

Res-Systemica

Revue Française de Systémique

Fondée par Evelyne Andreewsky (+ 2007)

ISSN 1762-5890



Except where otherwise noted, content on this site
is licensed under a **Creative Commons**
Attribution-ShareAlike 3.0 Unported License.

volume 13, mai 2015

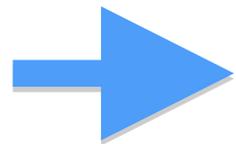
L'acceptation des nouveaux paradigmes

1. Modélisation en sciences de la terre.

Modélisation systémique du couple "eau-sol"

: la pédologie hydrostructurale.

94 p.



Erik BRAUDEAU

L'AUTEUR



Erik F. Braudeau

Ph.D. Faculté d'Orsay, Orsay, France, Europe, 1975

Honorary Scientist

Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
Bondy, France

erik.braudeau@ird.fr

Research Area

Soil Physics [Hydro-structural Pedology]

Erik Braudeau, PhD in organic chemistry has more than 30 years' experience in soil mapping and soil physical characterization and modeling at the ORSTOM/IRD (French Research Institute for the Development). Since 1979, he held several research positions in Africa (Congo, Senegal and Tunisia) and in Martinique (2003-2006). He was the head of the Laboratory of Hydrostructural Pedology in the IRD research center of île de France (2008-2011), at UMR BIOEMCO, developing methodologies for characterization, mapping, and modeling the soil hydrostructural properties. Retired from IRD in 2011, he worked at Qatar Foundation as principal investigator in QEERI (Qatar Environment and Energy Research Institute) until end 2013.

A fundamental problem that agro-environmental sciences have to face today is the lack of interdisciplinary linkages among the disciplines dealing with agriculture, environment and physics of the "soil medium" organization. Currently, the soil medium is far from being considered as an organized physical medium providing the physical conditions for life including biotic and abiotic processes. Braudeau's research goal is to describe an integrative approach for understanding and modeling the natural environment, of which **the soil-plant-atmosphere system** is the physical unit of description. We call for distinguishing two kinds of environmental modeling cycles: a **local modeling cycle**, which is physical and multi-scale according to the soil medium organization, and a **global modeling cycle** out of scale of processes, which is necessarily mono-scale and statistically based. We have shown that the local and physical modeling of the water cycle in the natural environment cannot be developed only from a systemic and thermodynamic approach of the multi-scale organization of the soil medium. Our research goal is to develop a unique theoretical framework for modeling the hydro-functioning of the soil-plant-atmosphere system using physically-based equations developed according this new approach that can be called hydrostructural pedology.

<http://wefnexus.tamu.edu/511-2/>

<http://loop.frontiersin.org/people/92340/overview>

http://www.researchgate.net/profile/Erik_Braudeau

MITHAL: Modeling integrative thinking
about land-use

Mai 2015

Modélisation systémique du couple "eau-sol"
: la pédologie hydrostructurale.
94 p.

Erik BRAUDEAU
ancien chercheur à l'IRD

Res-Systemica
Revue Française de Systémique

ISSN 1762-5890

Contenu

| | |
|--|----|
| Abstract : | 5 |
| 1. Introduction..... | 6 |
| 2. Problèmes intrinsèques à la science du sol | 9 |
| 2.1 Histoire de la Pédologie | 9 |
| 2.2 Modélisation des transferts d'eau dans le sol : le règne des fonctions pédotransferts | 11 |
| 2.3 Absence d'une théorie unitaire de la description des sols | 12 |
| 3. L'approche systémique appliquée à la pédologie | 16 |
| 3.1 Le projet de Bertalanffy et le modèle de Système Général de Le Moigne | 16 |
| 3.1.1 La théorie du Système Général et les préceptes cartésiens | 16 |
| 3.1.2 Représentation systémique ; les deux grandes idées de Le Moigne | 21 |
| 3.2 La description systémique de l'organisation du sol | 25 |
| 3.2.1 Définition physique de « système » | 25 |
| 3.2.2 Graduation des axes de l'espace de description systémique du sol | 27 |
| 3.2.3 Modélisation systémique du Système Opérant (SO) sur l'axe III | 31 |
| 3.2.4 Le concept de « Structural Representative Elementary Volume » (SREV) | 34 |
| 3.3 La physique systémique du milieu organisé du sol définie sur l'axe III | 37 |
| 3.3.1 Le système thermodynamique de la pédostructure | 37 |
| 3.3.2 Mise en équation de l'équilibre hydro-structural de la pédostructure | 40 |
| 3.3.3 Détermination des paramètres hydrostructuraux du sol | 42 |
| 3.3.4 Les équations du fonctionnement hydrodynamique de la pédostructure | 45 |
| 3.3.4 Le modèle Kamel® de fonctionnement hydrostructural d'un pédon | 48 |
| 3.4 Cartographie systémique des sols dans le paysage | 53 |
| 3.4.1 Unités cartographiques hydro-fonctionnelles hiérarchisées du paysage | 53 |
| 3.4.2 Le SIRS-Sols | 56 |
| 4. Le Système Général (SG), modèle générique des disciplines scientifiques | 57 |
| 4.1 Le Système Humain, d'étude ou de gestion d'un espace naturel | 57 |
| 4.2 Les Systèmes Naturels, Systèmes Opérants du Système Général | 59 |
| 4.3 Les Systèmes d'information des Systèmes Humains | 60 |
| 4.4 La pédologie hydrostructurale et son propre système d'information à référence spatiale | 62 |
| 5. Émergence d'une nouvelle discipline scientifique, la pédologie hydrostructurale..... | 64 |
| 5.1 La place de la pédologie hydrostructurale dans les sciences de la nature | 64 |
| 5.2 Spécificité du laboratoire de pédologie hydrostructurale | 67 |
| 6. Implications dans les sciences agroenvironnementales..... | 70 |
| 6.1 Une théorie unifiée de l'approche systémique et thermodynamique du milieu naturel | 70 |
| La modélisation du milieu naturel et les préceptes cartésiens | 70 |
| Systémisation, base théorique de l'approche systémique | 74 |
| Systémologie théorique et appliquée | 76 |
| Théorie du Système général des disciplines agro-environnementales | 81 |
| Thermodynamique systémique | 83 |
| 6.2 Le nouveau challenge de la modélisation agroenvironnementale | 87 |
| 7. Conclusion | 89 |
| Références | 90 |

Table des illustrations

Figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. Les différentes échelles d'observation et les différents niveaux d'organisation hydro fonctionnelle du sol. _____ | 13 |
| Figure 2. Les milieux naturels en équilibre thermodynamique entre eux et avec les organismes vivants, constituants du continuum Sol-Plante Atmosphère. _____ | 14 |
| Figure 3. Principes de base de la modélisation systémique d'après Le Moigne (1994) _____ | 22 |
| Figure 4. Représentation schématique du modèle du Système Général à son stade ultime d'évolution/finalisation _____ | 23 |
| Figure 5. Graduation des axes de description de l'objet à modéliser, adapté du concept des trois pôles de description d'un objet naturel à modéliser selon Le Moigne (1994) _____ | 28 |
| Figure 6. Représentation schématique des niveaux d'organisation fonctionnels internes et externes du sol généralement décrits qualitativement par le pédologue (tiré de Braudeau & Mohtar, 2009). 29 | |
| Figure 7. Rupture conceptuelle entre la physique de l'eau du sol (axe III) et la pédologie, science de la description morphologique et pédogénétique des organisations du sol (plan des axes I et II) 31 | |
| Figure 8. Le concept de SREV (Structural Representative Elementary Volume) permet la jonction des 3 axes de description systémique du même système organisé du sol _____ | 33 |
| Figure 9. Représentation schématique du pédon et de son organisation interne. _____ | 36 |
| Figure 10. Courbe de retrait caractéristique d'un échantillon de sol (pédostructure). _____ | 39 |
| Figure 11. TypoSoil, appareil de mesure en continu des 2 courbes caractéristiques d'humidité du sol : la courbe de retrait VW et de rétention hW (Assi et al. 2014) _____ | 43 |
| Figure 12. Résultats de mesure par TypoSoil de deux répétitions d'un même sol limono-argileux (images du haut) et de deux sols ferrallitiques différents en taux d'argile (images du bas) ____ | 44 |
| Figure 13. Schéma de principe du dispositif HYPROP® utilisé pour la mesure de la conductivité hydraulique d'un échantillon cylindrique de sol (250 cm ² sur 5cm de hauteur). _____ | 46 |
| Figure 14. a) Courbes calculées de W_{mi} et W_{ma} à l'équilibre en fonction de la teneur en eau W ; et b) Log de la conductivité hydraulique de la pédostructure en fonction de W_{ma} . _____ | 47 |
| Figure 15. Schéma du pédon et de son organisation interne tel qu'il est modélisé par Kamel.. _____ | 51 |
| Figure 16. a) Extrait réduit d'une partie de la carte pédologique dressée au 1/20 000 et de sa légende ; et b) Extrait de la carte physiographique du périmètre irrigué de Cébala _____ | 54 |
| Figure 17. Le modèle du Système Général (adapté de Le Moigne, 1994) comme étant le modèle de la relation idéale de l'homme à son objet d'étude, d'investigation ou d'exploitation. _____ | 58 |
| Figure 18. Distinction des Systèmes Opérants du milieu naturel et humain, donnant lieu respectivement aux SIRS-Sols et SIGs. _____ | 61 |
| Figure 19. Représentation de la Pédologie Hydrostructurale, discipline scientifique isomorphe du Système Général et composée de ses trois sous-systèmes fondamentaux (SP, SI, et SO) _____ | 63 |

| | |
|--|----|
| Figure 20. Place de la Pédologie Hydrostructurale dans les sciences de la terre.. _____ | 65 |
| Figure 21. Le laboratoire de la pédologie hydrostructurale entre la reconnaissance des organisations de sol sur le terrain et le système d'information (SIRS-Sols) _____ | 68 |
| Figure 22. Les différentes étapes d'élaboration du Système d'Information (SIRS-Sols) de la pédologie hydrostructurale. _____ | 75 |
| Figure 23. Reproduction du schéma du fonctionnement de principe de la « systémologie théorique appliquée » selon Pouvreau (2013, p. 943). _____ | 77 |
| Figure 24. Le double cycle local et global de la modélisation du milieu naturel (écosystèmes) et du milieu sociétal (agrosystèmes) (d'après Braudeau et Mohtar, 2014b) _____ | 88 |

Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Les quatre préceptes du nouveau discours de la méthode tels qu'énoncés par Le Moigne dans « Le modèle du Système Général » (1994, p. 43) | 20 |
| Tableau 2. Variables descriptives des organisations internes hiérarchisées du pédon | 37 |
| Tableau 3. Variables descriptives procédant de la distinction des 3 phases ordonnées de la pédostructure | 38 |
| Tableau 4. Variables d'organisation de la pédostructure en deux systèmes poreux micro et macro. | 40 |
| Tableau 5. List of the hydro-functional subsystems of a pedon SREV, their internal components and the corresponding parameters. Parameters are explained in the text. | 49 |

Abstract :

L'approche systémique du milieu naturel est théorisée ici dans la ligne des travaux de Bertalanffy et de Le Moigne, définissant précisément la notion de système par rapport à celle d'organisation et en particulier de l'organisation du milieu naturel. Les concepts associés de « boîte noire » ou de « volume représentatif élémentaire » (REV) utilisée de façon généralisée en hydrophysique du milieu naturel, sont remis en question et nécessitent d'être remplacés par le concept de « volume structural élémentaire représentatif » (SREV). Nous avons reformulée l'approche systémique du milieu naturel selon ce nouveau concept pour l'adapter à la science du sol (définissant une méthodologie de cartographie, de caractérisation et de modélisation hydro-structurale multi-échelles des sols), de façon à relier sans discontinuité conceptuelle les différents niveaux de description emboîtés de l'organisation des sols, dans le « milieu sol » sous la surface et en surface dans le paysage. Nous montrons comment l'approche systémique reposant sur le concept de SREV donne les moyens conceptuels de transformer l'organisation du milieu sol en un *système thermodynamique organisé, clos sur les éléments solides de sa structure interne et ouvert pour les autres éléments mobiles dans cette structure*. Cela permet l'accès à une formalisation thermodynamique des équilibres hydrostructuraux au sein du sol (répartition de l'eau dans la structure du sol) qui varient en fonction de la teneur en eau et qui conditionnent les échanges de la matrice du sol (en termes de chaleur, espace, eau, air, matières dissoutes) avec les sous-systèmes biologiques vivant en son sein. Nous montrons aussi comment la représentation schématique du Système Général (SG) en ses trois sous-systèmes : Système Opérant, Système d'Information et Système de Pilotage, tel que nous l'avons modifié après Le Moigne (1994), est parfaitement adaptée à la représentation d'une discipline scientifique des sciences environnementales. En l'occurrence, son application à la science du sol fait émerger une nouvelle discipline : la pédologie hydrostructurale qui sera présentée ici. Le laboratoire de pédologie hydrostructurale, muni de son équipement spécifique récemment mis au point pour répondre aux exigences du nouveau paradigme (mesure et traitement des données), est décrit dans l'article. Il constitue en effet le centre névralgique de la discipline où s'effectue la caractérisation physique de la pédostructure des sols, nécessaire à leur modélisation interdisciplinaire (bio-physique, agronomique ...) en situation sur le terrain ou en expérimentation au laboratoire.

1. Introduction

Devant la nécessité de mettre en place des systèmes aménagés agricoles ou écologiques durables, visant à une production optimisée et respectueuse de l'environnement, le Système d'Information Géographique (SIG) est l'outil indispensable à la gestion et à la maintenance de ces systèmes. D'après Bordin (2002), un SIG est un système informatique de matériels, de logiciels et de processus, conçu pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation et l'affichage de données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes d'aménagement et de gestion.

Dans un sens plus général, le terme de SIG décrit un système d'information qui intègre, stocke, analyse, et affiche l'information géographique (Wikipedia).

Pour jouer pleinement son rôle, le SIG ne peut être simplement une base de données cartographique du milieu physique et aménagé ; il doit aussi être un support d'information tridimensionnelle à la simulation géo-référencée du fonctionnement hydrique au cours du temps du système agricole ou du système écologique dont le sol et l'eau constituent les composants et ressources essentiels. Cela pour permettre aux gestionnaires, exploitants et autres acteurs du milieu naturel, d'agir en fonction des prévisions fournies par les modèles biophysiques sur, par exemple, la production agricole, la consommation en eau, les impacts générés sur l'environnement, l'évolution du système, etc. (Donatelli et al., 2010).

Cependant, pour être ce support à la modélisation et la simulation, le SIG devrait en principe posséder *toutes les informations pertinentes* concernant le milieu physique environnemental, et en particulier le sol. Est-ce réalisable ? Et quelles sont ces informations pertinentes ? Le sol fait partie de l'organisation naturelle sol-plante-atmosphère et est le lieu de vie, d'alimentation et de croissance pour la plante et tous les organismes biologiques associés ou non qui y résident. La première couche d'information du SIG devrait donc être celle concernant les unités de sol rencontrées dans la zone considérée; analogue à ce qu'était une carte pédologique avant l'informatique. Or comme nous le verrons par la suite, il se pose toujours à l'heure actuelle le problème conceptuel de la *définition typologique des sols du point de vue de leur fonctionnement hydrique et structural* : ni la pédologie, ni l'hydropédologie, discipline scientifique récente créée justement pour tenter de résoudre ce problème (Lin et al. 2006, Lin, 2012), n'ont offert de solution.

Cette absence de définition quantitative des caractéristiques du fonctionnement hydro-structural d'un sol qui serait associée à la description morphologique de son organisation interne, bloque la *cartographie pédologique* sur les deux questions pratiques de toujours:

i) quelle méthodologie adopter pour la caractérisation physique (hydro structurale) de l'organisation interne du pédon, volume de sol représentatif de l'unité cartographique de sol, et corrélativement ;

ii) quels sont les critères de délimitation cartographique de ces unités ainsi définies par leur pédon dans le paysage ?

Deux questions clefs qui, non résolues, maintiennent la cartographie pédologique dans un rôle uniquement de description qualitative et empirique des sols d'une zone ou d'une région. La carte des sols est alors inutilisable comme support d'information à la modélisation physique (non empirique) du pédon.

Un début de solution a été apporté par les auteurs du projet SIRSIT-BVM (Braudeau et Mtimet, 2001, Braudeau *et al.* 2002), de création d'un Système d'Information à Référence Spatiale des Sols irrigués de Tunisie, dont le but affiché était de servir de support d'information à la simulation agronomique qui tiendrait compte de la connaissance des sols (Belhouchette et al. 2008). Une méthodologie nouvelle de cartographie et de caractérisation des sols reposant sur les concepts de *l'approche systémique et du modèle de Système Général* présentés par Le Moigne (1994) a été installée. De nouveaux concepts ont été posés à cette occasion comme celui de *pédostructure* (Braudeau, 2001) qui est le volume représentatif de la structure du milieu matriciel d'un horizon de sol, et celui de SIRS-Sols (Système d'information à Référence Spatiale des sols), identifié au système d'information (SI) du modèle du Système Général (SG) adapté de Le Moigne, (1994) et appliquée à la pédologie (Braudeau et al. 2002). Ils ont permis dans un premier temps d'aboutir à une méthodologie précise de caractérisation et de modélisation physique des sols (Braudeau et al. 2004, 2005; Braudeau et Mohtar, 2004, 2006) qui donnait les moyens d'une typologie du fonctionnement hydrostructural de leur organisation interne de base : la pédostructure.

Cette méthodologie a continué à être développée par la suite en initiant deux domaines de recherche fondamentale au cœur des sciences agro-environnementales:

1) *Modélisation systémique* des organisations naturelles du milieu agro-environnemental (Braudeau et Mohtar, 2009, Braudeau et al. 2009, Braudeau et Mohtar, 2014a);

2) *Physique des équilibres hydro-structuraux* et thermodynamiques du milieu organisé du sol représenté par sa pédostructure (Braudeau et al. 2014a,b ; Assi et al. 2014). Ces deux domaines constituent la base théorique d'un nouveau paradigme de la caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrique et structural des sols proposé par Braudeau et Mohtar (2014a). Comme nous allons le voir ici, l'application de ce nouveau paradigme fait émerger une nouvelle discipline : la « pédologie hydrostructurale », à côté de l'hydro-pédologie récemment mise en place et issue de la simple réunion des deux disciplines originelles des sciences agro-environnementales: la pédologie et l'hydrologie de surface (ref Lin, 1983, 2014).

Dans ce document de synthèse, nous définissons tout d'abord la problématique scientifique de la science du sol pour montrer qu'elle ne peut progresser sans une définition physique de la notion de *système organisé* multi-échelles, représentatif d'une organisation naturelle (le sol). Nous montrons ensuite comment l'approche systémique présentée et décrite par Le Moigne (1994) doit être reprise et modifiée pour son application à la pédologie, science descriptive de l'organisation des sols. Enfin nous montrons comment l'approche systémique, ainsi modifiée et adaptée à la question du sol, conduit à la notion de *système thermodynamique* représentatif d'une organisation naturelle, *clos sur les éléments solides de sa structure interne et ouvert pour les autres éléments mobiles dans cette structure*. Cette notion de base a permis la formulation thermodynamique exacte des équations d'état du « milieu sol » (pédostructure) (Braudeau et al. 2014a) : la courbe de rétention du sol (pression de rétention de l'eau du sol fonction de sa teneur en eau) et la courbe de retrait (volume spécifique apparent du sol fonction de sa teneur en eau). Ces deux courbes caractéristiques du sol, bien connues en science du sol, étaient cependant jusqu'alors représentées par des fonctions empiriques ou semi-empiriques (Braudeau et al. 1999, Leong and Rahardjo, 1997), ce qui interdisait d'office toute généralisation spatiale des résultats de modélisation utilisant ces fonctions. La formulation thermodynamique exacte de ces deux courbes permet au contraire cette généralisation grâce à la généricité des équations et de leurs paramètres caractéristiques. De plus, la définition du milieu sol comme un système thermodynamique fermé sur sa phase solide structurale ouvre entièrement la possibilité du couplage physique,

interdisciplinaire, entre les modèles biologiques du vivant et le milieu organisé du sol représenté par le pédon (Braudeau et Mohtar, 2014a,b).

2. Problèmes intrinsèques à la science du sol

2.1 Histoire de la Pédologie

Les origines de la discipline sont très bien formulées dans le Soil Survey Manual de l'USDA (Soil Survey Division Staff. 1993) dont nous citons l'extrait ci-dessous :

“Beginning in 1870, the Russian school of soil science under the leadership of V.V. Dokuchaiev and N.M. Sibertsev was developing a new concept of soil. The Russian workers conceived of soils as independent natural bodies, each with unique properties resulting from a unique combination of climate, living matter, parent material, relief, and time ([Gedroiz, 1927](#)). They hypothesized that properties of each soil reflected the combined effects of the particular set of genetic factors responsible for the soil's formation. Hans Jenny later emphasized the functionally relatedness of soil properties and soil formation... The Russian concepts were revolutionary. Properties of soils no longer were based wholly on inferences from the nature of the rocks or from climate or other environmental factors, considered singly or collectively; rather, by going directly to the soil itself, the integrated expression of all these factors could be seen in the morphology of the soils. This concept required that *all properties* of soils be considered collectively in terms of a completely integrated natural body. In short, it made possible a science of soil.”

