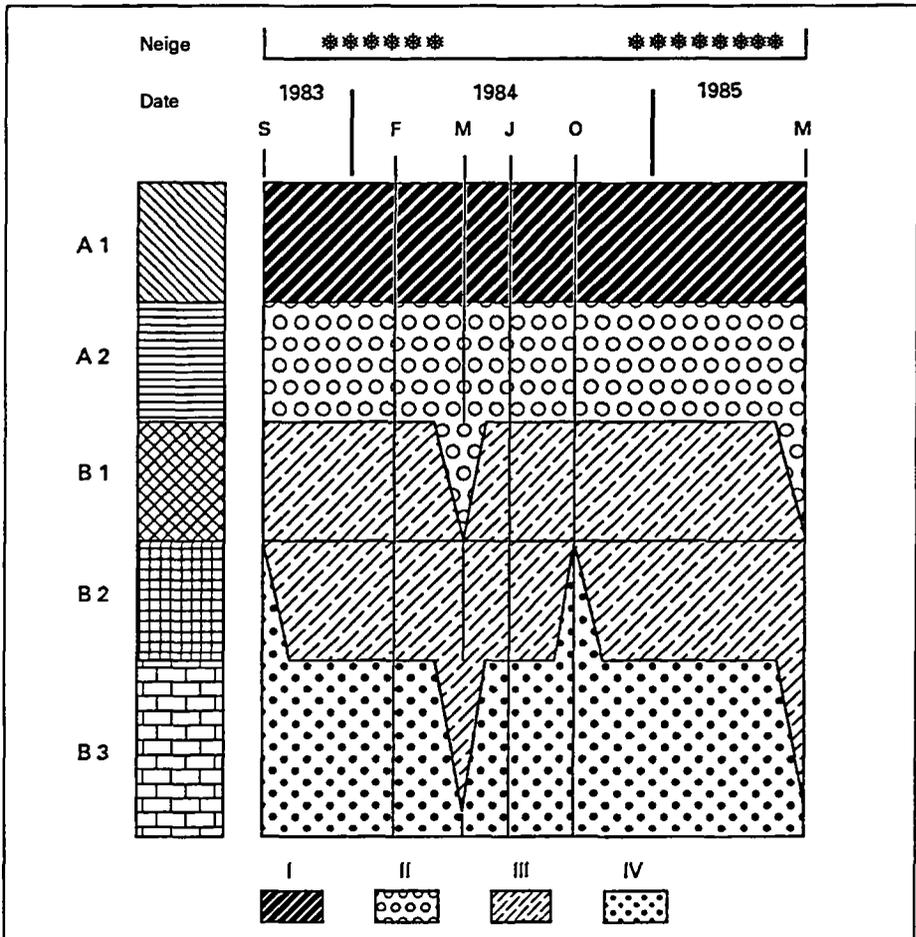


Figure 8. Etude du fonctionnement saisonnier d'un sol cryptopodzolique du Jura d'après la morphologie des figures de corrosion de cristaux de calcite.

Mai (fonte des neiges). Octobre (fin saison estivale).

I, II et III : morphologies de milieux acides, l'intensité de l'acidité organique diminuant de I à III. IV : morphologies de milieu calcique sous-saturé.

(BERRIER *et al.*, 1987.)

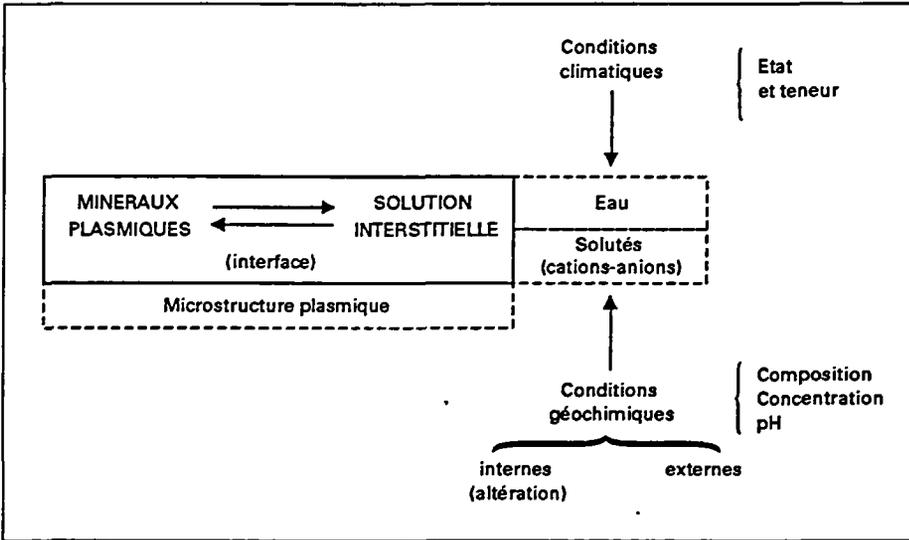


Figure 9. Présentation des principaux paramètres susceptibles d'intervenir au cours de la microstructuration plasmique (PÉDRO, 1989).

- la concentration des solutions du milieu interstitiel : 10^{-4} M à M ;
- la nature des constituants associés : oxydes, composés organiques, carbonates, sels... ;
- la contrainte hydrique, donc l'activité de l'eau d'imbibition : depuis 1 (eau libre) jusqu'à 0,48 (suction : 100 MPa), qui correspond à la dessiccation à l'air sec ;
- l'histoire hydrique, en procédant à des alternances d'humectation et de dessiccation ;
- les contraintes mécaniques (comme cela peut se produire en relation avec les poussées racinaires au cours de la croissance des plantes ou encore avec l'intervention des instruments aratoires lors des façons culturales).

