

## Le sol et son analyse

par Marc Pansu

### Formation des sols

Les sols constituent une pellicule mieux dénommée *couverture pédologique*, d'épaisseur négligeable à l'échelle de la planète, partie superficielle de l'écorce terrestre elle-même de faible épaisseur (16 km).

A l'échelle géologique leur formation, résultant de l'altération des roches, comprend des cycles courts de quelques milliers d'années (depuis la fin de la dernière période glaciaire) et des cycles longs de plusieurs centaines de milliers d'années, avec des processus distincts dans les zones de climat tempéré ou froid et les zones de climat chaud. L'épaisseur des sols peut varier de quelques millimètres en régions froides à quelques décimètres sous les tropiques humides ; elle se situe généralement entre quelques décimètres en climat tempéré et quelques mètres en climat tropical.

Les matériaux minéraux venant à affleurer par suite de phénomènes d'éruption, érosion ou apport sont progressivement colonisés par la végétation. La photosynthèse fixe le carbone atmosphérique et le transmet au sol par production de *nécromasse* (litières épi-gées et racinaires) et *exsudation* des racines. La partie organique non encore minéralisée par la faune et les microorganismes engendre le développement d'un horizon superficiel *humifère*. A cette phase initiale succède la formation plus lente d'un horizon minéral d'altération. Les horizons minéraux et organiques peuvent aussi évoluer par

des processus de migration et de mélange.

La classification française des sols établie en 1967 différencie douze grands types de sols terrestres selon leur type de formation (pédogenèse). En fait, il existe de nombreux états intermédiaires d'évolution et la cartographie précise des types de sols est souvent délicate.

A côté des cycles *pédogénétiques progressifs*, tendant à évoluer à travers divers écosystèmes vers un écosystème stable appelé *climax*, il existe des types d'évolutions qualifiées de *régressives* (vers les matériaux primaires) comme les processus érosifs. Les sols sont aussi le réacteur de processus biologiques, biochimiques et chimiques rapides dont la résultante forme leur lent processus d'évolution. Ces processus rapides peuvent être perturbés par certaines activités humaines : déforestation, travail du sol, apports de polluants, fertilisants et produits phytosanitaires. Il en résulte dans certains cas des dégradations rapides de la fine *couverture pédologique* qui ne pourra se régénérer qu'à l'échelle du temps géologique.

### Fonctions du sol

A l'échelle de la planète, le sol (y compris les sédiments océaniques) constitue le *puits de mort* de tous les végétaux et animaux. Dans les imaginaires collectifs, il peut être lié aux enfers par opposition au ciel. Mais ce sont plutôt les couches plus profondes

de la terre qui assument ce rôle. Dans le sol, on enterre dignement ses morts, on embrasse la terre, on jette une poignée de terre, on s'enduit le corps et se peint le visage avec de la terre, on confectionne des masques en terre avec lesquels on fête et fait revivre les morts... Les matériaux industriels n'ont pas fait disparaître l'usage de la terre chez les artistes contemporains (Fig. 1).

Le sol peut aussi être vu comme un purgatoire où sont sélectionnées et transformées les molécules hydrocarbonées des organismes morts ; à l'issue de ce processus de jugement dernier la plus grande partie du carbone monte au ciel sous forme de gaz carbonique et l'autre est transformée en carbone terrestre enfoui (enfer).

Cette fonction de mort permet le maintien du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique et les grands équilibres des milieux carbonatés, la transformation de l'azote en ammonium puis en nitrates, la libération de formes assimilables du potassium, du phosphore, du soufre et d'autres composés minéraux.

Ainsi, en liaison avec l'eau, le sol est aussi la *source de vie* de la planète. Le gaz carbonique qu'il libère dans l'atmosphère apporte le carbone indispensable aux plantes ; le sol leur fournit directement les nitrates, le phosphore, le soufre, le potassium et les autres éléments biogènes. Pour l'homme, le sol est depuis l'origine associé aux activités de cueillette et de chasse ; les plantes et les animaux se répartissent pour partie selon les types.

# S o m m a i r e

---

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Sommaire .....                                               | 1  |
| <u>SCIENCES ET CULTURE</u>                                   |    |
| Le sol et son analyse <i>par M. Pansu</i> .....              | 2  |
| Le musée d'Art Moderne et Contemporain «Les Abattoirs» ..... | 10 |
| <u>VIE DE L'ECOLE</u>                                        |    |
| Thèses passées à l'ENSCT .....                               | 14 |
| Parrainage de la première année .....                        | 18 |
| Colloque national des étudiants de la SFEN.....              | 31 |
| <u>VIE DE L'ASSOCIATION</u>                                  |    |
| Les promotions en «0».....                                   | 24 |
| La promotion 1999 .....                                      | 29 |
| Carnets de l'Association .....                               | 30 |

Photo de couverture :  
Le rideau de scène de Picasso *La dépouille du*  
*Minotaure en costume d'Arlequin* (D.R.)

Siège social : **FRÉQUENCE CHIMIE**  
ENSCT, 118, rte de Narbonne 31077 Toulouse Cedex 4  
Tél : 05 62 88 56 56 - Fax : 05 62 88 56 00  
E-mail : [rpince@ensct.fr](mailto:rpince@ensct.fr)  
Directeur de publication : *Roland MORANCHO*  
Rédacteur en chef : *Robert PINCE*  
Rédacteur adjoint : *Frédéric LOUSSAYRE*  
Secrétaires de rédaction : *Thérèse BARALE, Christine GUICHOU*  
Maquette et mise en page : *Robert PINCE*  
Dessins : *Adeline ARAGON*  
Impression : *Imprimerie FOURNIE, FONTSEGRIVES, 31130 BALMA*



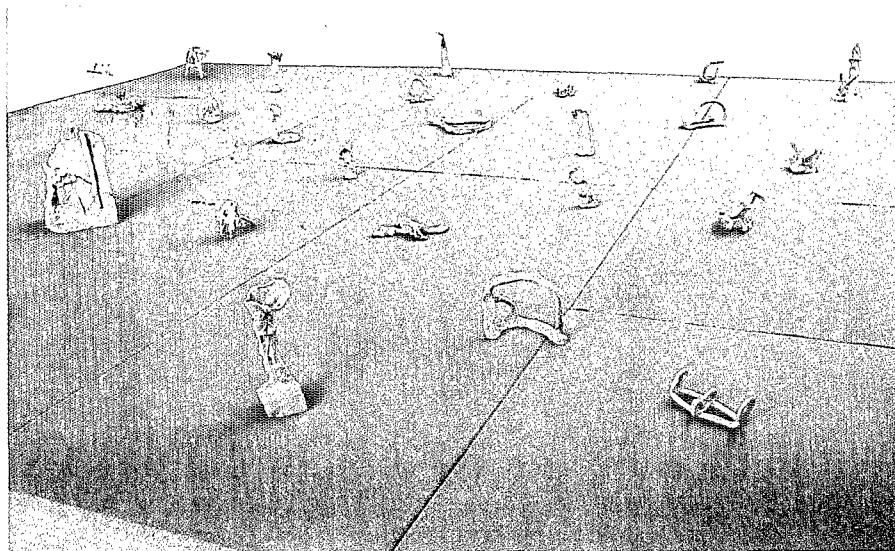


Fig. 1. – Les statuettes en terre de Pierre Neyrand donnent aux objets industriels dont elles s'inspirent, un étrange mélange de sacralisation et de dérision ; Pierre Neyrand, Terre, Exposition ENAC, Toulouse, 1996.

de sol. Le sol est ensuite très largement lié à l'agriculture et dans le vocabulaire, il se confond souvent avec elle. Les agriculteurs sont les gens de la terre, la terre est basse, on retourne à la terre pour retourner la terre, on pratique des assolements, on déguste les produits du terroir etc.