Les travaux d'inventaire des sols du monde entier ont été réalisés avec cet esprit naturaliste jusque dans les années 70: les méthodologies de description morphologique du sol se mettaient en place, confrontées aux questions d'échelle d'observation et de typologie face à la structure hiérarchisée du sol et de sa dépendance à son environnement ; que ce soit sur le terrain (profil pédologique, unité cartographique) ou en laboratoire (micromorphologie en lame mince, étude des agrégats). La grande question était l'élaboration d'une classification pédologique qui devait permettre de classer les sols rencontrés dans une région et d'établir les cartes pédologiques correspondantes. Fidèles aux principes de base de la discipline, les premières classifications proposées étaient pédogénétiques (Duchaufour, 1977) car associées

à une typologie des sols fondée sur les indices morphologiques révélant les processus clefs de leur pédogénèse.

Cette typologie morpho-pédogénétique était essentiellement qualitative ; elle permettait de définir des unités cartographiques de sol dont les critères de caractérisation sont la morphologie (structure, organisation) et la morphogenèse (mise en place des matériaux, processus pédogénétiques liés au climat, à la position dans le relief). Elle a permis les grands inventaires cartographiques à petite échelle des années 1960 – 1980 dans le monde mais n'était plus du tout utilisable pour des prospections à grande échelle, à but d'aménagement ou de mise en valeur agricoles, où les unités de sols devaient être caractérisées selon leur activité physique, chimique et biologique, interne (dans le milieu sol) et externe (en surface vis-à-vis du monde extérieur) ; ce qui était à l'époque hors de portée conceptuelle comme nous le démontrerons ci-dessous en définissant ce qu'est la modélisation physique et systémique des organisations du milieu naturel. Cette insuffisance de la démarche pédogénétique pour les travaux à grande échelle a concouru à son abandon tandis que s'imposait dès 1965 le système de classification américain, appelé Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975). Beaucoup plus pragmatique, ce système était fondé sur des critères plus faciles à quantifier que la morphologie et le fonctionnement hydrostructural du sol dans ses équilibres et sa dynamique. Les définitions des classes n'étaient plus qualitatives mais quantitatives : leurs limites étaient définies strictement par des critères physiques ou chimiques facilement mesurables sur les horizons dits diagnostiques. Le gros défaut est que ces critères mesurables ne sont que des indicateurs ou des tests empiriques, sans fondement physique, et donc que les limites choisies, bien que « strictement définies » par des critères mesurables, ne peuvent être qu'imposées empiriquement. C'est suffisant pour répondre à un besoin de standardisation méthodologique mais absolument pas pour permettre une modélisation physique des processus caractéristiques du sol.

“For soil survey, the application of quantitatively defined classes to bodies of soil produces quantitatively defined mapping units. This permits the soil maps to be interpreted with more precision than was formerly achieved. Furthermore, this soil-classification system simplifies and accelerates the process of soil correlation.” (Soil Survey Staff, 1975).

Cependant, si la Soil taxonomy donne bien les moyens de distinguer quantitativement les classes de sol, et donc de mieux les cartographier et établir les corrélations statistiques

adéquates, son principe de classification ne résout en rien le problème du fonctionnement hydrostructural de l'unité de sol cartographiée. En effet les critères quantitatifs choisis pour la classification des sols sont seulement des *indicateurs* du fonctionnement physico-chimiques du sol et non pas les *paramètres* des équations physiques (équations d'état) du fonctionnement hydrostructural de ces sols qui ne sont apparus que beaucoup plus tard avec la notion de pédostructure (Braudeau et al. 1999, 2004, 2005).

Le problème reste le même aujourd'hui: que ce soient les anciennes cartes morpho-pédogénétiques à grande échelle des années 60-80 ou les cartes actuelles des séries de sols américaines, ces cartes délimitent au plus près des unités prétendues homogènes de sols qui sont représentées par un ou plusieurs pédons (ou polypédon) représentatifs. Et malgré leur richesse en informations pédologiques il n'est toujours pas envisageable avec les caractéristiques de sol qui sont fournies, d'accéder à la modélisation physique (non empirique) du comportement hydrostructural du pédon à ses différents niveaux fonctionnels internes, et encore moins à la modélisation de son activité biophysique vis-à-vis du milieu environnant externe.

2.2 Modélisation des transferts d'eau dans le sol : le règne des fonctions pédotransferts

En 1999, Bouma et al. ont présenté la nouvelle situation de la pédologie et des techniques cartographiques et de présentation de l'information (SIG, bases de données) face à la transformation du management agricole vers un nouveau paradigme qui commençait à prendre de l'importance à l'époque: «l'agriculture de précision». Celui-ci se fondait entièrement sur les promesses d'un développement considérable des nouvelles techniques d'informations et de communications; concernant notamment la modélisation du système sol plante et des systèmes de production agronomiques qui s'appuierait sur des bases de données adéquates (climat, système de culture, plantes, sols, géomorphologie etc.). Pour faire face à cette nouvelle demande axée sur la modélisation, la seule voie possible pour la pédologie, d'après Bouma et al. (1999), était le développement de ce qu'on appelait les « fonctions pédotransferts »: fonctions empiriques, obtenues par régression statistique sur un grand nombre d'échantillons de sol, qui fournissent les paramètres des fonctions hydrologiques utilisés par les modèles agronomiques en fonction de données basiques du sol, comme la

texture (argile, limon, sables), la capacité d'échange, la matière organique, etc., C'était, selon ces auteurs qui faisaient autorité dans le domaine, pour pallier au manque de connaissances sur les propriétés physiques et agronomiques des sols et surtout au manque de précision des données pour l'échelle voulue ; c'était en même temps un appel à la pluridisciplinarité pour la délimitation des unités cartographiques.

Effectivement aujourd'hui, les modèles sols-eau apparaissent de plus en plus nombreux et sont offerts sur le web. Des systèmes complets de fonctions pédotransferts ont également fait leur apparition (Rawls et Saxton, 2006 ; Pachepsky et Rawls, 2004), pour alimenter ces modèles. En revanche, cette voie statistique de caractérisation et modélisation par les fonctions pédotransferts ne permet pas d'avancer dans les problématiques scientifiques qui restent propres aux sols, à savoir : le passage d'échelle et le couplage interdisciplinaire des modèles biologiques (Balsler et al. 2006) ou agronomiques avec la science du sol, et notamment avec la physique de l'eau du sol (Ahuja et al. 2006, 2007). Ces derniers ont montré que ces problèmes sont autant de challenges à résoudre par la physique du sol en connexion avec les disciplines dont l'objet d'étude est dépendant du sol. Ils ont ajouté que cela demanderait à la fois une recherche expérimentale et le développement de nouveaux concepts et modèles théoriques. C'est ce que nous allons préciser ci-dessous.

2.3 Absence d'une théorie unitaire de la description des sols

Les deux problèmes de fond présentés ci-dessous, intrinsèques à la formalisation cartographique et fonctionnelle du milieu naturel sont pour nous les deux verrous conceptuels majeurs empêchant la création de tout lien véritablement interdisciplinaire entre les sciences agroenvironnementales et la science du sol.

a) Le premier problème est de savoir **comment définir et caractériser des niveaux d'organisation hydro-fonctionnelle du milieu naturel.**

La question du sol : sa définition, ses caractéristiques, comment et par quoi le représenter, se trouve posée, avec un œil différent, à chacun des niveaux d'organisation (ou échelles d'observation) du milieu agroenvironnemental figurés à la Figure 1. Ce qui fait autant de disciplines scientifiques, avec leurs objectifs, outils, concepts de modélisation propres, qu'il y a d'échelles d'observation pratiquées. A chaque niveau d'organisation reconnu, le sol apparaît extérieurement sous une forme propre à ce niveau et doit donc être décrit avec les qualificatifs de ce niveau ; mais la description externe doit être en continuité de structure et de fonctionnalité avec la description interne du niveau inférieur et ainsi de suite jusqu'aux échelles microscopiques à l'intérieur du « milieu sol ». C'est la problématique du changement d'échelle.

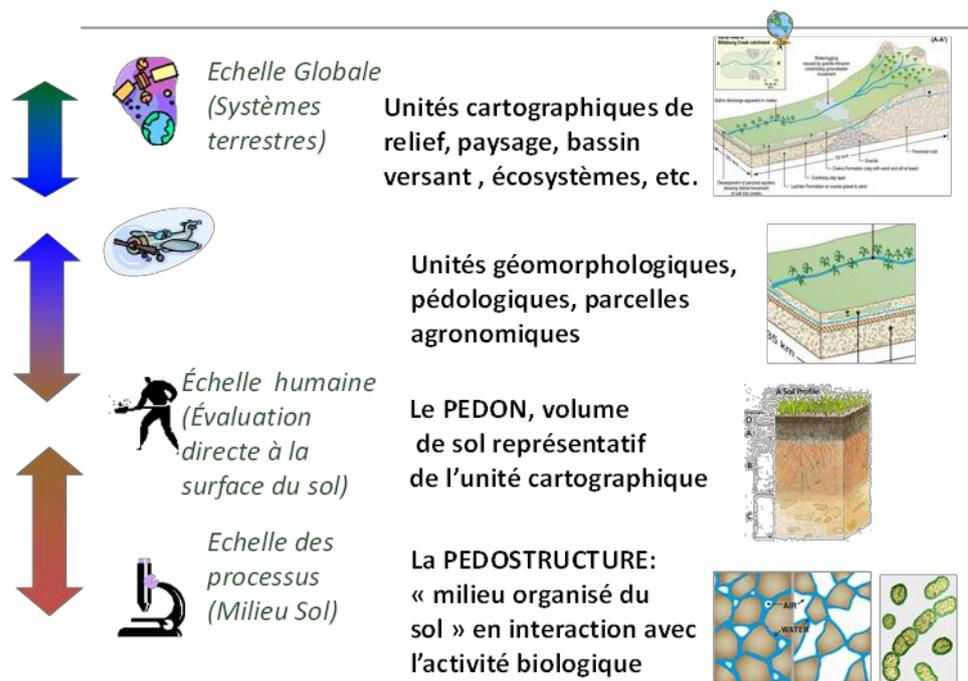


Figure 1. Les différentes échelles d'observation et les différents niveaux d'organisation hydro fonctionnelle du sol.