Pour ce qui a trait au deuxième point, il était nécessaire de pouvoir utiliser de concert plusieurs méthodes performantes et modernes, méthodes qui n'existaient pas au moment où S. Hénin et J. Mering développaient leurs recherches personnelles dans ce domaine. Il s'agit plus particulièrement :

- du microscope électronique à balayage, qui conduit à préciser l'agencement spatial des unités constitutives argileuses les unes par rapport aux autres ;
- de la microscopie électronique à transmission, qui permet de visualiser en détail les unités, et surtout de la haute résolution (METHR), grâce à laquelle on peut observer les feuillet eux-mêmes, puis les dénombrer au sein des unités ;
- de la diffusion des rayons X aux petits angles, grâce à laquelle on a la possibilité de mesurer des distances interparticulaires allant jusqu'à 500 nm, ce qui conduit à une approche quantitative des phénomènes d'agencement.

Quant au troisième point, c'est-à-dire l'appui de nouveaux outils conceptuels, il s'agit essentiellement de la théorie des objets fractals de B. Mandelbrot qui, ainsi que l'a montré récemment H. Van Damme, s'applique parfaitement aux matériaux argileux (BEN OHOUD et VAN DAMME, 1990).

Un grand nombre de résultats a été obtenu et, à titre d'exemple, je m'en tiendrai aux données relatives aux smectites-montmorillonites, qui sont les plus argileuses des argiles.

Pour ces constituants argileux, l'empilement ordonné de feuillets élémentaires conduit à des entités souples qui ont été dénommées « sous-empilement » (sorte de cristallite flexible) et dont la superposition par chevauchement latéral donne naissance à une sorte de voile très étalé auquel on a réservé le terme de quasicristal ou de tactoïde, et qui constituent les unités spécifiques de ce type d'argile (fig. 10). C'est l'arrangement tridimensionnel de ces tactoïdes qui conduit à l'édification d'un réseau continu, caractérisé par une grande microporosité et ayant de ce fait les propriétés d'une éponge (fig. 11).

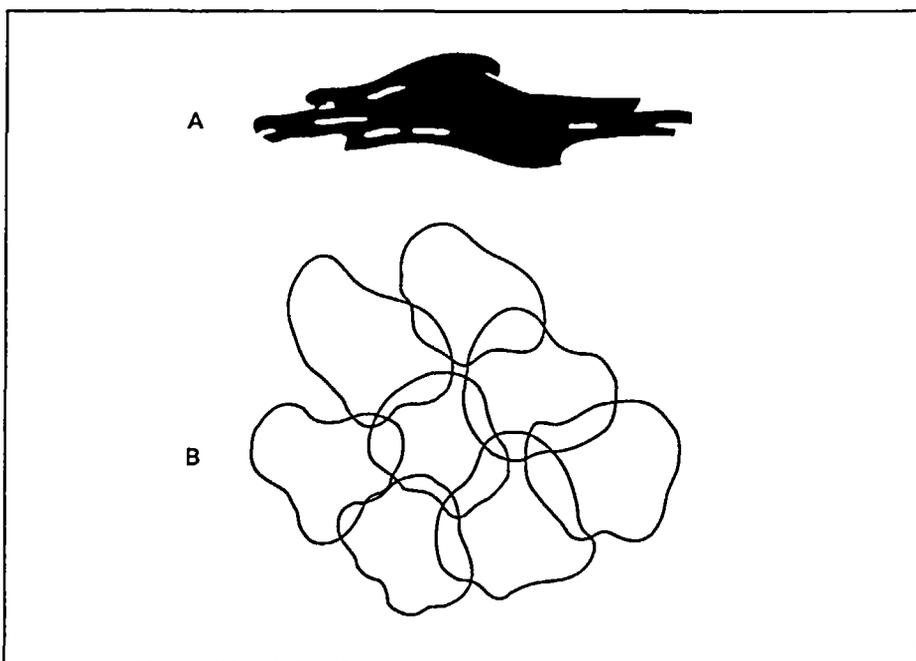


Figure 10. Représentation schématique d'un quasicristal de smectite (TESSIER, 1984).

Ceci est valable pour toutes les smectites. En revanche, le nombre de feuillets constituant le sous-empilement, l'épaisseur et l'étalement dans le plan du quasicristal, le diamètre du réseau poreux... dépendent, eux, de deux sortes de paramètres :

- la nature de la smectite : sa charge et sa constitution cristalochimique (montmorillonite-beidellite) ;
- pour une espèce smectitique donnée, les conditions du milieu, à savoir la nature du cation échangeable, la concentration de la solution, la valeur de la contrainte hydrique...