Le sol est également source de richesse directement exploitable industriellement. Certaines zones peuvent être riches en minerais divers. Des minéraux argileux sont largement utilisés dans l'industrie comme matériaux de construction (briques, tuiles, carrelages, lavabos, poteries...) ou en raison de leurs propriétés d'échange (catalyseurs, supports chromatographiques...). Ils constituent des médicaments efficaces contre certaines affections de l'appareil digestif ou de la peau. Les composés organiques très divers des sols sont également susceptibles d'applications.

Les sols peuvent aussi avoir une influence directe sur la santé des animaux et des hommes qui l'habitent. Par exemple, il est connu que les régions carencées en iode sont propices aux dysfonctionnements des glandes thyroïdiennes et à l'appari-

tion des goîtres, les carences en cobalt peuvent provoquer des anémies des bovins et ovins, le sélénium peut être accumulé par les plantes et devenir toxique pour la faune qui s'en nourrit. Le sol sert de support à beaucoup d'activités humaines (construction, transport, génie civil) qui nécessitent une bonne connaissance de sa composition et stabilité.

La couverture pédologique constitue l'interface de nombreux processus d'échange dans les grands équilibres de la planète. Dans le cycle terrestre annuel du carbone, les gros réservoirs profonds que sont les carbonates et sédiments océaniques (30 000 000 milliards de tonnes ou Gt) ou encore les schistes organiques et combustibles fossiles (7 000 000 Gt) semblent avoir peu d'influence sur la régulation à court terme des flux de carbone, excepté l'utilisation humaine des combustibles fossiles (5,5 Gt). La réserve plus accessible contenue dans les sols (1 500 Gt jusqu'à la profondeur de un mètre plus 900 Gt dans la couche 1-2 m) est supérieure à celle contenue dans la biosphère (700 Gt) et l'atmosphère (750 Gt). Sa gestion doit être étudiée pour compenser au mieux

les déséquilibres engendrés par l'utilisation excessive des combustibles et la déforestation. Le problème s'avère parfois difficile, la déforestation ne produit pas seulement des transferts de carbone de la biosphère vers l'atmosphère mais aussi une baisse importante des taux de carbone du sol sous-jacent et un transfert supplémentaire vers l'atmosphère. Si les principaux échanges entre couverture pédologique et atmosphère concernent les flux de gaz carbonique, d'autres flux gazeux influent également les grands équilibres terrestres et l'effet de serre. Les plus étudiés sont le méthane dégagé en milieux hydromorphes et le protoxyde d'azote perdu lors des processus de nitrification/dénitrification.

### Composition des sols

Les sols contiennent les éléments que l'on trouve dans la lithosphère, c'est à dire en tenant compte de la variabilité géologique, la plupart des éléments du tableau périodique.

Les minéraux silicatés provenant des roches éruptives contiennent essentiellement, en plus de l'oxygène, des éléments majeurs se situant dans la troisième et quatrième période du tableau périodique. Il s'agit des métaux pouvant former des oxydes plus ou moins basiques, alcalins Na et K, alcalino-terreux Ca et Mg, aluminium, métaux de transition Fe, Ti, Mn ainsi que des non-métaux à oxydes acides Si et P. Deux types de magmas sont généralement classés sur la base de leur contenu en silice : l'un, décrit comme acide et granitique, avec un contenu en silice élevé (>60%) et assez riche en sodium et potassium, l'autre, basique et basaltique avec un contenu de moins de 50% en silice et relativement riche en fer, magnésium et calcium. Une classification plus précise est fournie tableau 1.

Si la composition des sols peut être

assez variable du fait d'une genèse liée à de nombreux processus d'altération et à l'anthropisation, on y retrouve souvent les éléments majeurs des roches éruptives. Le total des pourcentages des formes oxydes les plus stables associés aux éléments majeurs en tenant compte de l'humidité, de la matière organique et, dans certains cas, d'autres éléments présents en teneur majeure, est proche de 100 %. L'oxygène, élément le plus abondant des sols et des roches, est généralement déterminé par différence entre sommes de concentrations en oxydes et en éléments.

Les autres éléments se trouvent le plus souvent à l'état de traces dont seuls les plus connus ont fait l'objet de cartographies relativement précises : B, Cr, Co, Cu, I, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn, Li, Rb, Ba, Sr, Ga. Des études complexes sont parfois nécessaires pour déterminer l'origine d'un élément, en particulier si sa présence provient d'un mécanisme géochimique ou résulte d'une pollution.

## Constituants minéraux des sols

Le sol est un mélange de minéraux primaires provenant de l'altération des roches et de minéraux secondaires de néoformation.

Afin de définir la texture des sols, les minéraux doivent être d'abord classés selon leur taille au moyen de l'analyse granulométrique. Il existe plusieurs normes de classification au niveau mondial. La classification française de l'Afnor distingue les graviers et cailloux de taille supérieure à 2 mm, les sables grossiers entre 0,2 et 2 mm, les sables fins entre 50 et 200 µm, les limons grossiers entre 20 et 50 µm, les limons fins entre 2 et 20 µm et les argiles de taille inférieure à 2 µm. Cette classification dimensionnelle ne correspond pas toujours à une composition réelle des minéraux ; ainsi la