L'approche systémique est susceptible de résoudre ce problème en définissant les systèmes d'organisation emboîtés, hiérarchisés, non seulement à l'extérieur du sol, à partir de la surface (unité primaire de sol incluse dans l'unité géomorphologique, elle-même incluse dans l'unité de relief puis de bassin versant etc.), mais aussi à l'intérieur de l'unité de sol représentée par le pédon qui comprend aussi plusieurs niveaux d'organisation (horizons, agrégats, particules primaires). Trois questions d'ordre pratique se posent d'emblée auxquelles une réponse devra être donnée:

- Comment reconnaître les niveaux d'organisation fonctionnels emboîtés puis définir et délimiter les organisations propres à chacun des niveaux;

- Quelles sont les variables physiques descriptives des organisations propres à chaque niveau d'organisation fonctionnel

- Comment définir aussi les propriétés physiques caractéristiques d'une unité d'organisation à un niveau d'échelle fonctionnel donné (par exemple le pédon)? Ces propriétés exprimées à un niveau d'échelle donné devant résulter des propriétés des sous-organisations emboîtées définies aux niveaux fonctionnels inférieurs.

Nous montrerons plus loin, après avoir défini les principes de l'approche systémique appliquée aux organisations naturelles, quelle réponse celle-ci permet de donner à ces trois questions.

b) Le deuxième problème concerne **la formulation physique de la fonctionnalité hydrique du milieu organisé et structuré du sol** qui reste encore très empirique.

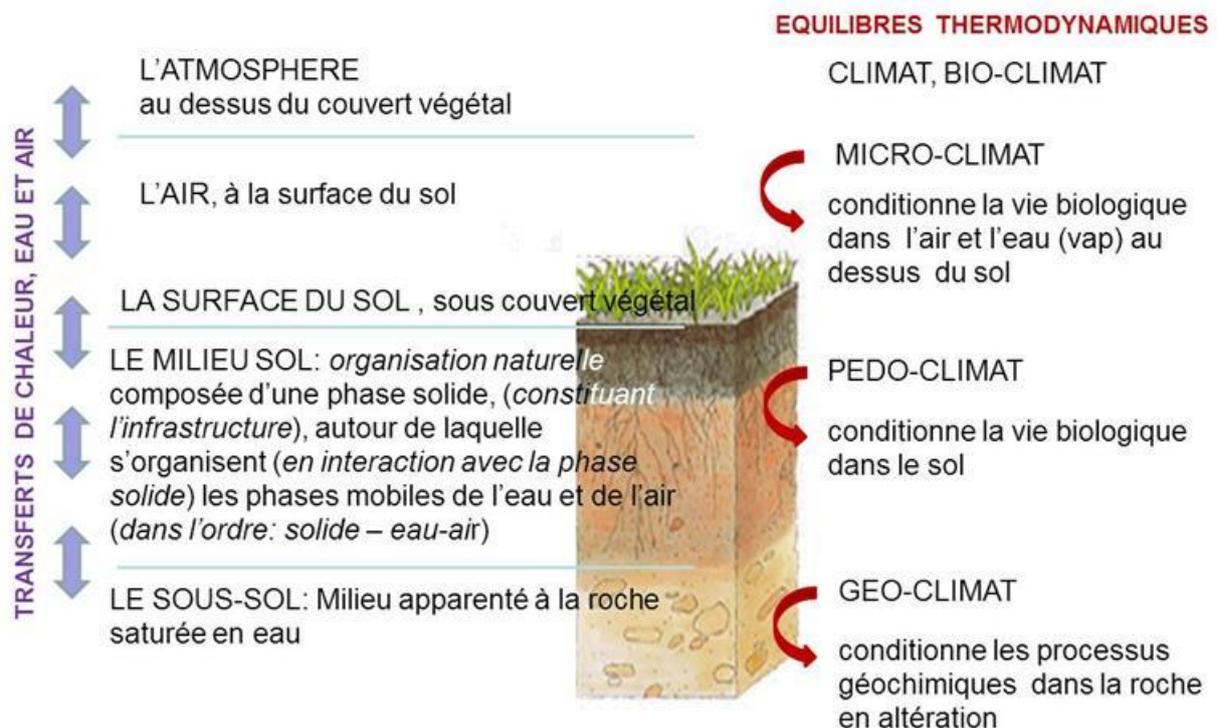


Figure 2. Les milieux naturels en équilibre thermodynamique entre eux et avec les organismes vivants, constituants du continuum Sol-Plante Atmosphère.

Sur la Figure 2 sont représentés les différents milieux physiques naturels qui ressortent à l'évidence dans ce qui est un continuum pour l'eau sous sa forme liée : le continuum « sol-plante-atmosphère ». Cette eau est dite liée par opposition à l'eau libre ou gravitaire qui circule dans les fissures et les nappes, vers le bas; l'eau liée est au contraire soumise à des forces de rétention dans les milieux qu'elle traverse ou est consommée (sol-plantes, organismes). Ces milieux ont leur propre organisation interne, non rigide, et sont en relation physique les uns avec les autres selon les lois d'équilibre de la thermodynamique qui sont encore mal formalisées, surtout celles concernant l'intérieur du sol. Ils accueillent et conditionnent la vie et le développement de toute sorte d'organismes biologiques qui échangent et partagent avec eux l'eau, l'espace et les différentes formes de matière et d'énergie.

Cependant la notion de milieu physique *organisé* du sol, dont la thermodynamique hydrostructurale conditionne la vie et le déroulement des processus, physiques, biologiques, géochimiques etc., est encore très peu développée en science du sol. C'est au contraire une thermodynamique de l'eau du sol vu comme une mixture tri-phasique (solide-eau-air) non organisée qui a été développée dans la deuxième moitié du siècle dernier (Balbock, Fissel, Low, Miller, Sposito, Parks) jusque dans les années 1980. Elle a été pratiquement abandonnée après les années 1990 faute d'avoir abouti à une théorie unifiée de la physique de l'eau du sol qui sache prendre en considération la structure hiérarchisée du sol et son interaction thermodynamique avec l'eau. Or c'est sur la base de cette interaction eau-structure que peuvent s'interpréter les différentes propriétés physiques du sol comme l'ont montré Braudeau (1988a, 1988b) puis Braudeau et al. (2004, 2005) qui les ont appelées de ce fait « propriétés hydrostructurales du sol ».

A cause de ce manque de théorie sur l'interaction eau-structure du sol, le « milieu-sol » proprement dit est le plus mal connu et le moins expérimenté en laboratoire des 3 composants du continuum « sol-plante-atmosphère » du cycle de l'eau de la Figure 2. L'intérieur du sol dans les modèles biophysiques actuels est modélisé comme une *boite noire*, c'est-à-dire un volume occupant l'espace et contenant une mixture des trois phases classiques : solide (minéraux, organismes), aqueuse et air, *sans organisation interne reconnue*. C'est ce dernier point, le fait de ne pouvoir reconnaître aucune organisation des trois phases entre elles, qui ne permettait pas de définir le milieu interne du sol comme un système thermodynamique ; ni

par conséquent d'établir les relations d'échange qui existent entre sous-systèmes connexes du sol incluant les organismes qui y vivent (Braudeau, 2009).

Les deux grands problèmes que nous venons d'évoquer constituent le verrou incontournable empêchant de pratiquer une modélisation physique (et donc unitaire et transdisciplinaire) des organisations et organismes naturels en sciences agro-environnementales aujourd'hui. D'après Braudeau et Mohtar (2009) ils ne pourront être levés si l'on maintient la modélisation dans le paradigme de la boîte noire qui est basé sur le concept de Volume Représentatif Élémentaire (REV) où les notions de systèmes organisés, d'échelles d'organisation emboîtées, de variables d'organisation, de podostructure etc. ne sont pas définissables.

Voyons comment l'approche systémique revisitée à partir des notions de « Système Général » de Bertalanffy (1968) et de « modélisation » de Le Moigne (1994) pour son application à la science du sol, nous permet d'apporter une solution à ces deux problèmes fondamentaux de la pédologie.

3. L'approche systémique appliquée à la pédologie

3.1 Le projet de Bertalanffy et le modèle de Système Général de Le Moigne

3.1.1 La théorie du Système Général et les préceptes cartésiens

Bertalanffy est la référence première à considérer ou citer dans tout ce qui traite de la systémique, l'approche systémique, la théorie générale des systèmes etc. J.L. Le Moigne faisait directement référence à Bertalanffy lorsqu'il donnait pour titre à son ouvrage phare de 1971, plusieurs fois réédité : « La théorie du Système Général, Théorie de la Modélisation », en Présentant le paradigme systémique, il dit en effet:

« Ce pas, que le biologiste J. Monod n'osait pas franchir, un autre biologiste, quarante ans plus tôt, l'avait fait ; les intuitions de L. von Bertalanffy affrontant seul, vers 1930, le faux débat de la biologie théorique d'alors, entre un mécanisme intolérant et un vitalisme souvent puéril, allaient fonder le paradigme systémique 1 : la bannière de ce rassemblement porte un nom forgé par Bertalanffy, la Théorie du Système Général, dont l'exposé constitue le projet même de cet ouvrage. »

puis plus loin (1994, p. 60), essayant de de donner une idée de ce qu'est « La théorie du Système Général » :

« La théorie du Système Général est la théorie de la modélisation des objets (naturels ou artificiels, compliqués ou complexes) à l'aide de cet objet artificiel peu à peu façonné par la pensée humaine, que L. von Bertalanffy proposera d'appeler le Système Général : le système est un modèle de nature générale (L. von Bertalanffy, in Klir, 1972, p. 31). C. W. Churchman définira en une ligne, dès 1964, la nature de cette théorie : la théorie du Système Général est la méthodologie de recherche du Système Général (in M. Mesarovic, 1964, p. 175). »

Nous reviendrons plus loin sur le l'ouvrage de Le Moigne puisque son travail de description phénoménologique de la théorie du Système Général, selon une méthodologie originale qui lui a permis d'en balayer exhaustivement les différents aspects, nous a permis d'élaborer notre théorie de la modélisation systémique de l'organisation du milieu naturel. Mais auparavant, nous voudrions compléter ces quelques informations sur L. von Bertalanffy par un extrait de la thèse de D. Pouvreau (2013), lequel résume au mieux les motivations profondes de Bertalanffy quand il donna le titre de « General System Theory » aux recherches qu'il proposait de mettre en place en 1935 à (ref).

