

Modèles verbaux et transdisciplinarité dans l'étude des sols et des paysages

(Tropiques Humides)

1. Essai critique en fonction de l'analyse de système

Yvon CHATELIN (1), Jean-François RICHARD (2), Noël LENEUF (3)

(1) Services Scientifiques Centraux de l'O.R.S.T.O.M., 70-74, Route d'Aulnay, 93140 Bondy

(2) Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé, B.P. V 51, Abidjan (Côte d'Ivoire)

(3) Institut des Sciences de la Terre, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon

RÉSUMÉ

Les phénomènes naturels ont une complexité depuis longtemps reconnue. Cette complexité justifie une analyse de système, mais celle-ci ne dispose pas encore de procédures (mathématiques, cybernétiques) opérationnelles. Les méthodes informatiques sont employées, servant à établir des analyses multivariées et des taxonomies numériques, sans apporter vraiment une nouvelle approche des phénomènes complexes. Les auteurs défendent l'intérêt de modèles verbaux, basés sur les notions de diagnostic et de type, utilisant une structure linguistique adaptée aux sols et aux paysages.

SUMMARY

The complexity of natural phenomena has been admitted since a long time and it accounts for a system analysis which, indeed, does not get yet operational methods (mathematical and cybernetic ones). Processing methods make it possible to undertake multi-variate analyses and numerical taxonomies without resulting in a really new approach to complex phenomena. The authors are in favour of verbal models based on the notions of diagnosis and type which use linguistic structure in keeping with soils and landscapes.

MOTS CLÉS : Sols et paysages. Complexité des corps naturels et des processus. Informatique et analyse de système. Notions de diagnostic et de type. Structure linguistique et modèles verbaux. Transdisciplinarité. Étude épistémologique.

INTRODUCTION

L'idéologie scientifique actuelle est largement investie par la notion de système. Les sciences du sol, et plus généralement toutes les disciplines étudiant milieu naturel ou paysage, n'échappent pas à cette emprise multiforme. Le mot système lui-

même fait partie du vocabulaire à la mode. Il semble parfois n'avoir d'autre rôle que celui d'une parure destinée à rajeunir des concepts anciens et banalisés. Parfois aussi il est invoqué pour soutenir les travaux d'un auteur ou d'une école, sans que l'on sache en quoi il s'applique mieux à ceux-ci qu'aux travaux concurrents.

Si l'on veut faire passer cette notion de système du domaine de l'idéologie à celui de l'épistémologie, certaines clarifications deviennent nécessaires. Ainsi que le fait remarquer E. MORIN (1977), la notion de système a une double entrée : « l'une physique, phénoménale, empirique », « l'autre formelle, idéale ». En termes plus simples, cela signifie qu'il faut distinguer ce qui est le propre d'un « système naturel » en lui-même, et ce qui constitue la représentation, le « modèle » que l'on en donne. Au sens plein, on ne parlera d'*analyse de système* (A.S.) que lorsqu'il y a bien système du côté de l'objet de l'étude (complexe d'éléments en interaction), et lorsque des procédures spécifiques sont mises à l'œuvre dans le modèle.

En sortant du domaine idéologique, la notion de système doit perdre certains de ses effets émotionnels. L. VON BERTALANFFY (1968) et avec lui beaucoup d'esprits enthousiastes ont voulu voir « une réorientation de la pensée et de la vision du monde » dans « l'introduction du concept de système comme nouveau paradigme scientifique ». Il n'est pas contestable que les modèles très élaborés (mathématiques, cybernétiques, etc.) sont des acquisitions récentes. Mais la compréhension de la nature comme système, la connaissance du complexe, cette *vision du monde* dont parle BERTALANFFY n'apparaissent nouvelles qu'à ceux qui veulent ignorer toute autre philosophie que la leur.

Cela a été rappelé notamment par Y. BAREL (1970). La dénonciation de l'insuffisance des pratiques analytiques et réductionnistes, la nécessité de l'établissement de plusieurs niveaux d'analyse, la prise en compte des totalités et de l'interdépendance de leurs éléments, sont des principes méthodologiques qui n'appartiennent pas seulement à la toute nouvelle analyse de système. Ils sont apparus bien avant elle, constituant (au niveau épistémologique ou philosophique) le matérialisme dialectique. Les sciences de la Nature elles-mêmes, et surtout la biologie, les appliquent de façon implicite depuis au moins un siècle et demi. Dans les sciences du sol également, ces principes méthodologiques ont trouvé leur utilité, conduisant à une pédologie que l'on peut dire (CHATELIN, 1979) devenue science dialectique (cf. note *infra*, p. 54).

Il faut maintenant considérer comment une telle science dialectique (qu'il s'agisse de la pédologie ou d'une autre discipline) se situe par rapport à l'analyse de système. Elle apparaît comme science du complexe, science de la totalité : c'est bien en tant que système que la Nature est appréhendée et comprise. Mais elle n'est pas pourvue de moyens spécifiques pour constituer ses modèles. En ce sens, nous nous risquerons à dire que cette science reste *pré-systémique*. Suivant que les catégories épistémologiques

retenues font référence au langage systémique ou au langage dialectique, de mêmes pratiques scientifiques vont alors sembler très avancées ou feront figure de simples ébauches : chacun comprendra qu'il n'y a là que jeux de perspectives.

Ces réserves faites, nous essaierons de montrer ce que les disciples qui nous intéressent *peuvent concrètement offrir* aux perspectives de l'A.S. Nous verrons successivement que :

— la compréhension de la Nature (sols, milieux, paysages) en tant que système est à peu près partout acquise ;

— les ressources de l'informatique sont activement exploitées, dans l'espoir de préparer la véritable A.S. ;

— les modélisations de la véritable A.S. ne paraissent pas pouvoir couvrir tout le champ scientifique ;

— dans ces conditions, il semble nécessaire de se tourner vers des modèles verbaux originaux :

. plus performants que ceux du langage traditionnel de la science dialectique ou pré-systémique,

. plus facilement applicables que les modèles très élaborés de la véritable A.S.

1° LES PRATIQUES SCIENTIFIQUES PRÉ-SYSTÉMIQUES

Dans l'œuvre de Blaise PASCAL, il y a une phrase qui a pu longtemps passer inaperçue mais que l'on ne peut manquer à l'heure actuelle de rapprocher d'une vision dialectique ou systémique de la Nature. PASCAL écrivait (cité par E. MORIN, 1977) : « Toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties. »

Beaucoup de naturalistes ou de géographes (cités notamment par Y. CHATELIN, 1979 et B. KAISER, 1979), dès le XVIII^e siècle ou le début du XIX^e, ont acquis une *compréhension, plus ou moins intuitive, de la complexité*. Cela est exprimé par exemple dans l'œuvre de A. von HUMBOLT par un passage assez poétique où l'on peut voir en germe non seulement la pédologie mais aussi toutes les études intégrées concernant le milieu naturel qui sont actuellement en cours d'élaboration. « There is an harmony in nature, an invisible harmony... Find a certain type of soil and a certain type of plant and you will find a certain type of rock. And it is the same with

plants. They are related to their soil, their climate, their altitude.»