| Elément | oxyde stable                     | k      | Concentrations en %   |       |                          |       |                          |       |                       |       |
|---------|----------------------------------|--------|-----------------------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|-----------------------|-------|
|         |                                  |        | Roches ultrabasiques  |       | Roches basaltiques       |       | Roches granitiques       |       | Roches acides         |       |
|         |                                  |        | SiO <sub>2</sub> <45% |       | 45<SiO <sub>2</sub> <52% |       | 52<SiO <sub>2</sub> <68% |       | SiO <sub>2</sub> >66% |       |
|         |                                  |        | Elém.                 | Oxyde | Elém.                    | Oxyde | Elém.                    | Oxyde | Elém.                 | Oxyde |
| Si      | SiO <sub>2</sub>                 | 2,1393 | 20,5                  | 43,9  | 23,0                     | 49,2  | 31,4                     | 67,2  | 34,7                  | 74,3  |
| Al      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 1,8895 | 2,0                   | 3,8   | 7,8                      | 14,7  | 8,2                      | 15,5  | 7,2                   | 13,6  |
| Fe      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * | 1,4297 | 9,4                   | 13,4  | 8,6                      | 12,3  | 3,0                      | 4,3   | 1,4                   | 2,0   |
| Ca      | CaO                              | 1,3992 | 2,5                   | 3,5   | 7,6                      | 10,6  | 2,5                      | 3,5   | 0,5                   | 0,7   |
| Mg      | MgO                              | 1,6581 | 20,4                  | 33,8  | 4,6                      | 7,6   | 0,9                      | 1,5   | 0,2                   | 0,3   |
| Na      | Na <sub>2</sub> O                | 1,3480 | 0,4                   | 0,5   | 2,0                      | 2,7   | 2,8                      | 3,8   | 2,6                   | 3,5   |
| K       | K <sub>2</sub> O                 | 1,2046 | 0,004                 | 0,005 | 0,8                      | 1,0   | 2,5                      | 3,0   | 4,2                   | 5,1   |
| Ti      | TiO <sub>2</sub>                 | 1,6680 | 0,030                 | 0,050 | 1,4                      | 2,3   | 0,34                     | 0,6   | 0,12                  | 0,2   |
| Mn      | MnO                              | 1,2912 | 0,160                 | 0,207 | 0,15                     | 0,2   | 0,054                    | 0,1   | 0,04                  | 0,1   |
| P       | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | 2,2914 | 0,022                 | 0,050 | 0,11                     | 0,3   | 0,092                    | 0,2   | 0,06                  | 0,1   |
| Total % |                                  |        | 55,4                  | 99,2  | 56,1                     | 101,0 | 51,8                     | 99,6  | 51,0                  | 99,9  |
| O       | %                                |        |                       | 43,8  |                          | 44,9  |                          | 47,8  |                       | 48,9  |

**Tableau 1. - Composition élémentaire moyenne de quelques roches éruptives**

**k = coefficient multiplicatif élément/Oxyde**

**\* en milieu réducteur, considérer FeO (k = 1,286)**

fraction "argile" ne renferme pas que des argiles au sens minéralogique.

Les minéraux argileux, aussi appelés phyllosilicates (du grec phyllon = feuille), caractérisent le fonctionnement des sols par leurs propriétés de stockage et d'échange d'eau et d'éléments minéraux, ainsi que leur influence sur la transformation et l'aggrégation des matières organiques et minérales.

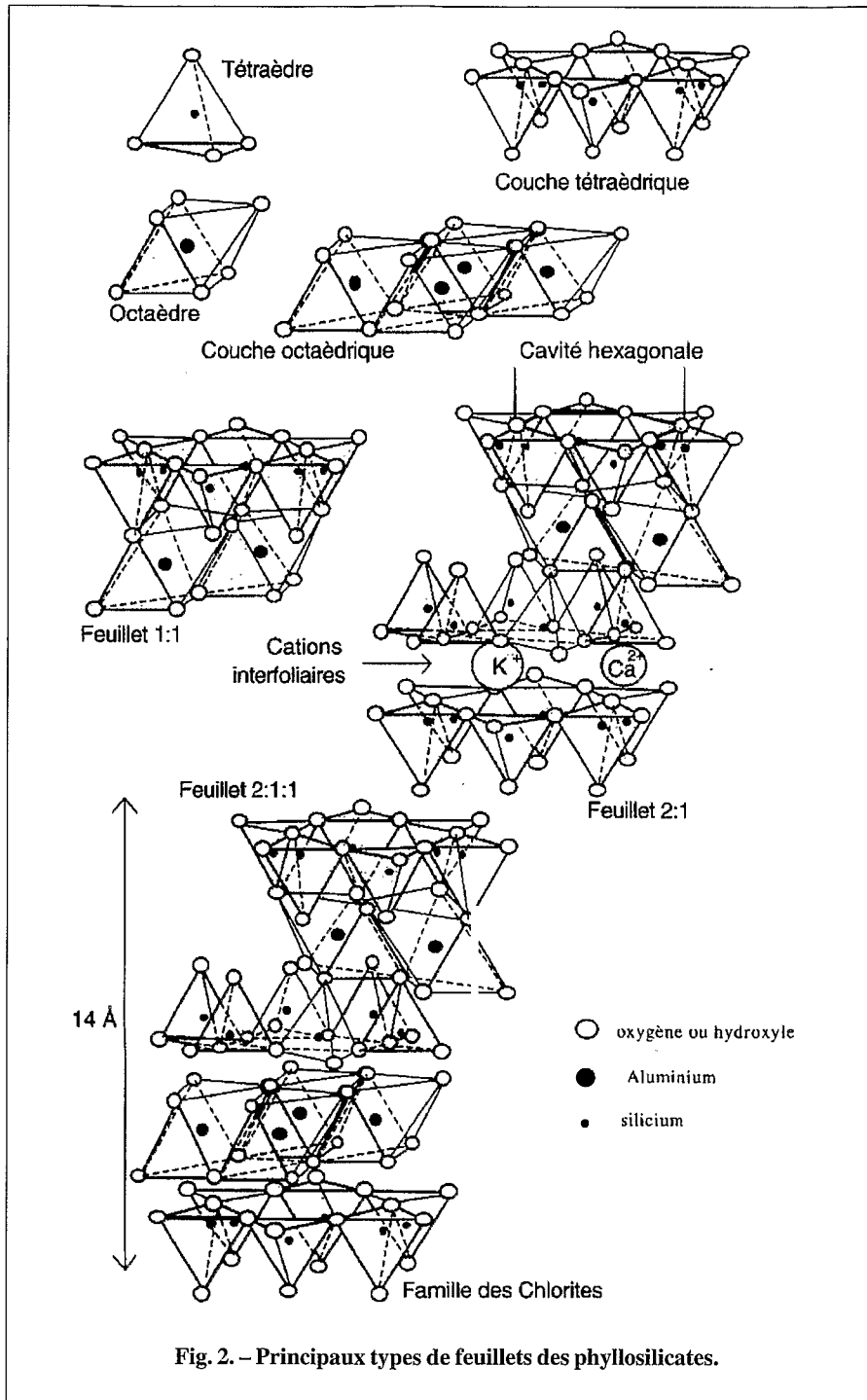
Les feuillets sont constitués d'assemblages élémentaires tétraédriques et octaédriques (Fig. 2). Tétraèdres et octaèdres sont formés par une structure d'atomes oxygènes ou hydroxyles disposés en plans. Les tétraèdres comportent 3 atomes dans un plan et un dans un autre plan, les octaèdres 3 atomes dans chaque plan. Ces atomes de grande taille laissent au centre une cavité tétraédrique ou octaédrique. Dans les cavités tétraédriques se placent les cations de petite taille Si ou Al. Les cavités octaédriques peuvent être occupées par des cations de plus grande taille, souvent Al mais aussi Fe, Mg, Mn, Cr, Ni etc.