« Fin 2002, je me retrouvai ainsi naturellement incité à lire, d'abord dans une version française aux traductions parfois très contestables, l'ouvrage de Bertalanffy au titre ambitieux et prometteur cité dans ces essais, dont je ne tardai pas à m'apercevoir qu'il constitue presque invariablement la référence exclusive à cet auteur : General system theory – Foundations, development, applications³. J'y trouvai la fameuse « théorie » présentée comme une réponse à quatre phénomènes : (1) une augmentation du volume de la connaissance scientifique impliquant un fractionnement des disciplines, une spécialisation des compétences et des difficultés accrues de communication – surtout entre « sciences de la nature » et « sciences humaines » ; (2) un sentiment répandu de l'urgence de cadres théoriques solides dans les sciences non physiques (biologie, psychologie, économie, sociologie, etc.) afin d'y dépasser le stade de la collection de matériaux empiriques et les controverses quant à leur interprétation ; (3) l'existence dans bon nombre de domaines scientifiques de prises de positions épistémologiques similaires consistant à promouvoir des approches « holistiques » des problèmes posés

par la « complexité organisée »⁵ tout en soulignant l'inadéquation, pour l'appréhension de ces problèmes, de modes de pensée « analytiques » (ou « atomistes ») souvent qualifiés de « mécanicistes », réputés caractéristiques des sciences physiques antérieures à la fin du XIX^e siècle ; (4) le retour récurrent de certains modèles conceptuels, voire de modélisations mathématiques spécifiques, dans des disciplines très diverses quant à la nature de leurs objets. La « théorie » avancée par Bertalanffy après-guerre, qu'il exposa en fait dès 1937 dans un séminaire à l'université de Chicago, prétendait être un cadre répondant à ces constats et adapté à ces besoins. Elle reposait sur le postulat de la possibilité de formuler et d'élaborer des principes, des modèles et des lois systémiques, généraux en ce sens qu'ils seraient applicables à diverses classes de « systèmes » à définir, indépendamment donc de la nature des composants de ces « systèmes ». Étaient assignées à la « general system theory » les tâches d'actualiser cette possibilité et d'extraire ainsi les modes holistiques de pensée de leur confinement traditionnel à la métaphysique afin de les rendre accessibles à la rigueur logico-mathématique. Un objectif majeur en était d'exploiter les « isomorphismes » (similitudes entre structures conceptuelles) existant entre disciplines et d'en exhiber de nouveaux, et d'écarter ainsi les « analogies superficielles » tout en révélant des « homologues profondes ». Elle avait vocation à servir de matrice pour la construction de modèles théoriques dans les sciences non physiques, et de mettre celles-ci sur la voie de l'« exactitude ».

Le titre proposé par L. Bertalanffy lui-même à son projet, et qui peut se comprendre aussi bien comme Théorie du Système Général que Théorie Générale des Systèmes, a été compris par D. Pouvreau (2013) plutôt « comme le projet d'une science de l'interprétation systémique du réel » auquel il a donné le nom de « systémologie générale », écartant ainsi le terme théorie, « jugé à la fois inadéquat et trop restrictif ». Nous souscrivons entièrement à cette appellation qui nous semble effectivement beaucoup mieux correspondre aux intentions qui le motivaient, c'est-à-dire au cadre unitariste (mais ouvert) qu'il s'imposait pour répondre aux questions fondamentales qui se posaient à la recherche scientifique de l'époque et qui restent les mêmes aujourd'hui.

J.L. Le Moigne se trouve cité parmi le nombre restreint des chercheurs considérés par D. Pouvreau comme ayant « formé à ses côtés le noyau dur de la systémologie générale » et « avoir œuvré le plus fidèlement à son élaboration dans ses diverses dimension : Rapoport,

Boulding, Rosen et Klir, auxquels il faut rajouter Mihajlo D. Mesarovic et Jean Louis Le Moigne. ».

Il est certain que dans son ouvrage «La théorie du Système Général, théorie de la modélisation» (1977-1994), Jean Louis Le Moigne a décrit «La théorie du Système Général» de Bertalanffy mais telle qu'elle apparaissait dans les années 1970 à l'époque de la première édition de son ouvrage : comme une théorie de la modélisation. Il considérait la science des systèmes comme la science de la modélisation systémique. On peut se demander alors si la théorie de la modélisation (système), restait bien dans le cadre du projet défini par Bertalanffy et de ses proches? En fait il a été assez facile de répondre à cette question car, avant de définir le paradigme systémique sur lequel devait reposer sa théorie de la modélisation, il a entrepris d'exposer tout d'abord le point de vue «libéral et sans contrainte philosophique ou religieuse» qui devait être le sien comme modélisateur. Il est allé jusqu'à formuler une nouvelle charte du modélisateur, constituée de 4 nouveaux préceptes (Tableau 1) destinés à remplacer un à un les 4 préceptes cartésiens du Discours de la Méthode. Cette nouvelle charte devait selon lui présider à la constitution du nouveau paradigme systémique (Le Moigne, 1994, p. 42):

« Ces quatre nouveaux préceptes que l'on a tenté de formuler sous une forme condensée, dans l'encart ci-dessous, nous disent l'essentiel de la teneur du nouveau discours de la méthode, auquel se réfère — ou peut se référer — l'intelligence contemporaine. Il nous reste à dégager le nouveau paradigme qui archétypera ce nouveau discours : nous reconnaitrons le paradigme systémique ; puis à déployer, sur ce paradigme, une théorie de la modélisation, la Théorie du Système Général, qui assistera l'exercice quotidien de notre intelligence modélisatrice (qu'on la qualifie de démarche systémique, d'analyse de système ou de systémo-graphie). »

Nous reproduisons ci-dessous (Tableau 1) les quatre préceptes du nouveau discours de la méthode énoncés par Le Moigne (1994, p. 43) car ils marquent, comme nous le verrons plus loin, le point de départ de la déviance par rapport à l'approche structuraliste pour laquelle il n'y a pas de principe téléologique expliquant le comportement d'un objet naturel, de même qu'il n'y a pas à « exclure une illusoire objectivité » puisque c'est cette objectivité qui est recherchée dans « le projet d'interprétation du réel » de Bertalanffy.

Tableau 1. Les quatre préceptes du nouveau discours de la méthode tels qu'énoncés par Le Moigne dans « Le modèle du Système Général » (1994, p. 43)

LES QUATRE PRECEPTES DU NOUVEAU DISCOURS DE LA METHODE

Le précepte de pertinence : Convenir que tout objet que nous considérerons se **définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur**. Ne jamais s'interdire de mettre en doute cette définition si, nos intentions se modifiant, la perception que nous avons de cet objet se modifie.

Le précepte du globalisme : Considérer toujours l'objet à connaître par notre intelligence comme une partie immergée et active au sein d'un plus grand tout. Le percevoir d'abord globalement, dans sa relation fonctionnelle avec son environnement **sans se soucier outre mesure d'établir une image fidèle de sa structure interne**, dont l'existence et l'unicité ne seront jamais tenues pour acquises.

Le précepte téléologique : Interpréter l'objet non pas en lui-même, mais par son comportement, **sans chercher à expliquer a priori ce comportement par quelque loi impliquée dans une éventuelle structure**. Comprendre en revanche ce comportement et les ressources qu'il mobilise par rapport aux projets **que, librement, le modélisateur attribue à l'objet**. Tenir l'identification de ces hypothétiques projets pour un acte rationnel de l'intelligence et **convenir que leur démonstration sera bien rarement possible**.

Le précepte de l'agrégativité : Convenir que **toute représentation est partisane**, non pas par oubli du modélisateur, mais délibérément. Chercher en conséquence quelques recettes susceptibles de guider la sélection d'agrégats tenus pour pertinents et **exclure l'illusoire objectivité d'un recensement exhaustif des éléments** à considérer.

Les quatre préceptes énoncés montrent clairement comment la nouvelle charte du modélisateur est à l'exact opposé de celle formulée par Descartes. Alors que celui-ci cherchait autant que possible à séparer l'analyse et la description de l'objet naturel de toute interprétation ou idée préconçue venant de l'observateur, Le Moigne au contraire rétablit cette imbrication entre l'observateur et l'objet observé en commençant par dire (1^{er} précepte) que tout objet (et donc aussi l'objet naturel) ne se définit que par rapport aux intentions du modélisateur. Les trois autres préceptes découlent de cette 1^{ère} prise de position : pour avoir la

liberté intellectuelle de modéliser on est invité à convenir que cette séparation voulue par Descartes est illusoire, que l'on n'a pas à se soucier de la structure interne, ni à rechercher un quelconque mécanisme explicatif d'une relation structure-comportement (précepte 3).

On voit sans peine que les 4 préceptes du nouveau discours de la méthode correspondent en tout point au paradigme de la boîte noire ou du REV (volume élémentaire représentatif) comme mentionné plus haut (cf. 2.2.2). Ils ont été posés par Le Moigne (1994) pour justifier une attitude de modélisation que l'on dira *globale* (ou externe) car ne s'occupant pas des mécanismes déterministes locaux (ou internes). Cette attitude est à l'opposé de celle promue par Braudeau et Mohtar (2009) qui repose sur le nouveau concept de Volume Structural Représentatif Élémentaire (SREV). Celui-ci, contrairement au REV et aux 4 préceptes de Le Moigne, non seulement reconnaît une organisation et une structure interne à l'objet mais recherche aussi les mécanismes physiques internes de cette organisation (interactions hydrostructurales) qui déterminent le comportement externe de l'objet vis-à-vis de son environnement. Le concept de SREV correspond donc à un retour aux préceptes cartésiens et s'inscrit complètement dans le projet de systémologie générale de Bertalanffy tel que D. Pouvreau (2013) l'a décrit dans sa thèse.

Ces deux paradigmes constituent les deux pôles de la relation entre la description locale et la description globale d'une zone ou d'une région. Cette relation local-global est un thème majeur en sciences de l'environnement qui n'a cependant jamais pu être formalisée correctement à cause du faible développement conceptuel de la science concernant le fonctionnement mécaniste avec l'eau de ce qui constitue le pôle local : le sol. C'est cette relation que nous proposerons de « travailler » après avoir présenté de manière approfondie ce nouveau paradigme (SREV) et ses implications pour le moment peu connues.