Telle que nous la connaissons, la *pédologie* s'est constituée sans aucun doute avec l'œuvre personnelle de V. V. DOKUCHAEV. C'est lui qui a précisé sa doctrine de départ, et en a fait une discipline reconnue par la société scientifique. Si l'on considère la pédologie comme une science du complexe, il est certain aussi qu'elle pouvait s'appuyer sur une longue tradition de pensée. Cette tradition a donné une science lorsque DOKUCHAEV a montré l'*interaction* de facteurs multiples (les 5 facteurs principaux de la pédogenèse), et l'*émergence* des corps naturels indépendants que sont les sols. Le schéma conceptuel de son travail pouvait s'écrire :

facteurs --- sols

J. P. GERASIMOV (1966) a rappelé que ce premier schéma a été rapidement transformé pour devenir :

facteurs --- processus --- sols

Les spécialistes de l'A.S. ne manqueront pas de remarquer l'homologie de ce schéma pédologique avec un autre schéma qui leur est familier :

entrées --- boîte noire --- sorties

Terme médian du schéma pédologique, le processus fait souvent figure de « boîte noire » ou de « *deus ex machina* ». Il peut garder son mystère. Quelles sont les réalités internes, phénoménales, de processus comme celui du « remaniement », celui du « cuirassement » ou de la « pédoplasmation » ? Il n'est pas sûr que l'on puisse prétendre les connaître. Le travail du pédologue consiste à identifier les roches, les positions intra- ou extrapédiques, les pédoclimats, etc., toutes les interactions de facteurs qui déterminent les sols. Voilà pour les « entrées ». Autre volet de son travail, il doit recenser toutes les substances, toutes les figures, toutes les quantités, qui concrétisent l'action de ces processus dans les sols. Ce sont les « sorties » du schéma conceptuel des pédologues. Les processus correspondent aux concepts qui lient le tout.

Ces comparaisons ne peuvent pas être poussées très loin sans soulever des discussions délicates (J. SCHELLING 1970, R. J. HUGGETT 1976). Elles font tout au moins comprendre que l'on peut donner d'une même science plusieurs versions, en des langages épistémologiques différents. C'est ainsi que la pédologie, telle qu'elle s'est constituée jusqu'à présent, peut être *en grande partie reconsidérée dans les termes de l'analyse de système*. C'est ce que propose notamment J. C. DIJKERMAN (1975). Il

ne suffit plus de comparer rapidement les deux schémas précédents (facteurs, processus, sol, input, black box, output), il faut aussi revenir aux notions plus générales de système et de modèle. J. C. DIJKERMAN l'a remarquablement fait, montrant la particularité du système-sol (système ouvert, inclus dans l'écosystème), et analysant ensuite tous les types de modèles (mentaux, verbaux, structuraux, mathématiques) et toutes les fonctions que ceux-ci peuvent remplir (observation, expérimentation, description, explication, prévision) pour la science du sol.

Cette reprise de la pédologie dans le paradigme de l'A.S. s'accommode de plus ou moins de rigueur ou de tolérance. Certains auteurs par exemple (Y. CHATELIN, D. H. YAALON, 1975) ont vu dans l'œuvre de H. JENNY (1941), qui porte le sous-titre « A system of quantitative pedology », un premier pas important dans le sens d'une véritable A.S. R. J. HUGGETT (*op. cit.*) insiste plus sur ses limitations, lui reprochant de n'établir de fonctions mathématiques qu'à un seul facteur, celui-ci étant extérieur au sol. Pour ce dernier auteur, il est possible de distinguer dans les travaux du passé ceux qui procèdent d'une approche systémique (system approach) implicite mais véritable, des autres relevant d'une approche fonctionnelle et factorielle (functional, factorial approach). Comme *précurseurs* directs de l'A.S. en pédologie, pour des travaux datant maintenant de plus de trente ans, R. J. HUGGETT et J. C. DIJKERMAN citent notamment JENNY, NIKIFOROFF, SIMONSON, VERNADISKII. On pourrait en ajouter bien d'autres.

Pour un passé plus récent, et avec la *période actuelle*, le nombre des auteurs ayant développé une démarche *pré-systémique* (sans modélisation particulière) devient de plus en plus grand. La référence à la notion de système est souvent affirmée par les auteurs eux-mêmes. Quelques exemples pourront être choisis dans la pédologie tropicale, qui seront considérés comme représentatifs d'une orientation plus générale de la science du sol. Nous retiendrons ainsi le travail de G. BOCQUIER (1971) sur les « systèmes biogéodynamiques ». L'auteur conclut son ouvrage sur ces remarques : « les sols doivent être intégrés dans des systèmes naturels où interviennent toutes les variables de la biosphère », « de tels systèmes ont déjà été définis : ce sont les biogéocénoses ou écosystèmes, et les paysages géochimiques ». La même interprétation générale se retrouve chez M. GAVAUD (1977), avec un effort supplémentaire de précision quant aux « limites du système-sol », à ses « axes d'organisation », à ses « compartiments » ou « sous-systèmes ». Parmi les travaux en cours qui n'ont pas encore donné tous leurs résultats semble-t-il, peuvent être cités ceux de R. BOULET et F. X. HUMBEL (1978) proposant

des cartes basées sur « l'organisation des systèmes de sols », et ceux de J. P. MULLER (1978) concernant les transformations des matériaux ferrallitiques meubles. Ces recherches pédogénétiques de J. P. MULLER sont présentées par leur auteur comme étant liées à des réflexions plus vastes sur « les frontières du système-sol » (1977), « les outils et les méthodes de l'approche systémique en pédologie » (1978). Les quelques citations qui viennent d'être faites suffiront sans doute à situer tous ces travaux par rapport à l'A.S., sans entrer dans davantage de détails (1).

Une analyse épistémologique semble plus délicate à tenter pour la *science du paysage* (2) que pour la pédologie. Cela provient sans doute de ce que, en tant qu'objet de connaissance, le paysage peut recevoir des statuts très différents. Le pédologue le décrit (Glossaire, 1971) comme l'environnement du sol, le biologiste le considère à travers les écosystèmes, le sociologue l'appréhende comme cadre de vie. Seuls certains géographes le présentent comme l'objet propre de leurs études.

Ainsi que le note J. F. RICHARD (1975), « le paysage est la traduction spatiale... d'un système socio-culturel... et d'un système naturel ». Ce n'est évidemment qu'en tant que système naturel, transformé dans certains cas par l'homme, que nous considérons ici le paysage. Comme pour la pédologie, il semble que la science du paysage actuelle oscille entre la méthodologie dialectique et l'ambition de se donner les moyens d'une analyse de système (G. BERTRAND 1968, J. F. RICHARD 1975). Cette orientation vers l'A.S. apparaît, chez les auteurs cités, notamment par l'importance donnée aux « géosystèmes », à leur classification et à leur cartographie.

Si l'on considère maintenant comment sont analysés et définis ces géosystèmes (G. BERTRAND, 1972), la méthode de travail apparaît assez classique, il n'y a pas de procédés spécifiques de l'A.S. Cela se retrouve d'ailleurs dans beaucoup d'autres études que celles des géographes attachés aux concepts de paysage et de géosystème. Nous retiendrons à ce propos l'exemple du travail de G. CALLOT

(1977) qui se base sur la « notion de système géopédologique régional ». Cette fois encore, le mot système introduit aux « relations qui pourraient exister entre les sols, les formations superficielles, le substratum », il n'annonce pas d'autres exigences méthodologiques.

Pour conclure cette courte analyse, nous proposerons de retenir que :

— la *compréhension* des objets et phénomènes naturels en tant que systèmes est ancienne ;

— la *référence* à la notion générale de système, ou tout au moins l'usage du mot système lui-même, se généralisent ;

— ces premiers faits s'accroissent des *moyens conceptuels habituels*, sans recours à une modélisation particulière ;

— les mêmes tendances se manifestent dans l'étude des *sols* (objets pédologiques) et des *paysages* (objets géographiques).

2° LES « SYSTÈMES » INFORMATIQUES EN PÉDOLOGIE

Comment définir les systèmes informatiques, les « soil information systems » des auteurs de langue anglaise ? J. SCHELLING (1975) a répondu ainsi à cette question : « An information system is a system consisting of procedures, machines, information carriers and data, that can be used to execute the necessary data and information processes. » La mention des appareillages (machines) est essentielle. Il n'y aurait pas de systèmes informatiques sans les ordinateurs, et sans les autres appareils, les bandes magnétiques, les fiches perforées, etc., qui leur sont associés. J. SCHELLING a complété sa définition par diverses remarques, dont celle-ci qui semble importante : « We can store and handle every large data sets, that cannot be handled simultaneously in any other way. » L'utilisation de l'*ordinateur*, le *grand nombre* des données, la *simultanéité* et la *rapidité* des traitements, voilà donc les traits essentiels des systèmes informatiques (3).