Les phyllosilicates sont classifiés selon les différents arrangements des

plans tétraédriques et octaédriques et la distance mesurable aux rayons X entre les feuillets ainsi formés.

Le feuillet à 7 Å constitué d'une couche tétraédrique superposée à une couche octaédrique (phyllosilicate 1:1) représente la famille de la kaolinite et de l'halloysite. La kaolinite est l'argile la plus répandue des sols des régions tropicales. Au niveau agronomique, ses capacités de stockage d'eau et de nutriments sont relativement réduites. Par contre le kaolin est le matériau de choix des potiers et sculpteurs par ses propriétés de faible gonflement et de retrait.

Le feuillet à 10 Å comprenant deux couches tétraédriques enserrant une couche octaédrique (phyllosilicate 2:1) représente plusieurs grandes familles d'argiles : les micromicas (minéraux primaires altérés), les illites d'origine sédimentaire, à charge saturée par le potassium, les argiles expansibles ou hydratables (feuillets de 14 à 17 Å) comme les vermiculites (14 Å, un feuillet à 10 Å + 2 couches d'eau liées aux cations interfoliaires de type Ca, Mg), les smectites expansibles jusqu'à 17 Å comprenant une



phanes et immogolites à organisation courte distance (sphère creuse, fibre) possèdent une très grande surface spécifique engendrant une très grande capacité de rétention d'eau et de composés chimiques.

## Constituants organiques des sols

De par sa fonction de recueil terrestre de toutes les déjections et de la nécromasse, le sol renferme une très grande diversité de matières organiques. Il convient d'abord de distinguer les matières vivantes et non vivantes. Dans les premières, on classe les racines puis les organismes qui se nourrissent des matières mortes (hétérotrophes) et ceux qui tirent leur énergie de matières minérales du sol (autotrophes).

Avec une variabilité dimensionnelle allant du virus au blaireau, les organismes vivants représentent en moyenne 2 à 5% de la matière organique totale du sol. Ils se répartissent en microflore et faune du sol. La microflore comprend principalement d'une part les actinomycètes et champignons (près d'un million d'individus et des kilomètres de mycélium par gramme de sol) surtout actifs aux premiers stades des processus d'humification, d'autre part les diverses bactéries (10 millions d'individus par g de sol) actives sur des processus définis (cycles de l'azote, du fer, du soufre etc.).

La faune du sol est classée en microfaune de taille inférieure à 100  $\mu\text{m}$ , mésofaune (100  $\mu\text{m}$  à 1 cm) et macrofaune de taille supérieure à 1 cm. La microfaune comprend principalement les protozoaires et nématodes abondants dans les milieux humides. La mésofaune, formée surtout d'arthropodes inférieurs et Enchytraéides caractérise les milieux acides. Dans la macrofaune on classe en premier les vers de terre qui jouent un rôle essen-

grande diversité (montmorillonites, beidellite, nontronite etc.). Les chlorites 2:1:1. sont classées dans les argiles à feuillet 2:1 avec une couche octaédrique supplémentaire.

On trouve aussi de nombreux minéraux interstratifiés comme les illite-smectite constitués à la fois de feuillets à 10 Å et de feuillets expansibles. De nombreux composés non

phylleux sont couramment associés aux argiles. Les oxydes et hydroxydes de fer (hématite, goéthite etc.), d'aluminium (boehmite, gibbsite etc.) et de manganèse donnent souvent leur couleur aux sols, notamment pour les sols rouges méditerranéens et tropicaux. Ils peuvent être amorphes, bien cristallisés ou ne présenter que des ébauches de cristallinité. Les allo-

tiel dans l'humification des milieux peu acides et représentent une biomasse de une à plusieurs tonnes par hectare ; on y trouve aussi de nombreux insectes comme les fourmis et les termites.

Dans les matières organiques non vivantes, on trouve toutes les matières d'origine végétale et animale (lignine, cellulose, hémi-cellulose, protéines, polysaccharides, lipides) et leurs produits de transformation.

A leur terme, les processus d'humification produisent les molécules organiques stables du sol ou molécules humiques souvent classées selon leurs propriétés de solubilité : *acides humiques* (solubles en milieu alcalin et précipitant par acidification de l'extrait), *acides fulviques* (solubles en milieu alcalin et acide), *humines* insolubles.

Ces diverses molécules humiques apparaissent structurellement assez semblables avec des variations dans les poids moléculaires allant de 1000 à 10 millions. Leur structure est encore mal connue. Elle se ramène schématiquement à un *nucleus* central riche en unités hydroxy-quinoniques reliées par des liaisons C-C ou C-O-C. Sur ce noyau, sont fixées avec une fréquence de distribution variable, des chaînes protéiques et polypeptidiques. Bien que des modèles moléculaires plus précis aient été récemment proposés, des recherches importantes sont encore nécessaires pour une connaissance précise des molécules humiques de divers types de sol.

Les sols renferment aussi, à l'état de traces, des molécules polluantes et des pesticides, certaines étant susceptibles de perturber leur fonctionnement biologique.

## Méthodes de séparation

Les sols présentent une très grande hétérogénéité de particules minérales,

organiques et organo-minérale (Fig.3). Leur étude nécessite une large panoplie de méthodes de fractionnement. Pour les particules grossières jusqu'à 20  $\mu\text{m}$ , on utilise les techniques de tamisage à sec ou en milieu humide. Les particules de taille inférieure ou égale à 2  $\mu\text{m}$  sont généralement fractionnées par sédimentation (loi de Stokes) après différentes techniques de dispersion des agrégats. Les particules plus fines jusqu'à 0,05  $\mu\text{m}$  sont séparées par centrifugation. Alternativement aux techniques de sédimentation et centrifugation, on peut utiliser la filtration, particulièrement sur membranes hydrophiles. Les membranes de dialyse celluloses permettent de fractionner les macromolécules de 50 000 à 1 000 daltons. Alternativement on utilise les techniques chromatographiques de filtration sur gel. L'ensemble des techniques chromatographiques est aussi utilisé pour le fractionnement des différentes formes moléculaires ou ioniques des sols. Enfin les isotopes naturels ou ceux utilisés comme traceurs ainsi que les fragments moléculaires résultant de l'analyse thermique sont séparés et quantifiés par les techniques de spectrométrie de masse.