3.1.2 Représentation systémique ; les deux grandes idées de Le Moigne

Cependant, c'est de J. L. Le Moigne que nous sommes redevables pour les deux grandes idées qu'il a fait paraître dans sa description originale de la théorie du Système Général (1994). Nous les avons reprises et adaptées en les libérant de la vision anti-cartésienne de Le Moigne (et donc du principe de la boîte noire) pour les appliquer à la pédologie : science de l'organisation des sols. Ce sont :

1) Identifier la description d'un objet organisé dans le paradigme systémique à une triangulation de l'objet placé de façon cohérente et équilibrée entre trois pôles de définition : ontologique, fonctionnel et génétique (Figure 3). Chaque pôle représente la réponse à l'une des 3 questions d'identité suivantes de l'objet à décrire: ce qu'il est, ce qu'il fait et ce qu'il devient. Nous transformerons cette représentation en un espace de description 3D défini par 3 axes gradués représentant chacun la description de l'objet en réponse l'une de ces trois questions.

Le paradigme systémique auquel fait référence la méthodologie de description par triangulation de J.L Le Moigne est représenté par l'idéogramme donné à la Figure 3 : « Un

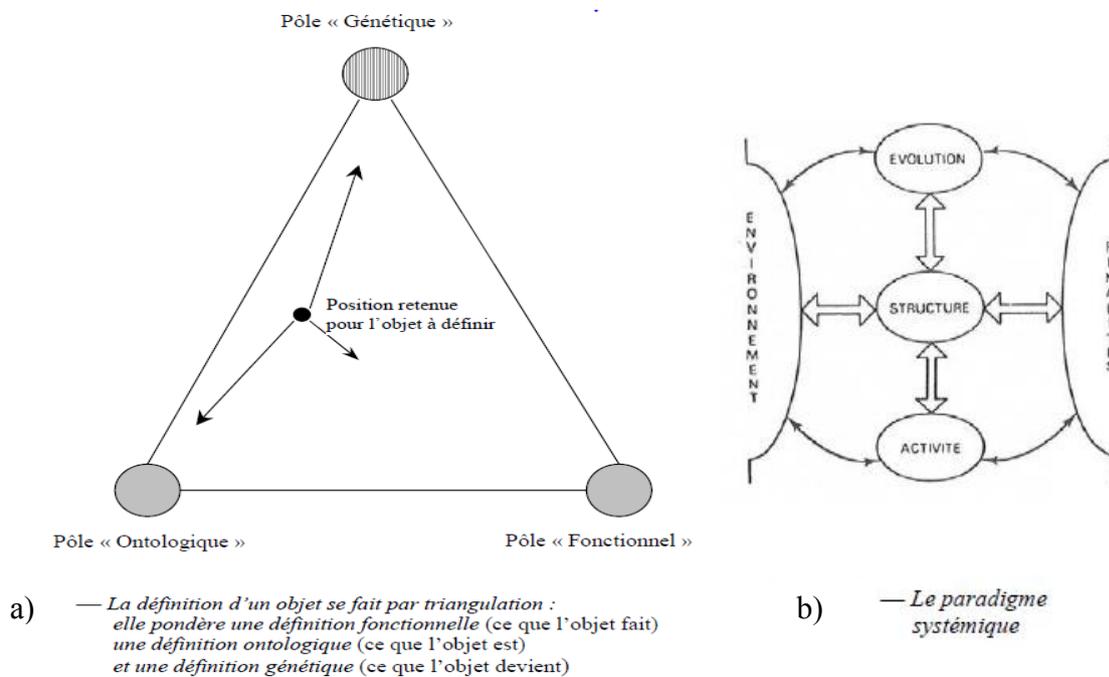
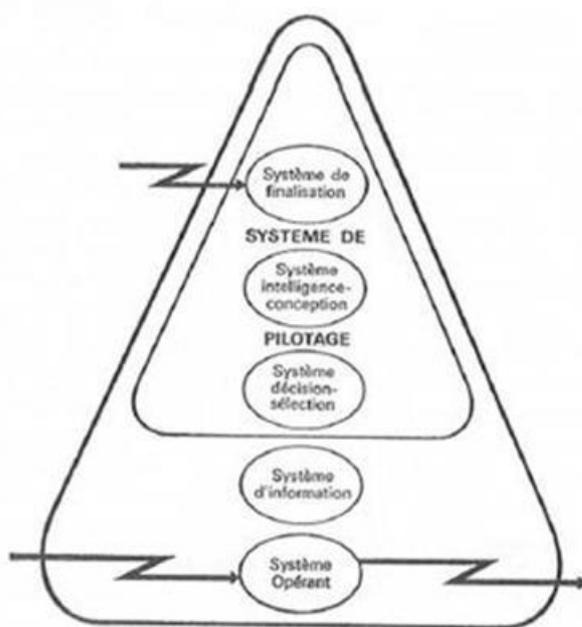


Figure 3. Principes de base de la modélisation systémique d'après Le Moigne (1994) : a) Référentiel de définition d'un objet par triangulation relativement aux trois pôles fonctionnel, ontologique et systémique ; et b) représentation du paradigme systémique.

objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique. » (Le Moigne, 1994, p.61).

2) Une représentation schématique du modèle du Système Général (Figure 4) qu'il présente ainsi (Le Moigne, 1994, p.149) : « Le modèle du développement quasi embryologique du Système Général que l'on a emprunté à K. Boulding (en l'adaptant,

convenons-en, à nos prémices épistémologiques d'une méthodologie instrumentale de la modélisation) s'avère, à l'expérience, d'une réelle commodité pédagogique 1 autant que d'une grande généralité théorique : on peut en effet y intégrer sans le distordre toutes les classifications de systèmes conceptuels qui ont été proposés jusqu'ici ; le système « de niveau six » (cf. fig. 6.6 et 6.8) constitue en particulier une forme symbolique très générale qui permettra cette articulation a priori donnant à tout constructeur de modèles un cadre de départ épistémologiquement argumenté : tout modèle systémique s'organise par la mise en correspondance d'un système opérant (SI) et d'un système de décision (SD), par l'intermédiaire d'un système d'information (SI) (ou de mémorisation).



— L'émergence de la conscience
 au sein du système de pilotage du Système Général :
 par le système de finalisation

Figure 4. Représentation schématique du modèle du Système Général à son stade ultime d'évolution/finalisation

Notons tout de suite que cette représentation du Système Général organisé en 3 sous-systèmes met en évidence le fait que ces trois composants, bien qu'étant chacun qualifié de Système, sont tous de nature très différente. Le SO par exemple, Système Opérant, objet naturel concret, ne peut pas être de même nature que le SI, système d'information abstrait, ou que le SP (ou SD), système de pilotage ou de décision qui pourrait être remplacé par l'homme ou une organisation humaine. Pourtant si nous appliquions la méthodologie de description systémique d'un

objet sur les trois axes du paradigme systémique associé (Figure 3a,b) à ces 3 entités de nature très différente, il en résulterait une description cohérente et complète, méritant son nom de « systémique » car définissant et décrivant ces entités comme systèmes correspondant les uns avec les autres. *Mais le référentiel de triangulation proposé par Le Moigne à la*

Figure 3 convient-il pour la définition et la description systémique d'un objet dit système?
C'est là en fait que réside tout le problème de l'approche systémique, voyons pourquoi.

Il est en général facile, sinon toujours faisable de décrire sur chacun des trois axes du référentiel systémique n'importe quel système *créé par l'homme*, que ce soit un SP ou un SI. Mais il n'en est pas de même d'un système provenant d'une organisation naturelle et en particulier le SO du SG qui est un système découpé dans une organisation naturelle *dont on ne connaît pas les délimitations fonctionnelles (des sous-systèmes) de l'organisation interne*. Les organisations, dont le SO est représentant, sont en général définissables sur les deux axes « ontologiques » et « génétique » mais pas de manière évidente sur l'axe fonctionnel. C'est le problème numéro 1 de la cartographie des sols en pédologie : comment définir le fonctionnement hydrostructural interne d'un sol qui le différencie de son voisin et comment en délimiter l'extension spatiale. C'était justement pour pallier à cette difficulté de description mécaniste du fonctionnement de la structure du sol avec l'eau sur l'axe fonctionnel que la notion de REV avait été instituée très tôt en hydro-physique des sols (Bear, 1972) ; elle reste utilisée jusqu'à nos jours dans les modèles de fonctionnement hydrique du sol. Or cette notion de REV est similaire à la notion de « boîte noire », laquelle est particulièrement prônée par Le Moigne alors qu'elle est contraire à la notion de système organisé, empêchant même tout développement de cette notion essentielle comme nous le montrerons plus loin.

C'est donc la description systémique du SO (Système Opérant du Système Général) qui pose véritablement problème aujourd'hui : l'objet à modéliser, incluant son organisation interne et sa fonctionnalité (interne et externe), doit être descriptible dans le référentiel de triangulation de la Figure 3a, de façon cohérente et en accord avec le paradigme systémique associé, afin de pouvoir être accepté comme SO du Système Général (SG, Figure 4).

Il est facile de voir alors que si le SO est un système descriptible sur les trois axes et en particulier l'axe fonctionnel, le SI, système d'information du SG, pourra être exactement construit à l'image objective du SO, c'est-à-dire être son modèle virtuel lui aussi descriptible sur les 3 axes (organisation spatiale, évolution et fonctionnement). Ainsi, *à condition de rajouter la condition d'une description systémique du SO sur les trois axes*, le modèle du Système Général tel que l'a décrit Le Moigne (1994) (Figure 4) est bien comme l'avait

pressenti Bertalanffy, un système générique d'élaboration de la connaissance du monde naturel auquel pourrait s'identifier ou se référer toute discipline scientifique.

Comment donc définir cette description systémique de l'organisation du sol sur les 3 axes du référentiel de la Figure 3a ?

3.2 La description systémique de l'organisation du sol

3.2.1 Définition physique de « système »

Il est essentiel de définir la notion de système par rapport à celle d'organisation naturelle. Un système est en principe entièrement élaboré et pris en main par l'homme. Celui-ci en a la connaissance exacte concernant la forme externe, la constitution matérielle des organes internes (les sous-systèmes), et le fonctionnement interne à toutes échelles d'organisation (organes et assemblage) ; lequel est la cause de l'activité globale du système dans son environnement externe. Cette connaissance du système dans son fonctionnement interne lui donne la maîtrise de son activité vis-à-vis de l'extérieur, ce que traduit le schéma du SG Figure 4. Ce n'est en revanche pas du tout le cas de l'organisation naturelle dont l'homme n'a, d'emblée, que la connaissance empirique de ce qui apparaît extérieurement de l'objet d'étude considéré à un certain niveau d'organisation donné (par exemple le sol en surface).