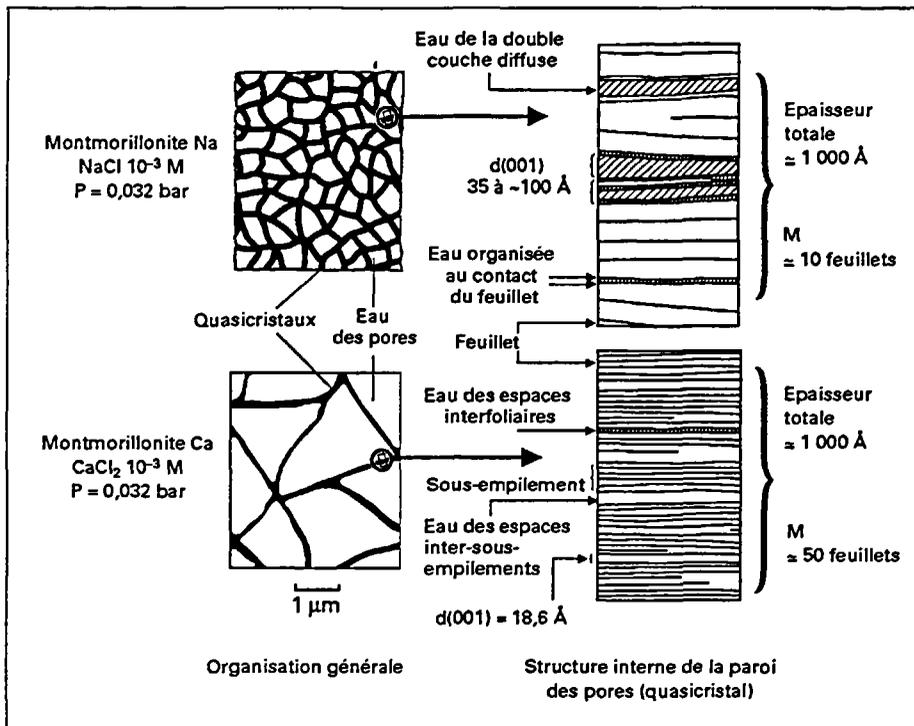


Figure 11. Organisation générale (réseau) et constitution des parois dans les argiles de type smectite (Na et Ca).
(PONS, 1980 ; TESSIER, 1984.)

Deux schémas permettent d'illustrer simplement cet état des choses.

Le premier schéma compare la même smectite Na et Ca dans les mêmes conditions de milieu, avec une faible contrainte hydrique : 0,032 bar ($pF = 1,5$) et solutions diluées ($10^{-3} M$) (fig. 11).

Ainsi les argiles Na sont caractérisées par un réseau à petits pores et dont les parois sont constituées par un petit nombre de feuillets (8) séparés par d'épaisses couches diffuses d'eau interfoliaire (en sorte que $d(001) = 85 \text{ \AA}$).

En revanche, les smectites Ca présentent un réseau à larges pores avec des parois de même épaisseur que précédemment, mais constituées différemment : grand nombre de feuillets (≈ 55), mais avec un petit nombre de couches monomoléculaires d'eau (3) ; d'où $d(001) = 20 \text{ \AA}$.

Le second schéma montre le rôle des contraintes hydriques dans l'évolution de la microstructure d'un même minéral : une montmorillonite Na en milieu concentré ($\text{NaCl } M$). Les caractéristiques sont respectivement les suivantes, de haut en bas (planche 1) :

- pF : 1,5 ; 3,0 ; 4,0 ;
- teneur en eau W (%) : 369 ; 114 ; 82 ;
- volume (cm^3/g) : 4 ; 1,5 ; 1,2.

L'aspect microstructural apparaît dans la planche 1.

On constate aisément les relations strictes qui s'établissent entre les paramètres hydriques et l'aspect microstructural. C'est ainsi que, lors de la dessiccation, le réseau tend à s'aplatir, puis à se chiffonner, afin d'occuper un espace de plus en plus restreint.