Les techniques de séparation chromatographique permettent de résoudre de nombreux problèmes de dosage dans les sols. Les gaz du sol ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , hydrocarbures légers,  $\text{N}_2\text{O}$  et oxydes d'azote, gaz rares) sont dosés par chromatographie gazeuse (CG), notamment par chromatographie gaz-solide (CGS). Il en est de même pour les éléments C, N, H, O, S constitutifs des matières organiques (et de certains minéraux) dosés par voie sèche après combustion ou pyrolyse. Les acides organiques légers résultant des processus de fermentation en milieu anaérobie sont déterminés par CGS ou chromatographie ionique (CI). Les anions et cations solubles, (en forte concentration dans les sols salés) peu-

vent être séparés et quantifiés par CI. Les acides humiques sont étudiés notamment par chromatographie d'exclusion ou par dégradation thermique et CG des gaz formés. Les sucres des sols sont étudiés après hydrolyse par CG ou CI. Les lipides extraits par les solvants apolaires sont étudiés par chromatographie d'exclusion ou/et saponification, dérivatisation et chromatographie gaz liquide (CGL). Les acides aminés sont quantifiés après hydrolyse par chromatographie liquide (CL) ou CGL. Il en est de même des amino-sucres. Les traces d'herbicides acides (2,4D, 2,4,5T...) et triazines sont étudiés par CL ou CG. Les polluants hydrocarbures et polychlorobiphényles sont étudiés par CG, de même que les pesticides organochlorés et organophosphorés. L'étude des pesticides carbamates utilise des techniques de CG et LC.

## Fiat Lux

Les progrès dans l'étude de la matière au vingtième siècle découlent largement des connaissances acquises dans l'étude de la lumière.

Newton au 17<sup>e</sup> siècle remarqua que la couleur de l'arc-en-ciel provenait d'une décomposition de la lumière solaire. Environ un siècle plus tard, Wollaston et Fraunhofer trouvèrent des raies sombres dans le spectre solaire. Un peu plus tard Kirchhoff et Bunsen identifièrent les mêmes raies dans la lumière émise par certains éléments à haute température.

Les équations de Maxwell en 1864 jetèrent les bases de la théorie ondulatoire unifiant les divers rayonnements électromagnétique. Cette théorie qui permit de rendre compte des phénomènes de réflexion et de réfraction est aussi considérée comme la base de notre monde moderne de télécommunication.

Lorentz proposa en 1895 la théorie

| PARTICULES                                                                                                                                                     |       |    |                                  | ORGANES DE SEPARATION |                   |                    |                |             |                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----|----------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------------|----------------------------------|
| 1                                                                                                                                                              | 2     | 3  | 4                                | Verre Fritté          | Filtres cellulose | Verre borosilicaté | MEMBRANES (µm) |             |                                  |
|                                                                                                                                                                |       |    |                                  |                       |                   |                    | Hydrophiles    | Hydrophobes | Normes                           |
| CLARIFICATION                                                                                                                                                  | 100   | SF | POLLENS<br>TAMIS                 | 1                     |                   |                    |                |             | BPL                              |
|                                                                                                                                                                | 60    |    |                                  | 2                     |                   |                    |                |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 40    | LG |                                  | 3                     | Rapides           |                    |                |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 20    |    |                                  | 4                     | Moyens            |                    | 10             |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 10    |    |                                  |                       |                   |                    | 8              |             |                                  |
| MICRO-FILTRATION                                                                                                                                               | 6     |    | MICROSCOPIE OPTIQUE<br>BACTERIES |                       |                   |                    | 5              |             | Air - 0,80<br>Eau 0,45<br>- 0,22 |
|                                                                                                                                                                | 4     | LF |                                  |                       | Lents             | 2,7                | 3              |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 2     |    |                                  | 5                     |                   |                    | 1,2            |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 1     |    |                                  |                       |                   | 0,7                | 0,8            |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,6   | AG |                                  |                       |                   |                    | 0,45           | 0,45        |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,4   |    |                                  |                       |                   |                    | 0,22           | 0,22        |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,2   |    |                                  |                       |                   |                    | 0,10           |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,1   |    |                                  |                       |                   |                    |                |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,06  | AF |                                  |                       |                   |                    | 0,05           |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,04  |    |                                  |                       |                   |                    | 0,025          |             |                                  |
| ULTRA-FILTRATION                                                                                                                                               | 0,02  |    | VIRUS                            |                       |                   |                    | 0,01 (PC)      |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,01  |    |                                  |                       |                   |                    |                |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,006 |    |                                  |                       |                   |                    |                |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,004 |    |                                  |                       |                   |                    |                |             |                                  |
|                                                                                                                                                                | 0,002 |    |                                  |                       |                   |                    |                |             |                                  |
| O.I.                                                                                                                                                           | 0,001 |    |                                  |                       |                   |                    |                |             |                                  |
| Matériaux membranes - PTFE<br>- fluorure de polyvinylidène<br>- polycarbonate...<br>- acétate, nitrate<br>- polysulfone<br>- Nylon<br>- Argent<br>de cellulose |       |    |                                  |                       |                   |                    |                |             |                                  |

**Fig. 3. - Les différents types de filtre et leur utilisation en liaison avec la taille des particules dans les sols (OI = osmose inverse) :**  
 colonne 1 = taille des particules en µm,  
 colonne 2 = classification particules minérales pour les sols ;  
 SF=sables fins, LG = limons grossiers, LF = limons fins,  
 AG = argiles grossières, AF = argiles fines  
 colonne 3 = appareillage de visualisation ;  
 MET, MEB = microscopes électroniques à transmission et à balayage,  
 colonne 4 = répartition de particules organiques

électronique de la matière et de l'interaction rayonnement-électrons. Avec son élève Zeeman, il étudia l'influence du champ magnétique sur les radiations. Planck au début du siècle établit une loi d'équivalence entre énergie et fréquence de la radiation électromagnétique ainsi que la première formulation de la théorie des quanta. On assista ensuite au dévelop-

pement de la théorie des quanta ; Einstein établit une équivalence entre matière et énergie. Bohr proposa sa définition de l'atome en 1912. De Broglie, Heisenberg, Shrödinger et d'autres scientifiques développèrent la théorie des quanta et l'unifièrent à la théorie ondulatoire.

## La lumière pour observer la matière

Le mot lumière désigne ici les radiations électromagnétiques de Maxwell de diverses longueurs d'onde.

Parmi les moins énergétiques on trouve les ondes radio à la base de la spectrométrie de résonance magnétique nucléaire (RMN) utilisée dans l'étude des molécules humiques. Les ondes infrarouges, un peu plus énergétiques ont engendré la spectrométrie IR, une autre technique d'identification des molécules des sols par l'étude de leur vibration.

Dans le domaine du visible, l'instrument de base est l'œil humain. Il n'est pas très performant, le domaine du visible ne représentant qu'une très faible partie du spectre des ondes électromagnétiques. L'œil humain n'a pas non plus un pouvoir de résolution très grand et il doit souvent être assisté 1) de lentilles et techniques de microscopie optique pour augmenter la précision de la visée, 2) de filtres ou monochromateurs pour une meilleure séparation des longueurs d'onde et quantifier les molécules selon l'intensité de leurs couleurs. La plupart des nombreuses techniques de colorimétrie associées à l'étude des sols, font d'ailleurs peu confiance à l'œil humain et mesurent l'intensité lumineuse par des méthodes de conversion de la radiation en courant électronique : cellules photoélectriques, cellule photoémissive ou tube photomultiplicateur.