L'homme a alors le choix entre deux options scientifiques: i) soit s'arrêter à l'étape d'investigation empirique du milieu naturel (naturaliste) et mettre en pratique la connaissance acquise à cette étape (donc empirique) pour exploiter le milieu naturel ; ii) soit au contraire continuer son investigation de chercheur sur l'intérieur de l'objet naturel pour en comprendre la relation physique avec l'activité externe. La deuxième option correspond à l'élaboration d'une théorie qui expliquerait le lien physique entre l'intérieur et l'extérieur d'une organisation naturelle, et dont la validation serait l'accord avec la connaissance empirique de l'objet pratiquée dans la première option.

Dans les deux cas cependant, la première chose qu'il fera sera la délimitation artificielle de l'objet à exploiter ou à étudier, *qui transformera ainsi le « morceau » d'organisation naturelle considéré en un système fermé sur sa structure interne*. Physiquement parlant, cette délimitation ne s'adresse qu'à la structure du milieu, organisée et positionnée dans l'espace,

dans laquelle se meuvent l'eau, l'air et les organismes vivants ; elle renferme donc une quantité fixe déterminée de matière solide (la structure) mais reste totalement perméable aux flux des éléments mobiles par rapport à cette structure (en particulier l'eau et l'air). Cette opération de délimitation n'est pas neutre, elle discrimine la phase solide constituant la structure de l'objet, des phases liquide et gazeuse contenues dans l'objet.

La délimitation externe que l'on impose à un objet porté à l'étude, déterminant le volume occupé par cet objet (un prélèvement de sol par exemple), fait donc partie de la définition de système.

Or il est curieux de constater que la définition de système dans la littérature actuelle ne comporte pas cette absolue nécessité de délimitation externe du système qui permet de définir théoriquement la variable fondamentale de tout système: son **volume structural spécifique** $\bar{V}_{tot} = V_{tot}/M_s$ dont la masse structurale M_s enfermée dans ce volume est prise comme référence car nécessairement fixe et positionné dans l'espace.

Voici en effet comment est présentée la notion de système dans wikipedia (Systems thinking, http://en.wikipedia.org/wiki/Systems_thinking):

“Science systems thinkers consider that:

- a [system](#) is a dynamic and complex whole, interacting as a structured functional unit;
- [energy](#), [material](#) and [information](#) flow among the different elements that compose the system;
- a system is a community situated within an environment;
- energy, material and information flow from and to the surrounding environment via semi-permeable membranes or boundaries;
- systems are often composed of entities seeking equilibrium but can exhibit [oscillating](#), [chaotic](#), or [exponential](#) behavior.

A holistic system is any set (group) of interdependent or [temporally](#) interacting parts. *Parts* are generally systems themselves and are composed of other parts, just as systems are generally parts or [holons](#) of other systems.”

La notion de *délimitation du système* n'est pas mentionnée. Or il faut bien comprendre que la variable physique \bar{V}_{tot} issue de cette délimitation (ou découpage du milieu), qui on l'a vu est fondamentale pour la notion de système, *n'existe pas dans le jeu des variables descriptives du sol habituelles* des modèles sol-eau actuels, comme nous le verrons plus loin.

Nous proposons alors cette définition physique du *système naturel* : toute organisation naturelle que l'homme a délimitée dans son extension spatiale par une délimitation (découpage, frontière) **prenant appui extérieurement sur la structure** (ou infra-structure) de cette organisation qu'elle enrobe. Le système naturel ainsi délimité peut dès lors être considéré comme le système opérant (SO) du Système Général (SG) représentant la discipline scientifique correspondante ; c'est-à-dire celle en charge de l'étude du SO et dont le produit scientifique est le Système d'Information (SI) décrivant le SO selon le référentiel systémique des trois pôles (Figure 3). Cependant pour établir ce système d'information à l'image de l'organisation interne du SO il faut nécessairement étudier celui-ci dans son organisation interne (option 2 de l'investigation scientifique). Pour que l'organisation considérée soit non seulement un système (ce qu'il est par sa délimitation externe) mais aussi un *système organisé*, son organisation interne doit être partitionnée de façon exhaustive en sous-systèmes (abiotiques ou biotiques), eux aussi fermés uniquement sur leur composante solide (restant ouverts aux flux d'eau et d'air), de façon à ce que leurs volumes soient précisément déterminés et que la somme corresponde exactement au volume global du système opérant. En effet, le propre d'un système organisé naturel est donc d'avoir i) une délimitation externe précisément tracée qui détermine de façon exacte un intérieur et un extérieur ; et ii) un volume interne V_{tot} partitionné en sous-systèmes de volumes V_i dont la somme fait exactement le volume total : $V_{tot} = \sum V_i$.

Les organismes vivants qui sont délimités naturellement par une limite solide naturelle (membrane, peau, carapace...) sont des systèmes à part entière et partagent l'espace poral du sol avec d'autres sous-systèmes à l'intérieur du volume total du système défini du sol.

La question qui se pose maintenant est de savoir comment décrire l'organisation interne du SO (du SG correspondant, le sol étudié en pédologie par exemple) dans la triangulation proposée par Le Moigne à la Figure 3, relativement aux trois pôles de description : ontologique, génétique et fonctionnel?

3.2.2 Graduation des axes de l'espace de description systémique du sol

Pour décrire et définir et définir un objet naturel dans notre monde physique, nous avons repris l'idée de « triangulation de l'objet à décrire » de Le Moigne (Figure 3a). Cependant nous avons remplacé les 3 pôles (ontologique, génétique, fonctionnel) du référentiel de

triangulation par 3 axes gradués, chacun d'eux représentant l'un des trois aspects fondamentaux et inséparables que présente tout objet naturel : cet objet est (il a une forme et une substance), vit (il évolue, se transforme au cours du temps) et est actif (agit ou réagit en relation avec l'extérieur).

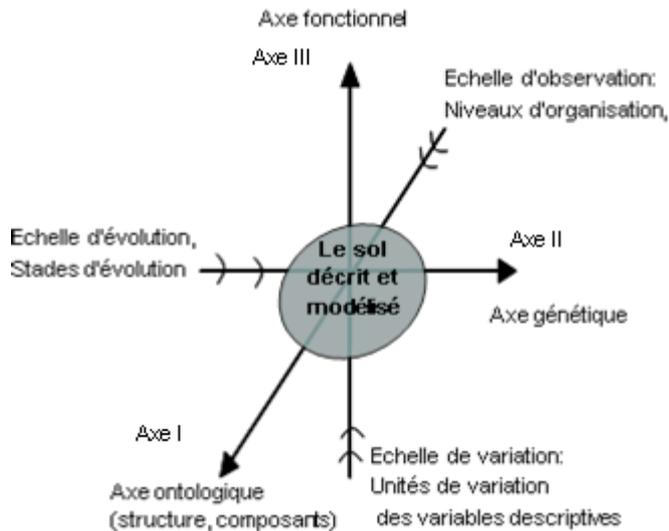


Figure 5. Graduation des axes de description de l'objet à modéliser, adapté du concept des trois pôles de description d'un objet naturel à modéliser selon Le Moigne (1994)

Ces axes, représentés à la Figure 5, pourraient être appelés ontologique, génétique et fonctionnel comme les pôles correspondants mais d'autres noms exprimant ces trois aspects peuvent aussi leur être attribués, plus en rapport avec l'objet qu'ils décrivent. Concernant les sols, il sera justifié de les appeler : axe organisationnel (Matière et Forme, ou structure et organisation), pédogénétique (pédogenèse, phases de transformation des horizons de sol), et hydro-fonctionnel (propriétés physiques du sol en réponse à son environnement)

Concernant la graduation des axes, si Le Moigne a bien considéré une succession d'étapes d'évolution sur l'axe génétique (les différents niveaux ou étapes d'évolution d'un système), il n'a pas considéré l'axe ontologique (structure - organisation) comme devant être lui aussi gradué en niveaux d'organisation hiérarchisés pour être adapté à la description d'un objet naturel comme le sol. Celui-ci a en effet été décrit morphologiquement par des naturalistes comme Brewer, (1963) par exemple, comme un objet *structuré en éléments organisés et hiérarchisés, possédant eux-mêmes plusieurs niveaux d'organisation.*

Cette graduation des axes est nécessaire pour la description systémique de l'organisation du SO du SG car elle fait ressortir la hiérarchisation des niveaux d'organisations sur le premier axe (ontologique) et la succession des stades d'évolution du sol sur le 2^{ème} axe (génétique) ; Quant au troisième axe, spécifiquement dédié à la description quantitative (modélisation) des propriétés physiques internes et externe du sol, c'est l'axe de la modélisation physique du

fonctionnement hydrostructural du sol aux différentes échelles reconnues sur l'axe I, et les graduations seront celles des variables descriptives définies sur les axes I et II et mises en équations sur l'axe III.

Ainsi la description d'une couverture pédologique sur les trois axes peut se concevoir comme suit :

- Sur l'axe I organisationnel c'est la spatialité hiérarchisée de l'organisation interne de la couverture pédologique qu'il faut faire apparaître dans les descriptions. La pédologie classique a mis au point depuis longtemps la méthodologie de description d'un profil de sol à ses différents niveaux d'organisation. On cherchera à reconnaître les différents niveaux d'organisation emboîtés, hydro-fonctionnels, qui se distinguent d'eux-mêmes à la surface du sol, c'est-à-dire dans le paysage ; ainsi que dans le sol représenté par le pédon (Figure 6).

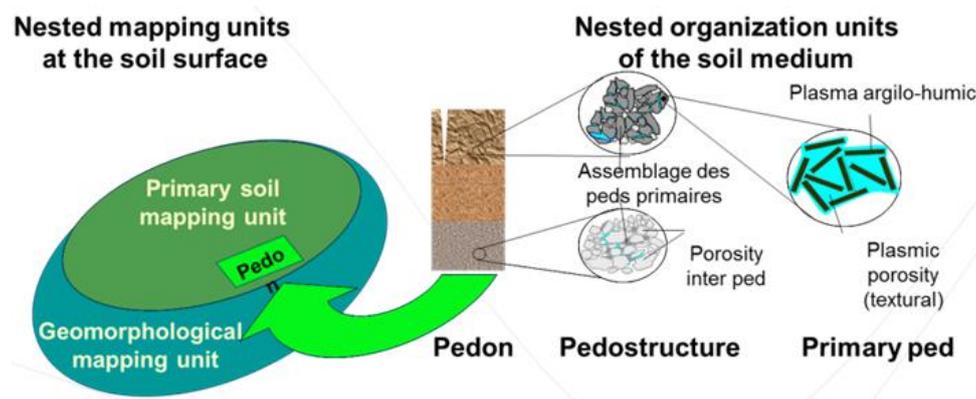


Figure 6. Représentation schématique des niveaux d'organisation fonctionnels internes et externes du sol généralement décrits qualitativement par le pédologue (tiré de Braudeau & Mohtar, 2009).