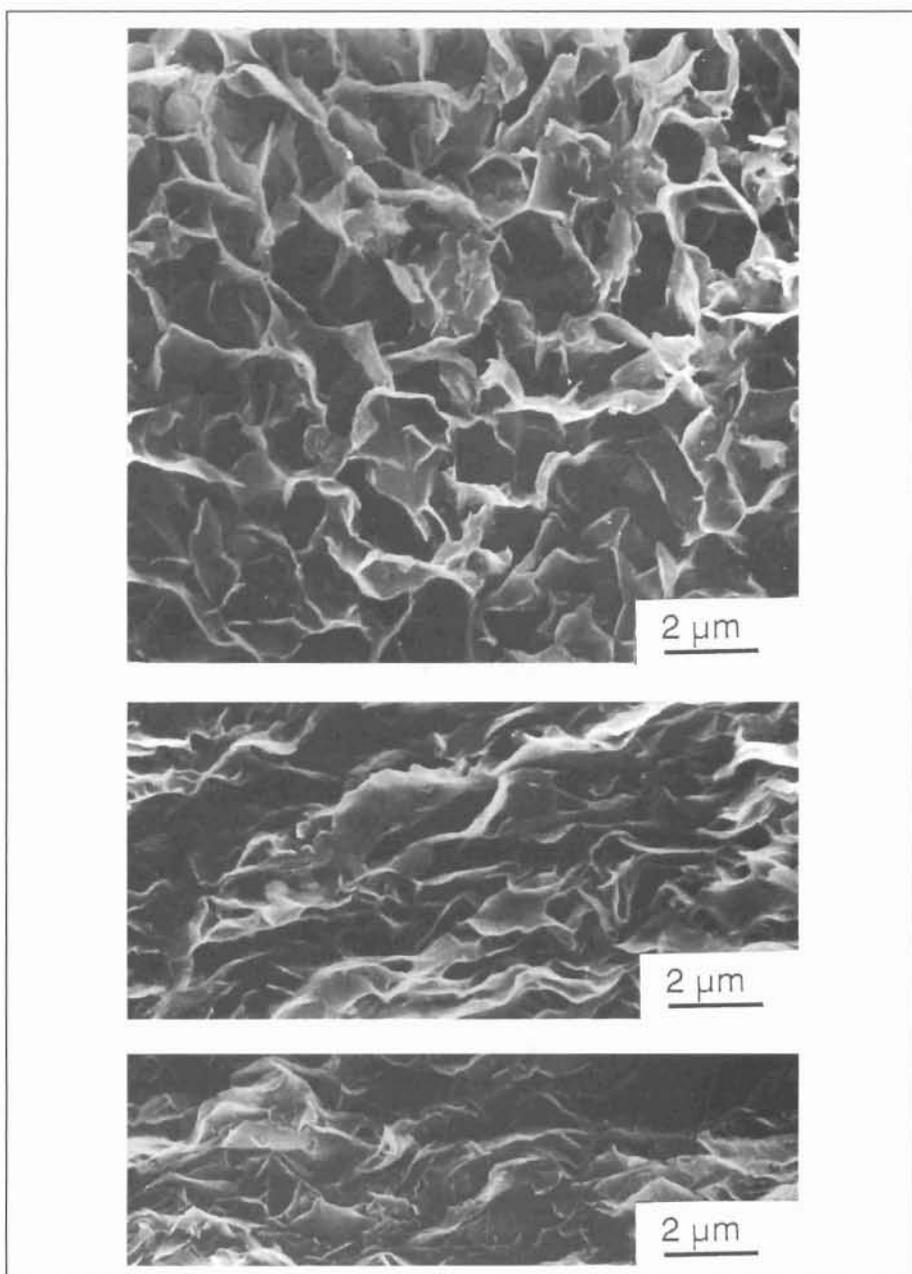


Planche 1. Evolution simultanée de l'organisation et du volume de l'échantillon en fonction du degré de dessiccation (TESSIER, 1984).

Conséquences générales

Les résultats obtenus au travers de cette approche expérimentale font ressortir un certain nombre de points, dont deux plus particulièrement :

- une meilleure caractérisation des minéraux argileux des sols, grâce à une nouvelle formulation des problèmes relatifs à la minéralogie des argiles ;
- l'interdépendance des différents phénomènes affectant le milieu sol, qu'ils soient d'ordre physique, hydrique, physico-chimique, géochimique, minéralogique.

NOUVELLE FORMULATION MINÉRALOGIQUE DES ARGILES

A l'issue de la période colloïdale et préminéralogique, la méthode des poudres en diffraction X a fait faire un grand pas à la connaissance des argiles, mais la vision à laquelle elle a conduit en s'appuyant sur les unités structurales élémentaires n'était pas totalement satisfaisante, les argiles n'étant pas en fait des phyllites ordinaires, mais des minéraux cryptocristallins et de petite taille. En effet, tous les phénomènes susceptibles d'aller au-delà de l'épaisseur du feuillet, dont ceux par exemple s'apparentant aux problèmes de surstructure liés à l'empilement des feuillets, sont d'accès difficile dans le cas des argiles, alors qu'ils peuvent être appréhendés convenablement dans le cas des macrocristaux (polytypes). De ce fait, les notions d'interstratification (liées à la superposition d'unités foliaires différentes) et de cristallinité (cas des argiles micacées : illites) ne pouvaient être qu'imprécises.

Les nouvelles investigations (PÉDRO et TESSIER, 1983 ; PÉDRO, 1987) ont permis de dépasser cette vision quelque peu restrictive, en établissant que la caractérisation de tout constituant argileux impliquait d'avoir des informations non seulement sur la structure élémentaire, qui se trouve à l'échelle du feuillet (type et constitution cristallographique) et de l'espace interfoliaire, mais aussi sur la texture, c'est-à-dire la constitution, la dimension et la morphologie des individus cristallins hydratés caractéristiques, et sur la disposition mutuelle des individus cristallins les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire sur l'assemblage plasmique (*fabric*).

L'approche préconisée grâce aux recherches récentes tend donc à dépasser le stade quelque peu « inerte » de la minéralogie des phyllites et à tenir compte désormais du caractère évolutif, et on pourrait même dire « semi-vivant », du plasma ; d'où une caractérisation reposant sur plusieurs niveaux emboîtés, voisine de celle utilisée pour les protéines, avec des organisations faisant appel par analogie à des structures primaire (feuillet), secondaire (particule monocristalline), tertiaire (entité polycristalline) et enfin quaternaire (type d'assemblage).

Le tableau IV présente les niveaux d'organisation caractérisant les trois principales argiles des sols : kaolinites (argiles 1/1), illites et smectites (argiles 2/1).

L'enseignement à tirer *in fine* dans ce domaine est que la méthode des poudres de Debye et Scherrer s'est présentée comme un outil d'étude de la matière argileuse trop performant, puisqu'elle a permis d'atteindre la structure intime moyenne du matériau, en enjambant allègrement tous les stades intermédiaires, qui sont pourtant, eux aussi, des stades d'organisation de cette matière. Pour prendre une comparaison avec la matière vivante, c'est comme si l'on avait eu la possibilité d'identifier et de caractériser directement les gènes, sans se préoccuper du fait que ceux-ci sont localisés sur des chromosomes, que les chromosomes se situent dans des noyaux, que des noyaux appartiennent à des cellules, que les cellules constituent des tissus...

Tableau IV. Niveaux d'organisation caractérisant les trois principales argiles des sols (PÉDRO et TESSIER, 1985).