L'émission thermique de radiation par les atomes est à l'origine de la plupart des très populaires méthodes de spectrométrie atomique dans le visible et l'UV : spectrométrie d'émission de flamme, d'arc, d'étincelle. La spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif devient une technique d'analyse multi-élémentaire d'usage courant dans les laboratoires modernes de sols. La spectrométrie

d'absorption atomique découle de la loi de Kirchhoff : la matière absorbe les radiations qu'elle est susceptible d'émettre à la même longueur d'onde. Elle a permis une très grande sélectivité dans les mesures encore augmentée par des techniques optiques comme l'effet Zeeman permettant de déduire l'absorption non sélective. La spectrométrie d'absorption atomique demeure très performante dans la mesure d'éléments à l'état d'ultra-traces, surtout dans sa version électrothermique.

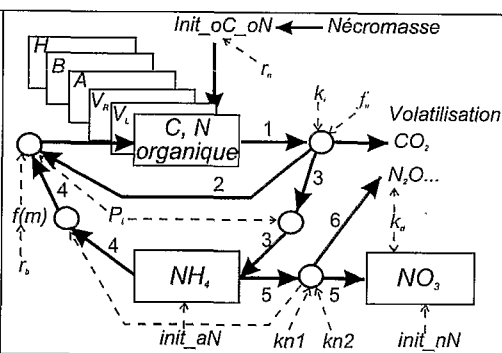
La spectrométrie UV plus énergétique que la spectrophotométrie dans le visible permet de quantifier les molécules par excitation de certains électrons de liaison et mesure de l'absorption de la longueur d'onde d'excitation correspondante.

La principe de la diffraction des rayons X découle de la loi établie par Bragg d'après la théorie ondulatoire. La distance entre plans cristallins de la matière est mesurée comme directement dépendante de la longueur d'onde d'un rayonnement X et de l'orientation de ce rayonnement avec les plans observés.

La fluorescence X utilise une radiation X plus énergétique, capable d'exciter les électrons des couches internes des atomes. La fluorescence X est intéressante parmi les techniques de spectrométrie atomique par son aptitude plus grande à travailler directement sur le matériau solide. La microsonde électronique utilise l'émission de fluorescence X pour quantifier les atomes de surface à l'échelle microscopique, leur excitation étant cette fois provoquée par bombardement électronique.

Les rayonnements électroniques, de plus courte longueur d'onde que les photons, permettent d'affiner les détails perceptibles dans la matière, soit en surface (microscopie électronique à balayage) soit en profondeur (microscopie électronique à transmis-

Fig. 4. — Modèle MOMOS de transfert de carbone C et d'azote N dans la matière organique des sols. C et N organique sont divisés en cinq compartiments :  $V_L$  et  $V_R$  = nécromasse labile et stable, A = métabolites labiles, B = biomasse microbienne, H = composés humifiés stables. Les flèches en gras indiquent les processus de transfert : 1) minéralisation, 2) humification, 3) ammonification, 4) réorganisation, 5) nitrification, 6) N-volatilisation



sion). La diffraction des électrons permet aussi d'identifier des structures cristallines à l'échelle microscopique. L'activation neutronique encore plus énergétique, permet d'exciter les noyaux des atomes. Les radiations gamma émises lors des processus de relaxation permettent une quantification très sélective, très précise et très sensible des atomes radioactifs formés. Cependant, cette méthode onéreuse est généralement réservée à des applications particulières.

Les atomes et leurs isotopes ionisés à très haute température dans un plasma d'argon peuvent être quantifiés de manière très sensible par spectrométrie de masse. C'est la spectrométrie de masse de plasma à couplage inductif, une méthode très prometteuse dans l'étude des éléments à l'état d'ultra-traces mais encore onéreuse et difficile à mettre en œuvre.

Enfin les ions peuvent être utilisés comme rayonnements très énergétiques pour bombarder la matière et permettre l'observation des couches de sub-surface (SIMS = Secondary Ion Mass Spectrometry, ISS = Ion Scattering Spectrometry, FIM = Field Ion Microscope...).

## Équilibres dans les sols

Les propriétés d'échange ionique du complexe argilo-humique sont fondamentales tant pour apprécier la disponibilité des nutriments pour la plante

que pour étudier les mouvements de solutés vers les nappes phréatiques.

Les techniques électrochimiques permettent de quantifier les ions dans les solution selon leur potentiel et leur charge. Parmi ces techniques, les électrodes ioniques sélectives constituent un moyen rapide pour suivre en continu l'activité de certains ions dans les solutions de sols. La plus utilisée est l'électrode de pH, sélective de l'ion hydrogène. Le pH est une mesure de l'activité des ions  $H^+$  hydratés qui accompagne de nombreuses réactions. Il caractérise l'état physico-chimique de l'ensemble des équilibres dans les sols à un instant donné.

Le potentiel redox est celui que prend une électrode de platine en contact étroit avec la pâte de sol, par rapport à une électrode de référence. Pour un élément en équilibre d'oxydo-réduction, il est donné par la loi de Nernst et caractérise les processus microbiens liés à l'aération du milieu.

La conductivité électrique spécifique d'une solution de sol est par définition, l'inverse de la résistance d'une lame de solution de 1 cm d'épaisseur et de 1  $cm^2$  de section. En étroite relation avec les quantités d'ions dissous en milliéquivalents ou en masse, elle est très utilisée pour estimer la salinité des extraits.

De nombreuses techniques d'équilibre sont utilisées pour étudier la dynamique des ions dans les sols : point de charge 0, point d'effet de sel nul, charges permanentes et variables

des colloïdes, cations échangeables (par un contre-ion), acidité d'échange (liée aux protons extractibles et aux formes acides de l'aluminium), capacité d'échange cationique, capacité d'échange anionique, sélectivité entre cations (isothermes d'échange).

De nombreuses solutions d'extraction sont utilisées dans les analyses de caractérisation agronomique pour prévoir la disponibilité à court terme des nutriments pour les plantes. Ce type d'approche (tests agronomiques) souvent plus rapide qu'une analyse totale ou qu'une étude précise des équilibres vise à caractériser de manière pragmatique les besoins des cultures aux divers stades de leur développement.

Des tests biologiques sur des échantillons mis en incubation en conditions contrôlées permettent également de prévoir la libération à court terme des nutriments nécessaires aux plantes. Des incubations peuvent aussi être conduites en complément éventuel avec des marqueurs isotopiques pour des études plus fondamentales du fonctionnement biologique des sols.