(1) Rappelons encore qu'il nous a paru plus juste (Y. CHATELIN, 1979) de définir ces travaux comme appartenant à une science développée dans la tradition épistémologique du matérialisme dialectique. C'est un changement de perspective circonstanciel qui nous les fait présenter ici comme pré-systémiques. Leur approche de la complexité de la Nature reste pour nous beaucoup plus dialectique que systémique, par manque de techniques particulières de modélisation. Ajoutons enfin que cela évite de placer toute la science contemporaine dans un paradigme unique (le paradigme systémique) comme le fait par exemple J. TRICART (1977) lorsqu'il prétend que « la théorie des systèmes... englobe et déborde la dialectique de la nature ». La fusion (ou la confusion) des paradigmes irait à l'encontre de la critique épistémologique et historique.

(2) Lorsqu'il s'agit de la géographie dans son ensemble, l'intérêt manifesté pour l'analyse de système apparaît très grand. L'Association des Géographes Français (*Bulletin* n°s 465, 468-469) a récemment considéré les problèmes posés. Là aussi, la distance entre prises de position théoriques et applications pratiques n'est pas facile à franchir (B. KAISER, 1979).

(3) Le mot système ne fait plus cette fois référence à des objets et des phénomènes naturels, mais uniquement à des moyens de traitement (du stockage au calcul) particulièrement performants.

Les systèmes informatiques destinés à la science du sol se sont donc mis en place récemment, avec la généralisation de l'usage des ordinateurs. Pour beaucoup de pédologues, ils sont *apparus comme une révolution scientifique*. Cette conviction se traduit notamment par le ton enthousiaste de nombreux textes. C'est ainsi que certains auteurs parlent volontiers de la « philosophie » de l'informatique appliquée aux sols (S. W. BIE et J. SCHELLING, 1975) non seulement sous son aspect général, mais aussi de la « philosophie » de chacune des nombreuses procédures utilisées (K. G. JEFFERY 1975). Bien entendu, il n'y a pas là de véritable philosophie, le mot n'est employé que pour attirer l'attention sur les problèmes de l'informatique. Si l'on considère maintenant les propos tenus non pour l'étude spécifique des sols mais pour l'étude de l'ensemble de la biosphère, le langage se fait encore plus exaltant. Les éditoriaux de J. P. PETIT, Président d'Informatique et Biosphère, donnent le ton, saluant « l'aventure cosmique de l'esprit humain », présentant comme « un de nos actes de foi fondamentaux... de croire cette révolution possible », révolution mise sous la dépendance de « l'outil qui nous semble permettre d'atteindre tous ces buts : l'informatique ». Ces quelques citations pourront peut-être paraître dénaturées parce qu'elles sont extraites de leur contexte explicatif et parce qu'elles sont trop brutalement juxtaposées, nous ne les retenons que comme de rapides témoignages de tout un état d'esprit.

L'informatique a rapidement occupé des positions en vue, aux échelons *nationaux et internationaux*. En France, l'association Informatique et Biosphère a vu le jour en 1971. L'étude des sols s'y inscrit parmi des préoccupations plus larges, puisqu'elles concernent toute la biosphère. Néanmoins, dans le simple domaine des sols, l'influence d'Informatique et Biosphère est très grande, elle s'est concrétisée notamment dans l'élaboration d'un Glossaire (1971) devenu d'usage courant. De son côté, la Société Internationale pour la Science du Sol a constitué un « Working Group on Soil Information Systems » qui organise, depuis 1975, une rencontre annuelle, et elle publie les communications qui y sont faites. La Société Internationale a tenu, en 1978, un congrès général. Parmi les 6 Symposiums qui y étaient inscrits, l'un d'eux avait pour intitulé « Resource Information Systems ». Ainsi, à cet échelon international, l'informatique est incontestablement tenue pour un moyen important de faire progresser la science du sol. La Société Internationale comme Informatique et Biosphère ne sont pas des structures de recherches au sens propre, elles ne font que réunir des chercheurs appartenant à des organismes variés. Leur existence et les orientations qu'elles prennent

sont des émergences : elles expriment les préoccupations du moment.

Dans le domaine des *réalisations pratiques*, en nous limitant au cadre français, plusieurs organismes peuvent être mentionnés. Depuis 1963, l'O.R.S.T.O.M. a préparé une banque de données, gérée et exploitée par les méthodes informatiques. Les derniers développements de ce travail sont présentés par R. Van den DRIESSCHE *et al.* (1975). La S.O.G.R.E.A.H. possède également son équipement et ses programmes, qui ont été décrits par P. JONGEN (1975), et pratique la cartographie assistée par ordinateur. Sur ce dernier thème enfin, il faut rappeler les activités de l'I.N.R.A. et la mise au point du « système I.N.R.A.-6 » (J. P. LEGROS et E. HENSEL, 1977).

S'il est facile d'identifier les réalisations précédentes en les attribuant à des organismes de recherche, il est plus délicat de présenter les individus ou les *équipes* qui les animent, et de faire un choix parmi leurs *publications*. Ainsi que dans le chapitre sur les études dites pré-systémiques, nous donnerons ici quelques références significatives mais sans aucune intention d'exhaustivité. Il semble nécessaire de concevoir de façon large ce qui peut servir une exploitation informatique, notamment les méthodes statistiques pouvant être transcrites en programmes pour ordinateurs. En ce sens, nous pourrions citer les travaux de R. Van den DRIESSCHE et R. Maignien (1965), R. Van den DRIESSCHE *et al.* (1973, 1975), ceux de M. C. GIRARD (1969, 1975, 1977), de G. AUXENFANTS (1976). Comme exemples d'applications au classement des sols, nous retiendrons les travaux de J. COINTEPAS (1974), D. MARTIN et A. M. AUBRY (1975), D. MARTIN (1976). Enfin, les recherches sur la cartographie assistée par ordinateur seront illustrées par les communications de J.-P. LEGROS et E. HENSEL (*op. cit.*) et de J.-P. MALLET (1977).

Il est parfois question de *prévision de comportement*, certains auteurs affirmant que les systèmes informatiques permettent, ou vont prochainement permettre de prévoir (et de contrôler) la productivité des sols. Il semble pour l'instant que ces prévisions découlent de comparaisons, ou de corrélations statistiques, avec *des situations antérieures connues*. Cela reste très différent de la prévision par simulation d'un modèle.

Quelles sont les *perspectives d'avenir* des systèmes informatiques? S. W. BIE (1975), puis J. SCHELLING et S. W. BIE (1978) sous le titre « Considerations for the future », mentionnent essentiellement le développement et l'intégration des systèmes actuels. Par intégration, il faut entendre l'articulation des systèmes permettant la communication et la mise en correspondance des données, celles concernant

les sols avec celles de l'environnement, ou avec celles des résultats cultureux, etc. Les auteurs cités suggèrent la création d'un organisme international d'informatique. Aux U.S.A. et au Canada, l'intégration des banques est étudiée, sinon en cours de réalisation (D. E. McCORMACK *et al.*, 1978). Les pédologues français sont sollicités en ce sens eux aussi par l'Agence de Coopération Culturelle et Technique qui propose aux pays francophones un système informatique unifié.