Niveau	Kaolinites	Illites	Smectites
Structure (I)	Unité structurale (feuillelet + interfeuillelet)	Unité structurale	Unité structurale
Texture			
Entité monocristalline (II)	Cristallite	Cristallite	Cristallite (sous-empilement)
Entité polycristalline (III)	-	Microdomaine	Quasicristal
Assemblage plasmique (IV)	-	-	Réseau

VISION UNIFIÉE DES PHÉNOMÈNES DANS LE SOL (PÉDRO, 1989)

A partir du moment où le sol n'est pas appréhendé comme une matière solide pulvérulente et anhydre, mais bien comme un système « solide-eau », dans lequel la phase aqueuse peut être liée et en même temps contenir divers éléments chimiques (solution), il devient évident qu'on est amené à prôner une vision unifiée des différents phénomènes susceptibles d'intervenir dans le sol, qu'ils soient d'ordre physique, hydrique, chimique, géochimique ou minéralogique. Les données expérimentales ont montré dans ce domaine la pertinence de l'application du cycle de Hess à la solution du sol (BOURRIÉ et PÉDRO, 1979 ; fig. 12), le potentiel de l'eau pouvant s'écrire :

$$\Psi = \Psi_p + \Psi'_\phi = \Psi_\phi + \Psi'_p$$

avec :

- Ψ_p = potentiel de pression, qui représente les interactions eau-solide, l'eau étant libre (Ψ_p) ou liée (Ψ'_p) ;

- Ψ_ϕ = potentiel osmotique qui rend compte des interactions eau-électrolyte, la phase aqueuse pouvant elle-même être libre (Ψ_ϕ) ou liée (Ψ'_ϕ).

Ceci a comme conséquences l'existence d'une véritable correspondance entre des caractéristiques hydriques, telles que pF ou potentiel de l'eau en relation avec la pression, et des critères physico-chimiques comme l'activité de l'eau, par exemple. Le tableau V fait état de ces équivalences en les mettant de plus en relation avec des données pédoclimatiques (température, humidité relative) et géochimiques (composition et concentration des solutions interstitielles).

Enfin, dans cet ordre d'idées, il est bon de faire ressortir le rôle et la signification d'un paramètre clé en science des sols, tel que la capacité d'échange de cations. Les études récentes sur les argiles ont montré en effet que :

- l'existence d'une relation nette entre CEC et surface spécifique des argiles permettait de faire de la capacité d'échange un reflet non seulement de la structure des feuillettes 2/1, mais surtout de la texture effective du constituant (fig. 13) ;

- il y avait une relation étroite entre la capacité d'échange et d'autres propriétés du matériau, comme sa rétention en eau ou encore son volume poral (BRUAND *et al.*, 1988).

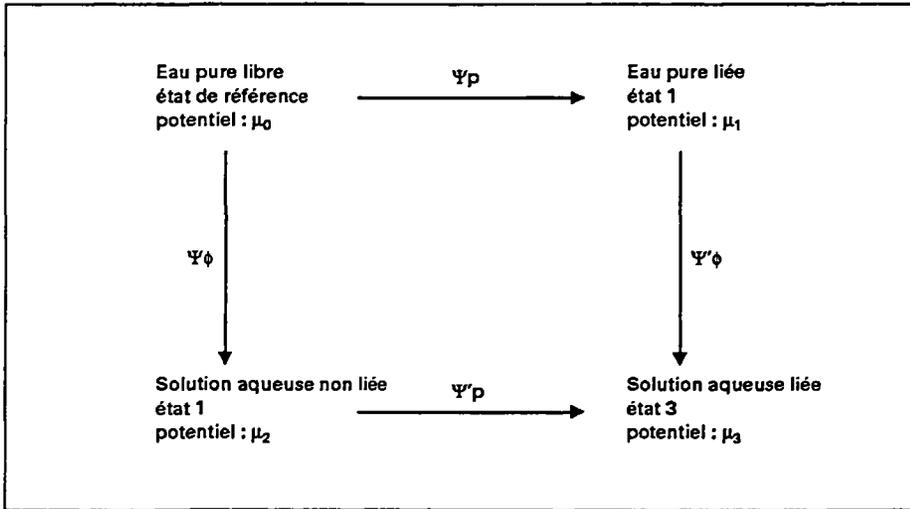


Figure 12. Application du cycle de Hess à l'eau du sol (BOURRIÉ et PÉDRO, 1979).

Tableau V. Correspondance entre les contraintes hydriques et les paramètres thermodynamiques. Relation avec les caractéristiques climatiques et géochimiques du milieu.

Activité de l'eau {aw}	Pression de gaz (bars)	Pression de gaz (kPa)	pF	Force ionique	Température de congélation [°C]	Humidité relative (%)
0,999993	0,010	1	1	$2,2 \cdot 10^{-4}$		99,9993
0,999927	0,100	10	2	$2,2 \cdot 10^{-3}$		99,9927
0,99927	1	100	3	$2,2 \cdot 10^{-2}$	-0,08	99,927
0,9927	10	1 000	4	$2,2 \cdot 10^{-1}$	-0,80	99,27
0,9888	15,8	1 580	4,2	$3,38 \cdot 10^{-1}$	-1,26	98,88
0,9669	46,4	4 640	4,67	1,0		96,69
0,927	100	10^4	5	2,2	-8,37	92,7
0,80	305	$3,05 \cdot 10^4$	5,48	6,0		80
0,695	500	$5,00 \cdot 10^4$	5,7			69,5
0,484	1 000	10^5	6		-81	48,4