## Analyse des processus

En complément des études physico-chimiques, la panoplie de méthodes mathématiques et informatiques, utilisée pour comprendre le fonctionnement des sols, s'élargit actuellement : systèmes d'information géographique, géométrie fractale, logique floue, lois thermodynamiques, modèles à compartiments, systèmes d'équations différentielles, modèles de diffusion, équations aux dérivées partielles, systèmes multi-agents, systèmes experts. Outre leur intérêt fondamental, ces études visent à s'intégrer dans des systèmes plus complexes, d'une part pour prévoir l'évolution des agro/écosystèmes,

d'autre part pour préciser les flux des échanges terrestres. A titre d'exemple, la figure 4 présente le modèle à compartiments que nous avons proposé, en liaison avec des expérimentations avec traceurs isotopiques, pour décrire les transferts de carbone et d'azote dans la matière organique des sols.

## Conclusion

En conclusion, si le sol garde toujours sa place essentielle comme support d'activités agricoles, industrielles et de génie civil, il a aussi bien d'autres rôles trop souvent négligés. Son fonctionnement s'intègre dans celui des écosystèmes. Il sert souvent de filtre pour certaines molécules xénobiotiques. Il peut aussi libérer des molécules vers les nappes phréatiques comme les nitrates non assimilés par les plantes ou l'aluminium sous l'influence des pluies acides. Il sert de régulateur des échanges de carbone et d'azote entre l'atmosphère et la biosphère et contribue à l'équilibre de température de la planète. A la fois puits de mort et source de vie, l'importance du sol se retrouve dans les imaginaires collectifs. C'est un milieu complexe dont l'analyse précise nécessite une large panoplie de méthodes physiques, chimiques, physico-chimiques, microbiologiques, mathématiques et informatiques.

## Références

- Baize D. et Jabiol B., 1995. – Guide pour la description des sols, INRA, Paris, 375 p.
- Chamayou H. et Legros J.P., 1989. – Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol, Presses Univ. de France, Paris, 593 p.
- Duchaufour Ph., 1991. – Pédologie – sol, végétation, environnement, 3<sup>de</sup> édition, Masson, 289 p.
- Kirschbaum M.U.F., 2000. – Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming ? *Biogeochemistry*, 48, 21-51.
- Pansu M., Sallih Z. et Bottner P., 1998. – A process-based model for carbon and nitrogen transfers in soil organic matter. Actes 16<sup>e</sup> Congrès mondial de science du sol, Montpellier août 1998.
- Pansu M., Z. Sallih et P. Bottner, 1998 – Modelling of soil nitrogen forms after organic amendments under controlled conditions. *Soil Biology & Biochemistry*, 30, 19-29.
- Pansu M., Gautheyrou J. et Loyer J.Y., 1998. – L'analyse du sol – échantillonnage, instrumentation et contrôle, Masson, Paris, 512 p.
- Robert M., 1996. – Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement, Masson, Paris, 244 p.
- Schulten H.R. et Schnitzer M., 1997. – Chemical model structures for soil organic matter and soils. *Soil Science*, 162, 115-129.
- Skjemstad J.O., Clarke P., Taylor J.A., Oades J.M. et McClure S.G., 1996. – The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Aust. J. Soil Res.*, 34, 251-271.

## Marc Pansu

Ancien élève ENSCT  
(promotion 1972)  
IRD (ex-Orstom),  
BP 5045,  
911 Avenue d'Agropolis,  
34032 Montpellier Cedex 1,  
Tél : 04 67 41 62 28,  
Fax : 04 67 41 62 94,  
E-mail : pansu@mpl.ird.fr

## *Le Musée d'art moderne et contemporain « les Abattoirs »*

### **Les Abattoirs**

Le Musée d'art moderne et contemporain « les Abattoirs » est un établissement de type nouveau qui offre un large spectre d'activités.

Dans le cadre de ses missions de service public culturel, les nouvelles responsabilités sont héritées de l'ancien Musée municipal d'art moderne, du FRAC et du Centre d'art

contemporain. Dans un souci constant d'unité, chaque pôle (art contemporain/diffusion régionale et art moderne) assure les missions les plus directement liées à ses compétences institutionnelles et à sa vocation.

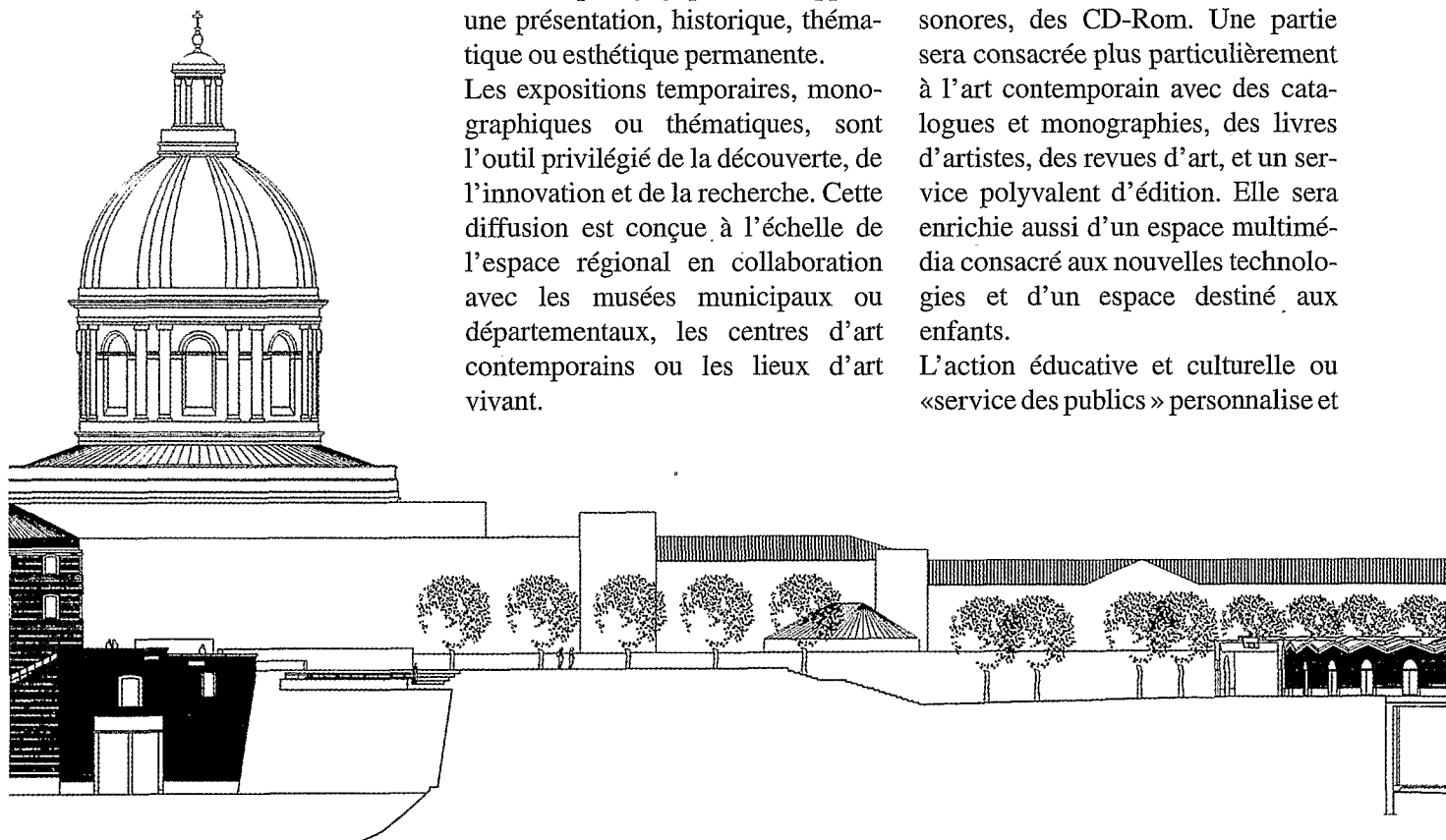
La fonction muséographique a pour vocation de conserver, dans des conditions adaptées à chaque catégorie, les oeuvres de la collection et de la gérer. L'enrichissement de la collection demeure une priorité. L'exploitation de la collection reste le support privilégié de l'action culturelle et pédagogique, elle suppose une présentation, historique, thématique ou esthétique permanente.