L'informatique a donc obtenu un succès incontestable, en ce sens qu'elle s'est acquis le concours de nombreux spécialistes et qu'elle a reçu des crédits pour fonctionner. Il est possible aussi qu'elle soit utile, c'est-à-dire que la société trouve bénéfique à la financer. Mais la question que nous posons n'est pas là. Il s'agit pour nous d'évaluer l'apport de l'informatique à la science du sol (1), et cela plus précisément dans les perspectives de l'A.S. Voici ce qu'il semble que l'on puisse dire de l'informatique :

— elle a permis de constituer des *banques de données*, et ce faisant elle a contraint les pédologues à des observations *objectives* et *normalisées* ;

— elle donne de grandes facilités pour les *analyses statistiques*, et plus précisément pour les analyses *multivariées* de données paramétriques ou non paramétriques, remplaçant ainsi beaucoup d'appréciations qui auparavant restaient qualitatives ;

— elle est utilisée pour établir des *taxonomies numériques*, mais cela n'est qu'un aspect du point précédent, ces taxonomies étant dérivées de l'analyse multivariée ;

— elle commence à être utilisée pour la *cartographie*.

Afin d'expliquer les positions qui seront prises en conclusion du présent article, il est nécessaire de porter un *jugement de valeur* sur les *acquis scientifiques* (2) à porter au compte des opérations qui viennent d'être énumérées. Car si certains auteurs

débordent d'enthousiasme dès qu'il s'agit d'informatique, d'autres sont très réticents. Comme le rappelle J. SCHELLING (*op. cit.*) : « Some people see the system (soil information system) as a dumb machine that frustrates man by its stupidity ». Le point de vue de J. PAPADAKIS (1978) est intéressant à considérer, dans la mesure où il s'agit d'un spécialiste des sols dont la réflexion s'étend à l'ensemble de la science. Pour lui, les statistiques et les ordinateurs ont eu un effet négatif sur la mentalité des chercheurs et nous sommes actuellement dans une période de décadence non seulement culturelle mais aussi scientifique. PAPADAKIS souligne que les données s'accumulent de façon extraordinaire sans que l'on parvienne à en faire véritablement de la science. Entre ces différentes perspectives et en restant dans le domaine qui nous concerne, nous compléterons les remarques des paragraphes précédents par celles-ci :

— les publications qui traitent de *méthodes* sont nombreuses, mais par contre (les travaux d'ingénieurs mis à part) il en est peu qui proposent des *résultats* ;

— les quelques résultats malgré tout acquis (corrélations, taxonomies numériques, etc.) n'ont qu'une *faible portée scientifique*. Par exemple, les taxonomies numériques restent sans incidence sur la classification générale des sols. Les systèmes informatiques n'ont rien apporté non plus aux problèmes pédogénétiques classiques (3). D'un autre côté, ils n'ont pas renouvelé la problématique générale de la science du sol (chapitre II) ;

— ayant manqué leur liaison avec les problèmes posés par la recherche en science du sol, les responsables des systèmes informatiques pratiquent la *fuite en avant*. C'est ainsi que l'on peut interpréter leur désir de créer des systèmes intégrés, des banques internationales. Ce que l'on n'a pas réussi à réaliser dans un cadre scientifique et géographique limité, on espère l'obtenir à un *niveau de complexité encore supérieur*.

(1) Entre autres exemples possibles, il est facile de recenser ce qu'ont apporté comme connaissances pédologiques l'utilisation du microscope électronique, l'utilisation des radioéléments, etc. Il doit être possible d'en faire autant pour les systèmes informatiques.

(2) Une science se définit d'abord par une pratique (méthodes, appareillages...) puis en dernière analyse par une *connaissance*, celle-ci réunissant des concepts variés (faits scientifiques, lois, théories, explications...). La connaissance est un fait strictement humain. Elle se prête à la communication entre hommes. La sémantique contemporaine souligne à juste titre la distinction entre « connaissance » et « information ». De nombreuses informations peuvent constituer une connaissance pauvre. L'accumulation des données dans les banques informatiques ne représente pas nécessairement une « science », le mot « informatique » est là pour le rappeler.

(3) Pourrait-on citer beaucoup de travaux de thèse ayant utilisé une banque de données ? Connaît-on un *Traité de Pédologie* que son auteur aurait élaboré avec l'aide de systèmes informatiques ? C'est en réfléchissant à ce genre de question que l'on pourra aborder le problème des acquis scientifiques.

3° UNE MODÉLISATION TECHNIQUEMENT AVANCÉE

Les principes et les techniques de la modélisation occupent une place importante dans l'actualité scientifique. Parmi les œuvres de base, il convient de rappeler celles de L. von BERTALANFFY (1968) et de N. WIENER (1961). De multiples travaux les ont suivies, sur le plan de la recherche bien entendu, et aussi sur celui allant de l'enseignement spécialisé à la vulgarisation. C'est donc un large éventail de publications qui est offert à qui veut aborder le problème. Parmi d'autres qui donnent notamment un accès pratique à la modélisation, nous mentionnerons les ouvrages de J. POPPER (1973), de J. L. LEGAY et J. D. LEBRETON (1973), de Ch. FEUVRIER (1971) et de J. L. le MOIGNE (1977). Rappelons que la modélisation est considérée comme l'outil spécifique d'une analyse de système vraie. Enfin, comme exemples pratiques de ce qui peut se faire dans une discipline (géologie) proche de ce qui est considéré ici, nous retiendrons les travaux de J. BERTIN, F. BOUILLE et P. GRAND-CLAUDE (1979).

Si l'analyse de système occupe une position forte dans l'ensemble de la science contemporaine, il n'en est pas de même en *science du sol*. Elle y apparaît plutôt comme une *ébauche*, dont il est assez difficile d'imaginer l'importance qu'auront ses futurs développements (paragraphe suivants). Quelques dizaines de publications, assez dispersées, représentent sans doute tout ce qu'on peut lui attribuer pour l'instant. Deux d'entre elles nous semblent devoir être prises comme points de départ fondamentaux. Il s'agit des publications d'E. C. A. RUNGE (1973) et de J. R. KLINE (1973). Un peu plus récents, les travaux de J. C. DIJKERMAN (1974), R. J. HUGGETT (1975) et D. H. YAALON (1975) ont l'intérêt de présenter déjà de bonnes revues bibliographiques. Ce sont ces quelques documents qui sont à la base des réflexions proposées ici.

Il semble que l'on peut définir tout d'abord une *modélisation mathématique*, qu'il faut distinguer des nombreuses relations mathématiques plus simples que la science du sol utilise depuis toujours, de même que des corrélations multivariées que l'on doit aux systèmes informatiques. La distinction de ces différents procédés n'est pas toujours évidente, et nous ne pouvons pas nous y attarder. Pour situer ce que peut être la modélisation mathématique,

nous retiendrons un exemple celui de l'*application des lois thermodynamiques* aux processus pédogénétiques, et notamment à l'altération. La résolution des équations est complexe, des représentations graphiques (comme celles des diagrammes d'équilibre) sont souvent utilisées. C'est ainsi que W. CHESWORTH (1973) établit des modèles de l'altération des roches, ou qu'A. BOULAD *et al.* (1977) calculent des vitesses d'altération (à partir des compositions isotopiques). La modélisation mathématique est évidemment utilisable pour d'autres phénomènes pédologiques. C'est à elle que l'on peut rattacher, plus ou moins strictement, les modèles théoriques d'E. C. A. RUNGE (*op. cit.*), ceux de J. R. KLINE (*op. cit.*), de C. W. BOAST (1973), certains calculs de R. WEBSTER (1978), etc.

Dans la diversité des formulations mathématiques, les *modèles cybernétiques* sont plus facilement identifiables que les précédents : irréalisables par les méthodes traditionnelles de calcul, ils sont produits par l'ordinateur exécutant des programmes complexes. Les modèles cybernétiques sont notamment utilisés pour l'*étude des flux* de matière ou d'énergie traversant les sols. Les transferts *théoriques* de chaleur, d'eau, d'ions, etc., ont été ainsi traités notamment par G. R. DUTT *et al.* (1972), C. T. de WIT et H. VAN KEULEN (1972), R. J. HUGGETT (*op. cit.*). Des données empiriques peuvent être utilisées, pour construire les modèles du *fonctionnement réel* de sols bien définis dans leur environnement naturel.