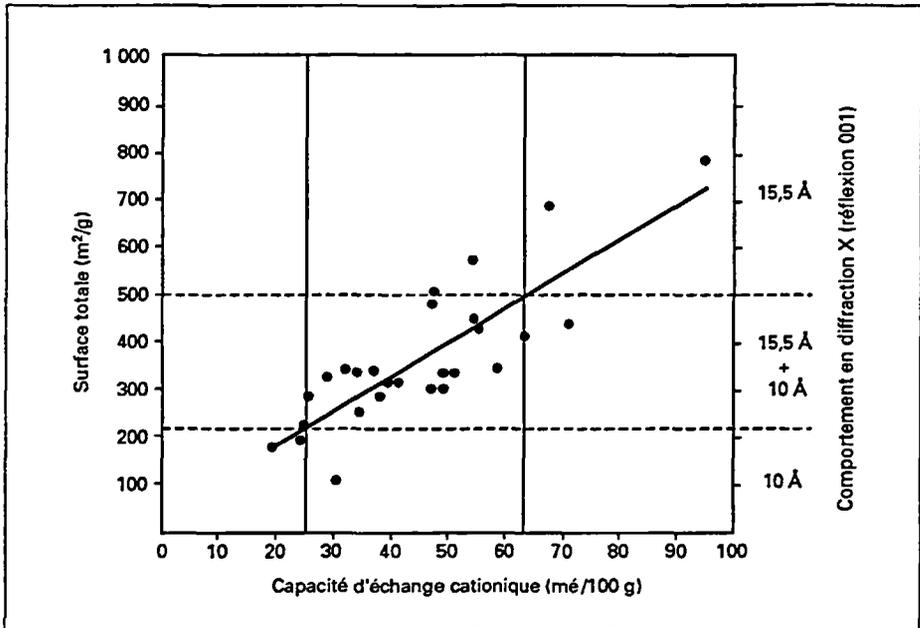


Figure 13. Relations entre la capacité d'échange et la surface totale des argiles dans le cas des constituants 2/1. Correspondance avec la valeur $d(001)$. (TESSIER, comm. pers.)

Conclusion

Il me reste maintenant à conclure cette contribution, bien incomplète et bien imparfaite, en l'honneur de S. Hénin. Je le ferai non pas en revenant aux résultats obtenus depuis 1930 dans le domaine en question, mais plutôt en considérant la manière par laquelle ces derniers ont été obtenus, et en gardant en arrière-plan ce que disait Jean Rostand à propos des maîtres de la biologie : « *Ce qu'ils furent ne nous importe pas moins que ce qu'ils firent* ».

Dans le domaine des sols, milieu naturel complexe par excellence, à la frontière de l'inerte et du vivant, S. Hénin me semble, au cours de sa carrière, avoir montré une grande constance sur un certain nombre de points. J'en retiendrai ici quatre.

- Le premier point concerne le rôle des sciences fondamentales, avec la nécessité de les introduire dans notre discipline, mais de façon réfléchie et rationnelle. Il est bon de rappeler ici que S. Hénin a été amené à structurer les recherches en science des sols en trois niveaux, les mécanismes, les phénomènes, les objets, tout en précisant que ces trois niveaux avaient leur nécessité et que chacun répondait à un objectif défini ; ce qui signifie que si on étudie des mécanismes, il faut savoir dans quels phénomènes ils sont mis en œuvre, et que si on appréhende les phénomènes il faut surtout les adapter aux objets auxquels ils s'appliquent.

Ainsi y a-t-il une obligation impérieuse de dépasser le stade de l'observation, méthode de base pour l'étude du milieu naturel ; à condition de faire ce développement dans un ordre méthodologique donné : objets-phénomènes-mécanismes.

• Le deuxième point a trait à l'intérêt d'une introduction de la méthode expérimentale ; d'où la nécessité de mettre en œuvre une pédologie expérimentale, qui est apparue à S. Hénin comme une voie tout à fait appropriée si l'on veut d'abord sérier les problèmes de la recherche pédologique, en second lieu établir des liens entre, d'une part, des objets complexes de la nature (sols) et, d'autre part, les développements spécifiques aux sciences fondamentales.

Etant bien entendu que, si la pédologie expérimentale apporte toujours des données précises, celles-ci ne doivent être considérées que comme des références sûres, et non pas comme l'unique vérité. Dans ce domaine, comme dans beaucoup d'autres, plusieurs chemins mènent à Rome !

• La troisième leçon concerne la place assignée aux moyens dans l'approche scientifique. Elle peut s'exprimer comme suit : si les moyens et les techniques à mettre en œuvre sont certes très importants, et même de plus en plus importants pour les progrès de la connaissance, l'originalité vient essentiellement de l'intuition dans l'émergence des pistes de recherche et de l'investissement intellectuel dans leur résolution.

• Enfin, le quatrième et dernier point a trait au rôle des hommes dans le développement de la science. Un tel développement en effet implique pour vous, Monsieur – et toute la conduite de votre carrière en est une parfaite illustration –, de prendre les ouvriers et les bonnes volontés là où on peut les trouver, tant à l'intérieur des frontières qu'à l'extérieur ; ce qui est la marque de votre conviction que la science se fait plus par les hommes que par les organismes, et qu'en définitive l'aspect intellectuel passe toujours avant l'aspect institutionnel, même si à notre époque ce dernier est beaucoup plus à prendre en compte que par le passé.

Bibliographie

Synthèse des argiles

CAILLÈRE (S.), HÉNIN (S.), 1962. « Vue d'ensemble sur le problème de la synthèse des minéraux phylliteux à basse température ». In Colloque international CNRS « Genèse et synthèse des argiles », 1961, p. 31-43.

DECARREAU (A.), 1983. Etude expérimentale de la cristallogénèse des smectites. *Sci. Géol.* (Strasbourg), *Mém.* 74, 184 p.

ESQUEVIN (J.), 1958. *Les silicates de zinc. Etude de produits de synthèse et des minéraux naturels.* Thèse doctorat, Université Paris, 86 p.

ESTEOULE (J.), 1969. *Contribution à la genèse des argiles dioctaédriques dans les conditions de surface. Transformation expérimentale de feuillets trioctaédriques en feuillets dioctaédriques à basse température et pression normale.* Thèse doctorat sciences, Rennes, 116 p.

HÉNIN (S.), 1947. « La formation des argiles et la pédologie ». In Conférence de Pédologie méditerranéenne, Montpellier-Alger, p. 97-108.