Les expositions temporaires, monographiques ou thématiques, sont l'outil privilégié de la découverte, de l'innovation et de la recherche. Cette diffusion est conçue à l'échelle de l'espace régional en collaboration avec les musées municipaux ou départementaux, les centres d'art contemporains ou les lieux d'art vivant.

La fonction documentaire est un des points essentiels de la structure : l'ensemble des fonds documentaires informatisés sera à terme relié aux pôles du réseau régional. La Médiathèque a pour vocation d'être un lieu de recherche, de sensibilisation et de diffusion destiné à des publics très divers.

La bibliothèque, avec ses deux salles de lecture (enfants et adultes) permettra la consultation de documents en libre accès : des ouvrages théoriques, d'histoire de l'art, d'esthétique, des dossiers d'oeuvres d'artistes, des archives visuelles et sonores, des CD-Rom. Une partie sera consacrée plus particulièrement à l'art contemporain avec des catalogues et monographies, des livres d'artistes, des revues d'art, et un service polyvalent d'édition. Elle sera enrichie aussi d'un espace multimedia consacré aux nouvelles technologies et d'un espace destiné aux enfants.

L'action éducative et culturelle ou «service des publics» personnalise et



# FREQUENCE

*Chimie*

N° 28 novembre 2000

JOURNAL DE L'ÉCOLE NATIONALE  
SUPÉRIEURE DE CHIMIE DE TOULOUSE  
ET DE L'ASSOCIATION DES INGENIEURS  
DE L'EST

● Le sol  
et son analyse

● Le Musée d'Art  
Moderne et  
Contemporain

INP **EN S C T**

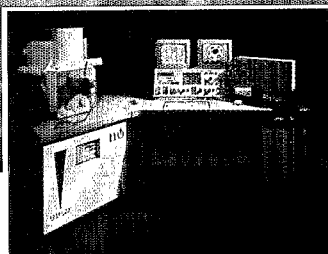
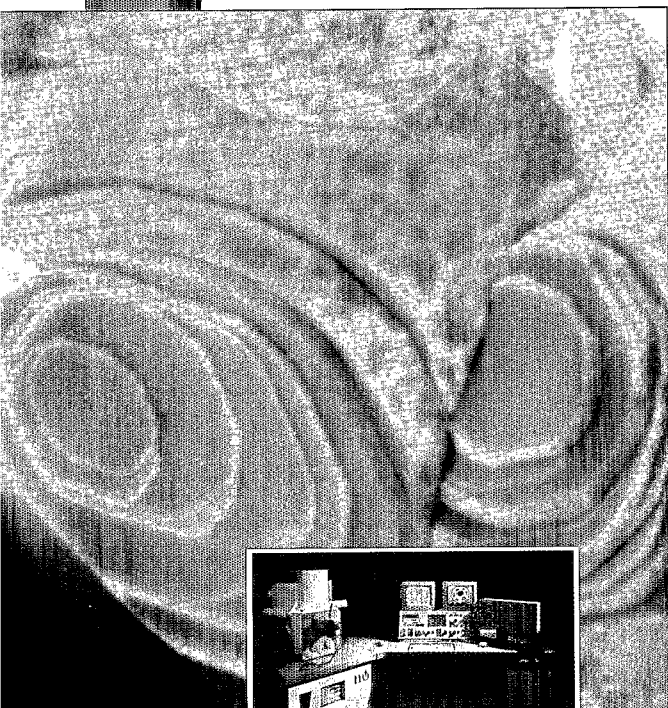
118, route de Narbonne - 31077 Toulouse cedex 4 - Tél. : 05 62 88 56 56 - Fax : 05 62 88 56 00



*Repas d'affaires, séminaires (capacité 300 couverts)*  
*Services de repas de collectivités*  
*Mariages*  
*Repas complets et plats cuisinés sur commande*

**Traiteur - Bar - restaurant**  
**Livraison à domicile - Parking**  
**10, impasse de Candie**  
**31100 Toulouse**  
**Tél. 05 61 07 58 98 et 05 61 07 70 39**

## LEO 982 - MEB analytique haute résolution



- ▼ Canon à émission de champ avec cathode chaude
- ▼ Colonne avec optique électronique unique GEMINI
- ▼ Résolution inégalée en basse tension
- ▼ Utilisation de deux détecteurs pour une topographie exceptionnelle
- ▼ Très large gamme de courant de sonde pour une complète capacité analytique
- ▼ Protection unique contre les champs magnétiques et les vibrations
- ▼ Stockage et traitement d'images haute résolution
- ▼ Platines à larges débattements
- ▼ Détecteur X avec très faible distance de travail
- ▼ Compatibilité avec détecteur EBSP

*Photographie de grains de SiC  
réalisée à 1kV, grandissement de  
X50 000 avec détecteur annulaire*

LEO Microscopie Electronique SARL  
86 avenue du 18 juin 1940  
F-92500 Rueil-Malmaison France  
Telephone (33) 1 41 39 92 10  
Fax (33) 1 41 39 92 29

**Coopération Zeiss • Leica**

# LEO



**Fidèle fournisseur de**  
**l'Ecole Nationale Supérieure**  
**de Chimie de Toulouse**  
**En démarche de Certification ISO 9002**  
**Votre partenaire**  
**copieur, fax, connexion**

**Parc technologique du Canal 16, Avenue de l'Europe 31520 RAMONVILLE ST AGNE Tél. 05 62 19 05 05**