La science du sol est encore assez peu engagée dans ces voies, mais elle peut essayer de profiter de l'expérience acquise ailleurs pour faire un peu de prospective. La modélisation est devenue un procédé de travail courant pour l'hydrologie ou la climatologie, mais les phénomènes étudiés n'ont pas la complexité de ceux caractérisant les sols, et ils ne concernent que de courtes périodes sans rapport avec la durée pédogénétique. Les systèmes pédologiques, les systèmes paysagiques sont par contre beaucoup plus proches des *écosystèmes* (1). Les rapports des uns et des autres ont été analysés par J. F. RICHARD (*op. cit.*). Or incontestablement, toutes les ressources de l'A.S. ont été rapidement mises à la disposition de l'étude des écosystèmes. Qu'ont-elles globalement apporté?

Laissons les écologistes répondre eux-mêmes à cette question. A propos du programme « prairie » du Programme Biologique International, voici ce

(1) L'écosystème est défini comme « un système évolutif fondé sur l'interaction de facteurs physiques, chimiques, biologiques et humains assurant un transfert de matière et d'énergie et déterminant des possibilités de vie » (Informatique et Biosphère, 1975). Par rapport à cette définition très large, sols et paysages pourraient être considérés comme des sous-systèmes de l'écosystème. On pourrait dire aussi qu'ils représentent la structure dont l'écosystème décrit le fonctionnement.

qu'a cru pouvoir écrire M. GOUNOT (1975). « Nous nous bornerons à quelques remarques sur le programme des États-Unis qui a été à la fois le mieux doté en moyens matériels (environ 2 millions de dollars par an!) et celui qui a poussé le plus loin l'effort de modélisation... En dépit de l'intérêt exceptionnel de ces publications, on peut d'ores et déjà conclure que les objectifs initiaux du P.B.I. ne seront pas atteints... La concentration de moyens exceptionnellement puissants n'a pas été suffisante pour permettre de construire des modèles fonctionnels et plus ou moins complets... Ce bilan est évidemment décevant et la tentation est grande de céder au découragement et de renoncer à construire des modèles d'écosystèmes. »

C'est Informatique et Biosphère encore qui a organisé (1975) un colloque sur l'étude et la cartographie intégrées du milieu naturel. Des principes de travail ont été présentés, voici sur quel constat ils aboutissent. « Élaborés par deux groupes de travail ayant réuni au cours d'une vingtaine de séances plus de 70 participants, ces principes méthodologiques et opérationnels pourront être jugés par certains comme très théoriques et difficilement utilisables, ne présentant aucun 'modèle' directement applicable pour la résolution de problèmes concrets. » Il est ajouté ensuite que « ces principes méthodologiques et opérationnels constituent un 'schéma de départ' utilisable par les diverses disciplines concernées ». En conclusion d'un travail personnel de modélisation des écosystèmes, J. P. CANCELA DA FONSECA (1978) conclut (comme d'ailleurs M. GOUNOT, *op. cit.*) que l'on obtient « toujours un modèle partiel de la réalité ». En d'autres termes, nous dirons que la modélisation des écosystèmes, dans leurs dimensions spatiales et temporelles réelles, reste actuellement et pour un avenir prévisible encore hors de portée.

Effectivement, lorsqu'il s'agit de réaliser concrètement un « inventaire écologique » à l'échelle d'un « territoire », ce sont des méthodes assez conventionnelles que le colloque en question trouve à donner en exemple (M. JURDANT *et al.*, 1975). Nous ne voulons pas déprécier ces études qui sont excellentes,

mais simplement rappeler qu'elles conduisent à des formulations étrangères aux modèles de l'A.S., même si leurs données passent par un système informatique à un moment ou à l'autre du travail. Ces formulations sont analogues à celles des géosystèmes, que nous avons présentées plus haut comme exemple d'une méthodologie pré-systémique (1).

Nous concluons ainsi :

— la modélisation mathématique et cybernétique apparaît, pour les pédologues et les géographes du milieu naturel, comme un *renouvellement méthodologique et conceptuel* de très grand intérêt ;

— mais les modèles en question ne sont opérationnels que pour des problèmes limités et des espaces-temps réduits, il ne peut être question de délaisser pour autant toute *la partie du champ scientifique qui leur échappe*.

4° LE RETOUR AUX MODÈLES VERBAUX

Pour L. VON BERTALANFFY lui-même (*op. cit.*), « un modèle verbal vaut mieux que pas de modèle du tout », et il faut admettre que « les modèles verbaux ont donc leur place dans la théorie des systèmes ». Dans le passage de la théorie générale des systèmes (T.G.S.) à l'analyse de système proprement dite (A.S.) des restrictions sont apportées, puisque dans cette dernière les modèles verbaux ont cédé la place à des modèles techniquement plus avancés. Cela rappelé, il faut aussi reconnaître que les modèles verbaux peuvent être de multiples sortes, et que certains mieux que d'autres s'intègrent à la T.G.S. et même s'approchent de l'A.S.

Une analyse du *langage traditionnel* de la science du sol (Y. CHATELIN, *op. cit.*) transposable à celui de la géographie des paysages, a montré la mauvaise adaptation de ce langage au processus de la connaissance scientifique. C'est en effet un corps lexical peu spécialisé qui est employé, comportant un faible nombre de termes spécifiques. Les perturbations que peut accepter le langage de la vie courante

(1) Voici un extrait de la légende donnée par M. JURDANT *et al.* (*op. cit.*) pour les sols :

Les figurés définissent la classe de relief :

F : plat

U : ondulé

R : moutonné

H : montueux ou accidenté

M : montagneux ou très accidenté

Le premier chiffre donne l'épaisseur des dépôts meubles :

1 : épais

2 : épais et mince

3 : épais et affleurement rocheux

4 : mince et épais

5 : mince et affleurement rocheux, etc.

Le second chiffre donne la nature des matériaux géologiques de surface :

1 : till épais

2 : sédiments fluvio-glaciaires

3 : sédiments deltaïques post-glaciaires, etc.

s'aggravent dans le contexte scientifique. La synonymie, la polysémie, la dérive des significations (1) parviennent à masquer la répartition réelle de certains caractères. L'anthropomorphisme implicite de certains mots, la charge émotionnelle de certains autres, les connotations diverses (1) vont directement à l'encontre des règles de l'objectivité. La faible spécialisation du lexique a pour corollaire la complication et la longueur des opérations de description. La carence descriptive laisse libre cours aux théories les plus spéculatives. Un tel langage, cela est évident, est très loin de constituer des modèles verbaux rigoureux.

Science du sol et science du paysage se trouvent donc bloquées entre un langage inadapté d'une part, et d'autre part l'impossibilité d'un recours généralisé à de nouvelles techniques de modélisation. C'est cette situation qui a conduit un groupe de chercheurs à reconsidérer le problème du langage scientifique. Différents champs sémantiques sont distingués. Celui de l'interprétation, des concepts génétiques, doit conserver sur le plan linguistique une dynamique libre. D'autres (minéralogie, micromorphologie des sols) bénéficient déjà de terminologies satisfaisantes. Par contre, toute la description morphologique, aux différentes échelles de perception, a été reprise et traduite par un ensemble lexical nouveau. Les travaux de ce groupe de chercheurs ont fait l'objet de publications diverses. Parmi elles, trois peuvent être retenues comme essentielles. La première (Y. CHATELIN et D. MARTIN, 1972) proposait une terminologie limitée aux sols ferrallitiques. La seconde (J. F. RICHARD *et al.*, 1977) a étendu les mêmes principes descriptifs et terminologiques à l'ensemble du milieu naturel. La troisième enfin (A. G. BEAUDOU *et al.*, 1978) donne une vision générale de la méthodologie ainsi constituée, et met l'accent sur les motivations (épistémologiques) et sur les objectifs concrets. C'est de ces travaux qu'il sera question maintenant.