HÉNIN (S.), ROBICHET (O.), 1953. Sur les conditions de formation des minéraux argileux par voie expérimentale à basse température. *C.R. Acad. Sci.*, 236 : 517-519.

HÉNIN (S.), CAILLÈRE (S.), 1963. Synthèse des minéraux à basse température : essai de mise au point. *Clay Miner. Bull.*, 5, 30 : 265-271.

SIFFERT (B.), 1962. *Quelques réactions de la silice en solution. La formation des argiles.* Mémoire Service Carte Géol. Als. Lor., n° 21, 86 p.

SIFFERT (B.), WEY (R.), 1961. Sur la synthèse de la kaolinite à température ordinaire. *C.R. Acad. Sci.*, 253 : 142-144.

Classification des argiles

CAILLÈRE (S.), HÉNIN (S.), 1957. Propositions pour normaliser la nomenclature des minéraux argile. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, 9 : 77-83.

CAILLÈRE (S.), HÉNIN (S.), 1963. *Minéralogie des argiles*. Paris, Masson, 343 p.

HÉNIN (S.), 1956. Classification des minéraux argileux. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, 8 : 29-35.

PÉDRO (G.), 1965. *La classification des minéraux argileux (phyllosilicates)*. *Ann. Agron.*, n° hors série, 108 p.

Altération géochimique

HÉNIN (S.), PÉDRO (G.), 1965. « The laboratory weathering of rocks ». In *Experimental pedology* (Symposium, Nottingham). E.G. Hallsworth, D.V. Crawford (eds). London, Butterworths, p. 29-39.

HÉNIN (S.), PÉDRO (G.), ROBERT (M.), 1968. « Considérations sur les notions de stabilité et d'instabilité des minéraux en fonction des conditions du milieu : essai de classification des systèmes d'agression ». In *Transactions of the 9th International Congress of Soil Science*, Adelaïde, Australia, 1968. Sydney, International Society of Soil Science and Angus and Robertson Ltd, IV, p. 511-522.

PÉDRO (G.), 1964. *Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines*. Thèse doctorat sciences, Paris, 345 p.

TRICHET (J.), 1969. *Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques*. Thèse doctorat sciences, Paris, 231 p.

Altération biogéochimique

Transformation des argiles

ANDREOLI (C.), 1989. *Evolution des phyllosilicates 2/1 en fonction de la dynamique du potassium*. Thèse doctorat, Université Paris VI, Inra, 233 p.

RAZZAGHE (M.), 1976. *Contribution à l'étude expérimentale des phénomènes d'altération en milieu organique acide*. Thèse doctorat sciences, Paris, 222 p.

ROBERT (M.), 1970. *Etude expérimentale de la désagrégation du granite et de l'évolution des micas*. Thèse doctorat sciences, Paris, Inra, 115 p.

ROBERT (M.), PÉDRO (G.), 1972. « Etablissement d'un schéma de l'évolution expérimentale des micas dioctaédriques en fonction des conditions du milieu ». In *IV^e Conférence internationale des argiles*, Madrid, p. 433-447.

Altération biologique

BERTHELIN (J.), 1975. *Etude expérimentale de mécanismes d'altération des minéraux par des microorganismes hétérotrophes*. Thèse doctorat sciences, Nancy, 198 p.

CALLOT (G.), CHAMAYOU (H.), BULLOCK (P.), MURPHY (C.P.), 1984. Observations de concentrations argileuses dans les structures racinaires au cours des transformations pédologiques. *C.R. Acad. Sci.* 299, II, 12 ; 825-830.

CALLOT (G.), MAURETTE (M.), POTTIER (L.), DUBOIS (A.), 1987. Biogenic etching of microfractures in amorphous and crystalline silicates. *Nature*, 328, 6126 : 147-149.

Epigénie

BESSON (H.), CAILLÈRE (S.), HÉNIN (S.), 1977. Modalités de néogénèse dans les systèmes hétérogènes renfermant des phases peu solubles. *Clay Miner.*, 12 : 239-244.

HALTIM (A.), ROBERT (M.), PÉDRO (G.), 1983. « Etude expérimentale de l'épigénie calcaire des silicates en milieu confiné : caractérisation des conditions de son développement et des modalités de sa mise en jeu ». Colloque CNRS : Pétrologie des altérations et des sols. *Sci. Géol.* (Strasbourg), 71, 1 : 63-73.

HÉNIN (S.), PÉDRO (G.), 1979. « Rôle de l'hétérogénéité minéralogique du milieu sur les modalités de l'altération ». Séminaire Afes, 7-8 février 1978 : Altération des roches cristallines en milieu superficiel. *Sci. Sol*, 2-3 : 209-221.

Géochimie des phénomènes pédologiques

PÉDRO (G.), 1966. Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle aluminosilicique). *C.R. Acad. Sci.*, 262, D : 1828-1831.

PÉDRO (G.), 1979. « Caractérisation générale des processus de l'altération hydrolytique. Base des méthodes géochimiques et thermodynamiques ». Séminaire Afes, 7-8 février 1978 : Altération des roches cristallines en milieu superficiel. *Sci. Sol*, 2-3 : 93-105.

PÉDRO (G.), 1983. Structuring of some basic pedological processes. *Geoderma*, 31 : 289-299.

PÉDRO (G.), 1984. La genèse des argiles pédologiques. Ses implications minéralogiques physico-chimiques et hydriques. *Sci.Géol.*, (Strasbourg), *Bull.* 37, 4 : 333-347.