L'originalité fondamentale de cette méthodologie, c'est de constituer des typologies basées sur la définition, d'un certain nombre de diagnostics. Cette remarque peut surprendre, si l'on imagine que toute démarche

scientifique procède habituellement ainsi. Pourtant ce n'est pas toujours le cas, et la manière dont on a voulu se servir de l'informatique a creusé là une lacune. En effet, les deux Glossaires (1969, 1971) établis pour l'utilisation informatique (sols et environnements) ont imposé une description au niveau le plus élémentaire, basée sur un langage aussi peu spécialisé que possible. Cela, qui exclut la reconnaissance de types, se justifie à un stade tout à fait préliminaire de la démarche scientifique. Mais on a voulu en rester là, et alimenter les banques de données uniquement ainsi (d'où l'inflation des opérations de mise en mémoire), pour établir ensuite d'éventuelles taxonomies. Or nous situons la place des typologies entre celle des descriptions élémentaires et celle des taxonomies. Celles-ci représentent (pour la pédologie) des individus-sols complets d'une part, et d'autre part elles font la synthèse de tout l'acquis scientifique. C'est au contraire sur des champs sémantiques étroits que s'établissent les typologies proposées (2).

Les typologies sont exprimées par une *structure linguistique nouvelle*, adaptée à ses objets. En premier lieu, les termes retenus éliminent les facteurs habituels de perturbation du langage rappelés plus haut (connotation, polysémie, etc.). En second lieu, ce qui est plus important encore, ils ont des capacités de dérivation et de combinaison leur permettant de décrire la multiplicité des agencements naturels, qu'il s'agisse d'intergrades entre des orthotypes, ou de la juxtaposition de types différents qu'il faut quantifier les uns par rapport aux autres. Tout cela s'accommode d'une grande concision, car chaque élément linguistique (y compris les quelques lettres d'un simple radical) est porteur d'une signification précise, des règles d'écriture (codification de la place de chaque élément) exprimant les importances respectives. Une disposition en graphe peut ajouter une visualisation spatiale supplémentaire. On aboutit ainsi (fig. 1) à un modèle verbal beaucoup plus riche et plus dense qu'une description en langage banal.

Il doit être facile maintenant de comprendre en quoi cette méthodologie va se rapprocher d'une

(1) Les faits scientifiques ne peuvent pas être considérés comme les événements de la vie courante. Une seule observation, une seule expérience scientifiques peuvent être essentielles. Aussi des phénomènes linguistiques qui enrichissent le langage courant et lui donnent vie, au prix d'une certaine instabilité, deviennent destructifs pour la science. Celle-ci doit séparer ses lexiques, le descriptif du spéculatif, donnant à chacun une dynamique propre.

(2) A titre d'exemple, et en quelques lignes seulement, voici comment peut être défini le type pédologique dénommé « structichron » (A. G. BEAUDOU *et al.*, 1978) : « Il s'agit d'un horizon minéral, meuble, friable, poreux, homogène, de couleur vive jaune ou rouge. Il est homogène en ce sens que toutes les particules, argileuses ou sableuses, ferrugineuses ou non ferrugineuses, sont intimement associées entre elles. Cette définition ne fait appel qu'à des critères relevant d'une observation morphologique simple. Ceci est donc en accord avec le principe du partage sémantique. Mais on peut aussi transposer cette définition sur un plan génétique, en rappelant qu'un structichron provient d'un matériau originel transformé par altération, argilification, pédoplasmation. On peut également changer d'échelle, et définir l'organisation structichrome par l'observation micromorphologique comme l'association d'un plasma plus ou moins isotrope et d'un squelette quartzeux ou ferrugineux. »

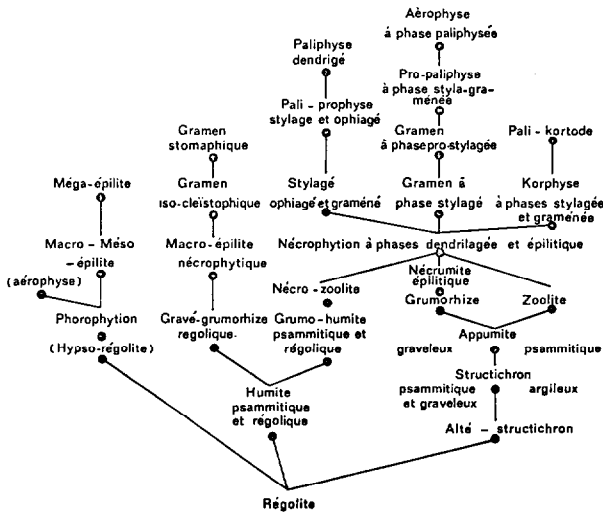


Fig. 1. — Segment paysagique de sommet d'inselberg, en milieu ferrallitique (d'après J. F. RICHARD *et al.*, in A. G. BEAUDOU *et al.*, *op. cit.*)

A.S., et comment elle va conduire à l'interdisciplinarité. Pour cela, il faut souligner d'abord que c'est la *totalité des corps naturels* qui est prise en compte. Le premier niveau de diagnose (qui a fourni l'exemple de la figure 1) a comme règle essentielle de donner une identification et une représentation de tous les éléments minéraux et végétaux constituant le paysage (1). Cela peut être réalisé à différentes échelles de perception, le langage typologique se prêtant à l'extension ou à la réduction de l'information, sans dénaturer celle-ci. Un effort particulier a été fait pour parvenir à rendre compte des *dimensions spatiales réelles* des paysages (contrairement aux études d'écosystèmes qui sont souvent stationnelles). La typologie ainsi comprise, permettant la description globale des paysages, conduit donc directement à la cartographie (voire par exemple le travail de S. DJIBO *et al.*, 1980).

La prise en compte des totalités conduit aussi à mettre en évidence *les interactions du système naturel étudié*. Il est assez facile de chercher, dans un graphe comme celui donné plus haut en exemple, où peuvent se situer les relations fonctionnelles.

Par la comparaison de nombreux graphes constitués de la même manière, il sera possible de repérer les associations constantes, traduisant de nouvelles relations fonctionnelles moins apparentes que les précédentes. Les méthodes traditionnelles ne sont pas allées assez loin dans l'étude des relations sols-plantes dans les conditions naturelles (2). Les relevés typologiques proposés permettront d'effectuer un pas supplémentaire. Ils définissent la végétation par des critères à signification dynamique, liés à la connaissance des « modèles de croissance » (F. HALLÉ et R. A. A. OLDEMAN, 1970). Ils pourront montrer et quantifier la dépendance dynamique des formations végétales par rapport aux caractères des sols et du relief. Ce type de problème semblait jusqu'à présent devoir se limiter à des études ponctuelles mais pourtant très lourdes (calcul des biomasses). Il apparaît maintenant possible de reprendre ce problème par une approche tout à fait différente (A. G. BEAUDOU et P. de BLIC, in BEAUDOU *et al.*, *op. cit.*), jusqu'aux dimensions réelles des paysages.

Malgré la rapidité des exposés précédents, un caractère de la méthodologie proposée doit nettement ressortir : c'est celui de *la transdisciplinarité*. Un relevé seulement a pu être pris pour exemple (fig. 1), mais puisqu'il est donné pour la représentation d'un paysage, il est bien évident (sans même connaître la signification de chaque terme) qu'il est homogène et traité de la même manière les composantes pédologiques et végétales. Cette transdisciplinarité, à vrai dire, est *la condition indispensable d'une approche systémique authentique*. Le découpage interdisciplinaire a constitué jusqu'à présent des barrières épistémologiques presque infranchissables. Les difficultés des études sols-plantes qui devraient pourtant être au cœur de la problématique du milieu naturel, sont bien là pour le montrer.