Pédologie expérimentale fonctionnelle

BERRIER (J.), DELMAS (A.B.), BRESSON (L.M.), 1987. « Fonctionnement saisonnier et instantané d'un système d'altération calcaire. Approche micromorphologique ». In *Micromorphologie des sols*. Actes de la VII^e Réunion internationale de micromorphologie des sols, Paris, juillet 1985. N. Feodoroff, L.M. Bresson, M.A. Courty (éd.). Paris, Afes, p. 309-314.

BETRÉMÉUX (R.), 1951. Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. Agron.*, 3 : 193-295.

DELMAS (A.B.), 1979. *Etude expérimentale du phénomène de dissolution des sels et des silicates. Approche cinétique*. Thèse doctorat sciences, Paris, 256 p.

DELMAS (A.B.), BERRIER (J.), 1987. « Les figures de corrosion de la calcite : typologie et séquences évolutives ». In *Micromorphologie des sols*. Actes de la VII^e Réunion internationale de micromorphologie des sols, Paris, juillet 1985. N. Feodoroff, L.M. Bresson, M.A. Courty (éd.). Paris, Afes, p. 303-308.

ESPIAU (P.), PÉDRO (G.), 1983. Etude du phénomène de ferrolyse par voie expérimentale. Production d'acidité d'échange et mise en évidence du rôle catalytique des minéraux argileux. *Sci. Sol*, 3-4 : 173-184.

HÉNIN (S.), BETRÉMÉUX (R.), 1948. Essai de pédologie expérimentale. *C.R. Acad. Sci.*, 227 : 1393-1395.

LOSSAINT (P.), 1959. Etude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. *Ann. Agron.*, 4 : 369-414 ; 5 : 493-542.

RANGER (J.), ROBERT (M.), BERTHELIN (J.), NYS (C.), 1986. Utilisation de la méthode des minéraux tests pour la connaissance du fonctionnement actuel des sols forestiers. *Sci. Sol*, 2 : 183-199.

RANGER (J.), ROBERT (M.), BONNEAU (M.), NYS (C.), 1990. Les minéraux-tests, une approche expérimentale *in situ* de l'altération biologique et du fonctionnement des écosystèmes forestiers. Effets des types de sols et des essences feuillues et résineuses. *Ann. Sci. For.*, 4 : 529-550.

VIZIER (J.F.), 1983. *Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées. Dynamique du fer et différenciation des profils*. Paris, Orstom, 249 p. (Travaux et documents, n° 165).

Etude expérimentale de la pédoplasation

AZZAOU (M.), 1988. *Comportement et organisation de matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de forces d'hydratation*. Thèse doctorat, Université Paris VI, Inra, 240 p.

CHENU (C.), 1985. *Etude expérimentale des interactions argiles-polysaccharides neutres. Contribution à l'étude des phénomènes d'agrégation d'origine biologique dans les sols*. Thèse doctorat, Université Paris, 198 p.

PONS (C.H.), 1980. *Mise en évidence des relations entre la texture et la structure dans les systèmes eau-smectites par diffusion aux petits angles du rayonnement synchrotron*. Thèse doctorat sciences, Orléans.

ROBERT (M.), VENEAU (G.), HERVIO (M.), 1983. Rôle des composés amorphes du fer et de l'aluminium sur quelques propriétés des argiles. Influence du degré d'hydroxylation du cation. *Sci. Sol*, 3-4 : 235-251.

TESSIER (D.), 1984. *Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Thèse doctorat sciences, Université Paris VII. Versailles, Inra, 361 p.

TESSIER (D.), PÉDRO (G.), 1984. « Recherches sur le rôle des minéraux argileux dans l'organisation et dans le comportement des sols ». In Livre Jubilaire du Cinquantenaire Afes (1934-1984). Paris, Afes, p. 223-234.

BEN HOUD (M.), VAN DAMME (H.), 1990. La texture fractale des argiles gonflantes. *C.R. Acad. Sci.*, 311, II : 665-670.

Nouvelle formulation minéralogique des argiles

PÉDRO (G.), 1987. « Current aspects of the mineralogy of clays and soils ». In Proceedings of the 20th Colloquium of the International Potash Institute, Baden bei Wien, Austria. Berne, IPI, p. 11-43.

PÉDRO (G.), TESSIER (D.), 1985. « Importance de la prise en compte des paramètres texturaux dans la caractérisation des argiles ». In Transactions of the 5th Meeting of the European Clay Groups, Prague, 1983, p. 417-428.

TESSIER (D.), PÉDRO (G.), 1987. « Mineralogical characterization of 2:1 clays in soils : importance of the clay texture ». In Proceedings of the International Clay Conference, Denver, 1985. L.G. Schultz, H. van Olphen, F.A. Mumpton (eds). Bloomington, The Clay Mineral Society, p. 78-84.

Vision unifiée des phénomènes dans le sol

BOURRIÉ (G.), PÉDRO (G.), 1979. La notion de pF, sa signification physico-chimique et ses implications pédogénétiques. I. Signification physico-chimique. Relation entre le pF et l'activité de l'eau. *Sci. Sol*, 4 : 313-322.

BOURRIÉ (G.), TESSIER (D.), PÉDRO (G.), 1983. « Considérations sur les phénomènes d'altération dans les systèmes à eau liée ($a_w < 1$) ». Colloque CNRS : Pétrologie des altérations et des sols. *Sci. Géol.* (Strasbourg), 71, 1 : 25-33.

BRUAND (A.), TESSIER (D.), BAIZE (D.), 1988. Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la phase argileuse. *C.R. Acad. Sci.*, 307, II : 1937-1941.

PÉDRO (G.), 1989. « Geochemistry, mineralogy and microfabric of soils ». In *Soils and their management : a sino-european perspective*. Amsterdam, Elsevier Applied Science, p. 59-90.