En résumé :

— nous pouvons reconnaître que, pour la scientifique de notre époque, les modèles verbaux proposés n'ont sans doute pas le prestige des techniques cybernétiques ;

— mais il faut ajouter que ces modèles verbaux ont l'immense avantage de pouvoir être réellement *mis en pratique*, dans une perspective incontestablement *transdisciplinaire et systémique*.

(1) Dans la méthodologie traditionnelle, la description élémentaire (Glossaires de Pédologie) se veut exhaustive elle aussi, mais les représentations données à un niveau supérieur d'abstraction ou de généralisation sont plus facilement sélectives que synthétiques.

(2) Cette remarque demanderait évidemment à être discutée, pour rappeler notamment les apports de la phytosociologie, de la phytogéographie, etc.

CONCLUSION

Le texte qui précède et qu'il faut maintenant conclure a voulu être un essai critique, mais il est également engagé dans une direction bien définie. Ses commentaires ont été argumentés autant que possible, sans pouvoir prétendre donner une vision complète de toutes les pratiques scientifiques invoquées. Nous souhaitons donc que le lecteur approfondisse sa compréhension des méthodes préconisées ici, en se reportant aux publications originales données en référence. Il se peut, d'un autre côté, que l'on nous reproche d'écarter des méthodes considérées ailleurs comme éprouvées, sans les connaître suffisamment, et sans les avoir mises en œuvre. A cela nous répondrons que tous les chercheurs se trouvent placés devant la même nécessité : celle de faire un choix méthodologique. Ce choix, nous l'avons explicité plus qu'il n'est coutume de le faire.

La grande critique que nous avons faite aux systèmes informatiques actuellement en place, c'est de s'alimenter avec des données collectées au niveau le plus analytique, ou le plus élémentaire. La situation changerait radicalement si l'on utilisait des données plus structurées, telles que nous les proposons. Chaque diagnostic typologique représente en effet un fait scientifique déjà élaboré. Dans un travail récent, J. F. RICHARD et J. C. FILLERON (1979) viennent de donner un premier exemple d'une utilisation informatique de ces diagnostics typologiques. Aussi peut-on espérer que de nouvelles

bases de données vont bientôt rendre caduque l'actuelle opposition méthodologique entre « systèmes informatiques » et « modèles verbaux » et qu'elles permettront un progrès vers une modélisation à plus haute technicité.

Sera-t-il possible de parvenir à une étude « systémique » au sens le plus complet ? La réponse à cette question peut comporter quelques restrictions si l'on entend ne pas céder à un enthousiasme exagéré. Il n'est pas inutile de réfléchir aux objets étudiés : sols et paysages, en se référant à la classification proposée par K. BOULDING (1). Cette classification des « objets » s'établit en 9 niveaux. Le premier est celui de l'objet passif, le deuxième celui de l'objet actif, le troisième celui de l'objet régulé. Au quatrième niveau se place l'objet informé. Les objets des niveaux suivants sont caractérisés par l'intervention de la décision, de la mémoire, de la coordination, de l'imagination, et de l'intentionnalité. Chaque nouveau type de « processeur » implique de nouvelles techniques de modélisation, à chaque fois plus complexes. Il est un fait historique que ce qui a fait « émerger » l'A.S. ce sont les niveaux élevés de la classification en question. Sans doute, sols et paysages sont-ils des objets aux multiples interrelations, mais ces interrelations peuvent relever de schémas logiques simples et il n'est pas évident que tout cela conduise très loin à l'intérieur de la *Théorie du Système Général*.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 11 septembre 1981.*

(1) J.-L. Le MOIGNE (1977) a fait un long exposé sur les 9 niveaux de cette classification. Il rappelle que si la systémique les intègre tous, la mécanique ou la théorie des ensembles suffisent à recouvrir les premiers.

BIBLIOGRAPHIE

- AUXENFANTS (G.), 1976. — Méthodes de l'analyse de données et science du sol. *Informatique et Biosphère*, 6 : 31-68.
- BAREL (Y.), 1970. — Prospective et analyses de systèmes. *Le Progrès Scientifique*, 142 : 4-36.
- BEAUDOU (A. G.), BLIC (P. de), CHATELIN (Y.), COLLINET (J.), FILLERON (J. C.), GUILLAUMET (J. L.), KAHN (F.), KOLI B. ZUELI, RICHARD (J. F.), 1978. — Recherche d'un langage transdisciplinaire pour l'étude du milieu naturel (tropiques humides). O.R.S.T.O.M., *Trav. et Doc.* n° 91, 143 p.
- BERTALANFFY (L. von), 1968. — Théorie générale des systèmes. [Trad. J. B. Chabrol], Dunod (1973), 296 p.
- BERTIN (J.), BOUILLE (F.), GRANDCLAUDE (P.), 1979. — Approche systémique de l'information dans les sciences de la terre. In « La systémique dans les sciences de la Terre », C.N.R.S. : 175-190.
- BERTRAND (G.), 1968. — Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Rev. Géogr. Pyr. Sud-Ouest*, 39, 3 : 249-272.
- BERTRAND (G.), 1972. — Les structures naturelles de l'espace géographique. L'exemple des Montagnes Cantabriques Centrales (nord-ouest de l'Espagne). *Rev. Géogr. Pyr. Sud-Ouest*, 43, 2 : 175-206.
- BIE (S. W.), 1975. — Towards integrated soil information systems. Proc. Meet. I.S.S.S. Working Group on Soil Information Systems : 73-78.
- BIE (S. W.), SCHELLING (J.), 1975. — Soil information systems in 1975. Proc. Meet. I.S.S.S. Working Group on Soil Information Systems : 4-12.
- BOAST (C. W.), 1973. — Modeling the movement of chemicals in soil by water. *Soil Sci.*, 115, 4 : 224-230.
- BOCQUIER (G.), 1971. — Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse, Strasbourg, 364 p.
- BOULAD (A. P.), MULLER (J. P.), BOCQUIER (G.), 1977. — Essai de détermination de l'âge et de la vitesse d'altération d'un sol ferrallitique camerounais à l'aide de la méthode du déséquilibre radioactif uranium-thorium. *Sci. Géol., Bull.*, 30, 3 : 175-188.
- BOULET (R.), HUMBEL (F. X.), 1978. — Méthode d'étude et de représentation des couvertures pédologiques par la section de Cayenne. O.R.S.T.O.M., Cayenne, 17 p.
- CALLOT (G.), 1977. — Logique de la distribution des sols et formations superficielles sur plate-forme calcaire. *Science du Sol*, 4 : 189-205.
- CANCELA DA FONSECA (J. P.), 1978. — Analyse de systèmes écologiques. Actes 3^e Colloque Informatique et Biosphère : 9-43.
- CHATELIN (Y.), 1979. — Une épistémologie des sciences du sol. *Mémoires O.R.S.T.O.M.*, n° 88, 151 p.
- CHATELIN (Y.), MARTIN (D.), 1972. — Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 10, 1 : 25-43.
- CHESWORTH (W.), 1973. — The residua system of chemical weathering : a model for the chemical breakdown of silicate rocks at the surface of the earth. *Journ. Soil Sci.*, 24, 1 : 69-81.
- COINTEPAS (J. P.), 1974. — Application d'une analyse multivariable à quelques problèmes de pédogenèse en Tunisie. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 12, 2 : 145-170.
- DIJKERMAN (J. C.), 1974. — Pedology as a science : the role of data, models and theories on the study of natural soil systems. *Geoderma*, 11, 2 : 73-93.
- DJIBO (S.), OUSSEINI (I.), SALIFOU (K.), 1980. — Cartographie intégrée du milieu naturel. Inventaire et description des paysages de la région de Korhogo (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). O.R.S.T.O.M.-I.G.T., Abidjan, 657 p., cartes h.-t.
- DUTT (G. R.), SHAFFER (M. J.), MOORE (W. J.), 1972. — Computer simulation model of biophysicochemical processes in soils. Tucson (Univ. of Arizona), *Agr. Exp. Sta., Techn. Bull.*, 196, 101 p.
- FEUVRIER (Ch. V.), 1971. — La simulation des modèles. Dunod, 149 p.
- GAVAUD (M.), 1977. — Essai sur la classification génétique des sols. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 15, 1 : 63-87.
- GERASIMOV (I. P.), 1966. — A world soil map and associated scientific problems. *Soviet Soil Science*, 4 : 369-380.
- GIRARD (M. C.), 1969. — Interprétation statistique des résultats d'analyses en pédologie, et introduction de la mesure des distances de Hiernaux. *Science du Sol.*, 1 : 37-62.
- GIRARD (M. C.), 1976. — Recherche d'une méthode pédologique en matière de traitement statistique des données de sol. Applications à la taxonomie et à la cartographie. *Science du Sol*, 3 : 177-204.
- GIRARD (M. C.), 1977. — L'horizon mis à l'épreuve statistique. *Science du Sol*, 4 : 219-230.
- Glossaire de Pédologie, 1969. — Description des horizons en vue du traitement informatique, O.R.S.T.O.M., *Inil. Doc. Techn.*, n° 13, 82 p.
- Glossaire de Pédologie, 1971. — Description de l'environnement en vue du traitement informatique. *Informatique et Biosphère*, 173 p.
- GOUNOT (M.), 1975. — Modèles d'écosystèmes et politique d'aménagement. Actes 2^e Colloque Informatique et Biosphère : 17-31.

- HALLE (F.), OLDEMAN (R. A. A.), 1970. — Essai sur l'architecture de croissance des arbres. Masson, 178 p.
- HUGGETT (R. J.), 1975. — Soil landscape systems : a model of soil genesis. *Geoderma*, 13, 1 : 1-22.
- HUGGETT (R. J.), 1976. — Conceptual models in pedogenesis. A discussion. *Geoderma*, 16, 3 : 261-262.
- JEFFERY (K. G.), 1975. — Philosophies of computer-based data base management systems. Proc. Meet. I.S.S.S. Working Group on Soil Information Systems : 36-42.
- JENNY (H.), 1941. — Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw-Hill Book Company, 281 p.
- JONGEN (P.), 1975. — Large soil data sets and their manipulation. Proc. Meet. I.S.S.S. Working Group on Soil Information Systems : 31-35.
- JURDANT (M.), BELAIR (J. L.), GERARDIN (V.), 1975. — Inventaire écologique du territoire au Québec. Informatique et Biosphère, Étude et cartographie intégrées du milieu naturel pour la planification et l'aménagement du territoire : 41-79.
- KAISER (B.), 1979. — L'analyse de système en géographie : progrès ou diversion ? *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, 465 : 357-367.
- KLINE (J. R.), 1973. — Mathematical simulation of soil-plant relationship. *Soil Science*, 115, 4 : 240-249.
- LEGAY (J. M.), LEBRETON (J. D.), 1973. — La méthode des modèles. Informatique et Biosphère, 147 p.
- LEGROS (J. P.), HENSEL (E.), 1977. — Les concepts de base du système I.N.R.A.-6 de cartographie assistée par ordinateur. Actes du 5^e Colloque Informatique et Biosphère : 144-166.
- LE MOIGNE (J. L.), 1977. — La théorie du système général. Théorie de la modélisation. P.U.F., 258 p.
- MALLET (J. P.), 1977. — Cartographie automatique numérique. Actes du 5^e Colloque Informatique et Biosphère : 14-55.
- MARTIN (D.), 1976. — Analyse multivariable de données analytiques de sols ferrallitiques du Centre Cameroun. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 14, 1 : 3-11.
- MARTIN (D.), AUBRY (A. M.), 1975. — Comparaison de profils du Congo par des distances. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 13, 2 : 175-190.
- MCCORMACK (D. E.), MOORE (A. W.), DUMANSKI (J.), 1978. — A review of soil information systems in Canada, the United States, and Australia. 11th Congr. Intern. Soc. Soil Sci., Edmonton, Canada.
- MORIN (E.), 1977. — La Méthode. La Nature de la Nature. Seuil, 313 p.
- MULLER (J. P.), 1977. — Le problème des frontières du système-sol. Application à la méthodologie de l'étude du phénomène d'appauvrissement en argile des sols ferrallitiques. O.N.A.R.E.S.T.-I.R.A.F., Yaoundé, Cameroun, 13 p.
- MULLER (J. P.), 1978. — Note critique sur les outils et les méthodes de l'approche systémique en pédologie, sur la base d'une analyse bibliographique. O.N.A.R.E.S.T.-I.R.A.F., Yaoundé, Cameroun, 23 p.
- MULLER (J. P.), 1978. — La séquence verticale d'organisation des horizons meubles ferrallitiques au Cameroun. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 16, 1 : 73-82.
- PAPADAKIS (J.), 1978. — Some considerations on culture and science. The scientific decadence of our days. Buenos-Aires, 9 p.
- POPPER (J.), 1973. — La dynamique des systèmes. Principes et applications. Les Presses de l'Université du Québec, Canada, 272 p.
- RICHARD (J. F.), 1975. — Paysage, écosystème et environnement : une approche géographique. *L'Information Géographique*, 4, 2 : 81-92.
- RICHARD (J. F.), FILLERON (J. C.), 1979. — Cartographie intégrée du milieu naturel. Réalisation et utilisation de la carte des paysages à 1/50 000^e. Informatique et Biosphère, Actes du Colloque d'Abidjan : 197-231.
- RICHARD (J. F.), KAHN (F.), CHATELIN (Y.), 1977. — Vocabulaire pour l'étude du milieu naturel (tropiques humides). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 15, 1 : 43-62.
- RUNGE (E. C. A.), 1973. — Soil development sequences and energy models. *Soil Science*, 115, 3 : 183-193.
- SCHELLING (J.), 1970. — Soil genesis, soil classification and soil survey. *Geoderma*, 4, 3 : 165-193.
- SCHELLING (J.), 1975. — The role of soil information systems. Proc. Meet. I.S.S.S. Working Group on Soil Information Systems : 13-16.
- SCHELLING (J.), BIE (S. W.), 1978. — Soil information systems. Considerations for the future. 11th Congr. Intern. Soc. Soil Sci., Edmonton, Canada.
- Système socio-économique et aménagement intégré. Principes méthodologiques et opérationnels, 1975. — Informatique et Biosphère, Étude et Cartographie intégrées du milieu naturel pour la planification et l'aménagement du territoire : 13-30.
- TRICART (J.), 1977. — Le terrain dans la dialectique de la géographie. *Hérodote*, 8 : 105-124.
- VAN DEN DRIESSCHE (R.), GARCIA GOMEZ (A.), 1973. — Comparaison multivariable non paramétrique des profils sans nomenclature des horizons. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 11, 3-4 : 257-264.
- VAN DEN DRIESSCHE (R.), GARCIA GOMEZ (A.), GIEY (A.), AUBRY (A. M.), 1975. — Poséidon. Procédures opérationnelles en statistique et informatique pour données en langage naturel. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 13, 3-4 : 223-226.
- VAN DEN DRIESSCHE (R.), MAIGNIEN (R.), 1965. — Application d'une méthode de la statistique approfondie à la pédologie. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, 3, 1 : 79-88.
- WEBSTER (R.), 1978. — Mathematical treatment of soil information. 11th Congr. Intern. Soc. Soil Sci., Edmonton, Canada, vol. 3 : 161-190.
- WIENER (N.), 1961. — Cybernetics or control and communication in the man and the machine. M.I.T. Press.
- WIT (C. T. de), VAN KEULEN (H.), 1972. — Simulation of transport processes in soils. Center for Agric. Publ. Doc., Wageningen, Pays-Bas, 100 p.
- YAALON (D. H.), 1975. — Conceptual models in pedogenesis : can soil-forming functions be solved ? *Geoderma*, 14, 3 : 189-205.