La systémographie de l'objet à décrire (terme utilisé par Le Moigne, 1994) consistera à **délimiter et/ou définir** les volumes des différentes organisations appartenant à un même niveau hydro-fonctionnel d'échelle d'organisation reconnu (cf. Figure 1): les unités cartographiques de sol par exemple qui sont ainsi présentées comme des systèmes opérants.

- Sur l'axe II génétique, les graduations font apparaître les stades d'évolution qui se succèdent. A un moment donné, et donc à un stade d'évolution donné, le système est décrit relativement aux deux autres axes (structure et fonctionnement). La description de l'évolution du SO sur l'axe génétique revient en fin de compte à un suivi des caractéristiques hydrostructurales et fonctionnelles de son organisation en fonction du temps dans les

différents stades d'évolution repérés sur l'axe II. En décrivant les organisations de sol sur cet axe, les pédologues naturalistes mirent en évidence des processus de pédogénèse, de dégradation, de transformations et des stades d'évolution, qu'ils ont utilisé comme critères de classification des sols (le référentiel pédo)

- L'axe III fonctionnel est celui de la modélisation (description en langage physique et mathématique) du fonctionnement dynamique et de l'activité interne et externe de l'objet organisé en réponse aux activités et événements de l'environnement. Les variables extensives utilisées dans les équations de fonctionnement et d'activité auront été préalablement définies sur l'axe I organisationnel où sont reconnues les organisations, les niveaux d'assemblage. Les graduations sur cet axe sont celles des variables descriptives dans leurs domaines de variation.

Remarquons que les variables descriptives caractérisant les sous-systèmes définis sur l'axe I (organisation-structure) sont nécessairement celles que l'on retrouvera dans les équations d'évolution définies sur l'axe II (pédogénèse-évolution) et les équations de processus définies sur l'axe III (hydro-fonctionnel). La définition systémique des variables descriptibles sur l'axe I et l'utilisation de ces variables sur les 2 autres axes est donc ce qui assurera la cohérence et la complétude de la description du SO, description qui sera intégralement reproduite par le Système d'Information du SG correspondant. Ces relations inter-axes correspondent respectivement aux chapitres 7 et 5 de l'ouvrage de Le Moigne (1994) mais évidemment sans que la notion de système organisé qui fait la cohérence de l'ensemble n'ait été physiquement définie.

Ainsi cet espace de description agit comme un opérateur mathématique qui transforme l'organisation naturelle, aux délimitations indéterminées (inconnaisables), en *système organisé* aux délimitations internes et externes physiquement définies et quantifiables ; ce qui permet de joindre la description qualitative des organisations et sous-organisations naturelles (axe I) à la description quantitative de leur caractéristiques (axe II) et de leur propriétés hydro-fonctionnelles. C'est le sens que l'on donnera à « *description systémique de l'organisation d'un système naturel* ».

3.2.3 Modélisation systémique du Système Opérant (SO) sur l'axe III

L'axe III est donc le lieu de la description quantitative (modélisation) de l'activité interne (hydrostructurale) du sol produite par l'interaction de la structure du sol avec les flux de matière (eau et air) et d'énergie la traversant et échangés avec l'extérieur. Cette activité interne du sol obéit à une physique naturelle spécifique du « milieu sol » qu'il s'agira d'explicitier sur l'axe III en utilisant le jeu de variables physiques adéquat issu de la systémographie du SO (en sous-systèmes organisés) sur l'axe I.

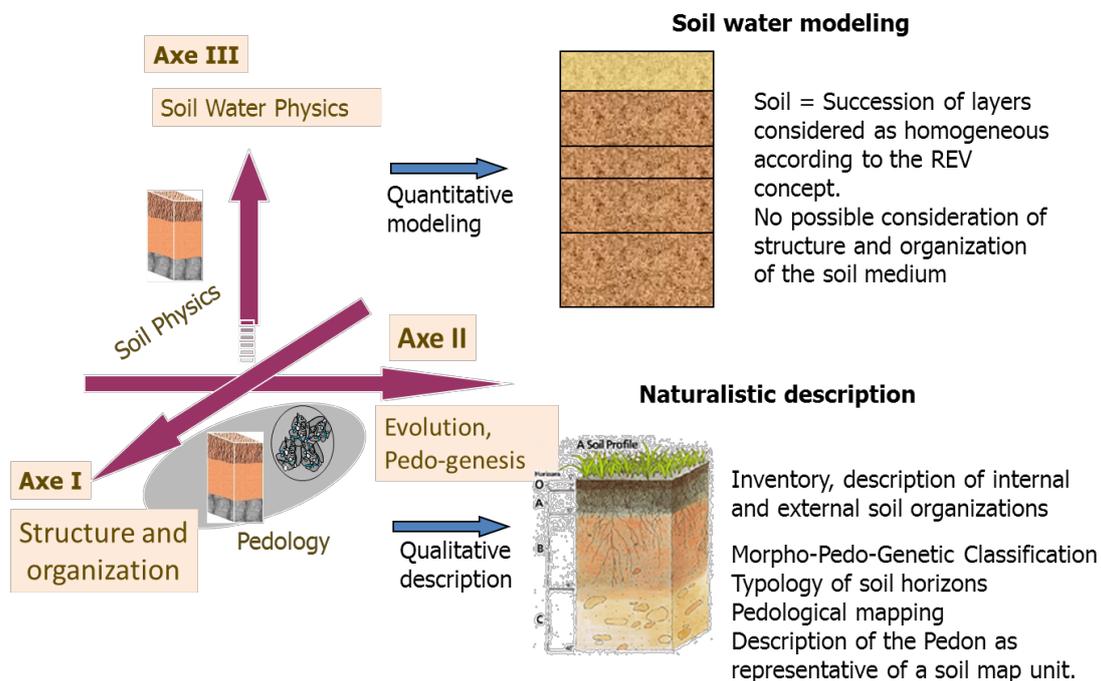


Figure 7. Rupture conceptuelle entre la physique de l'eau du sol (axe III) et la pédologie, science de la description morphologique et pédogénétique des organisations du sol (plan des axes I et II)

Cependant, comme l'ont remarqué Braudeau et Mohtar (2009) il existe aujourd'hui une déconnexion fondamentale entre la modélisation hydro fonctionnelle du sol sur l'axe III et la description pédogénétique de ses organisations fonctionnelles sur le plan des axes I et II : les deux disciplines correspondantes, respectivement l'hydro-physique du sol et la pédologie, coexistent indépendamment l'une de l'autre alors qu'elles ont le même objet d'étude, le sol. C'est cette déconnexion entre les deux disciplines que nous avons représentée à la Figure 7.

Effectivement, à part le modèle Kamel[®] que nous présenterons plus bas, tous les modèles de fonctionnement physique du sol avec l'eau s'appuient sur une hypothèse très réductrice d'homogénéité du milieu poreux du sol, le REV (Representative Elementary Volume, Bear 1972), pour pouvoir utiliser les équations de la théorie de la mécanique des milieux poreux continus. Ainsi les variables descriptives du milieu sol utilisées dans ces modèles sont définies d'après ce concept de REV. Or ce concept est analogue à celui de « boîte noire », vu plus haut comme option de la modélisation dans le paradigme cybernétique considéré par Le Moigne (1994, p. 54) : comme pour le REV, la **structure interne n'est pas discernée** (substitution du point de vue mécaniste structure-comportement par le point de vue externe ou global : comportement-finalité). L'utilisation du concept de REV rend donc impossible toute définition des variables descriptives de l'organisation interne du milieu poreux étudié et entraîne cette déconnection totale de l'axe III d'avec les deux autres, comme illustré à la Figure 7 (Braudeau et Mohtar, 2009).

En fait, le Volume Élémentaire Représentatif (REV) **n'est pas un système**, tel qu'il a été défini précédemment, puisqu'il n'a pas de délimitation qui soit définie précisément par rapport à la structure interne qu'il renferme. Il n'est donc pas descriptible dans le référentiel systémique des 3 axes. Les variables extensives du contenu du REV (teneur en eau par exemple) ne pouvant pas être rapportées à la structure sont rapportées à son volume, lequel n'est pas défini. Cela engendre un jeu de variables volumiques, comme la densité (ρ_{sol} , masse de la phase solide sur son volume apparent), la porosité (V_{vides}/V_{total}) et la teneur en eau volumique ($\theta = V_{eau}/V_{total}$) qui sont des variables macroscopiques, c'est-à-dire moyennées sur la totalité du volume considéré : ce ne sont donc pas des variables localisées descriptibles sur l'axe I ; elles ne peuvent donc pas être utilisées dans les équations de processus de l'axe III.

Au contraire, le SREV (Structural Representative Elementary Volume) proposé par Braudeau et Mohtar (2009) pour remplacer le REV, **est bien un système** : son volume correspond exactement à celui occupé par sa structure, et les variables descriptives de l'organisation interne du SREV sont des variables d'organisation (extensives) rapportées à la masse structurale M_s , masse de la structure du SREV. Ce sont des variables localisées par rapport aux éléments de la structure et qui rentrent donc dans les équations de processus. Le remplacement de la notion de REV par celle de SREV a permis aux auteurs d'établir un jeu de variables systémiques descriptives de l'organisation du pédon (axe I) tout à fait adaptée à

sa une description quantitative (modélisation) précise sur l'axe III. Il s'en est suivi l'écriture du modèle informatique Kamel[®] (Braudeau 2006) qui modélise le fonctionnement hydrostructurale du pédon à ses différents niveaux d'organisation, en parfaite correspondance avec les éléments de son organisation interne définis sur le plan des axes I et II comme le montre la Figure 8 où l'axe III rejoint maintenant les deux autres. La figure 8 montre aussi en exemple le changement produit par le remplacement du concept de REV par celui de SREV sur l'écriture de l'équation de transfert d'eau dans le sol : les variables utilisées sont définies d'après le concept de SREV : la teneur en eau gravimétrique W et le volume apparent spécifique \bar{V}_{ps} de la pédostructure (structure du milieu matriciel du sol défini par Braudeau et al. 2004) sont des variables systémiques rapportées à la masse de la pédostructure constituant le SREV ; elles remplacent dans l'équation les variables θ et ρ_{sol} qui, comme on l'a vu, sont non systémiques (variables du REV rapportées à son volume non défini).

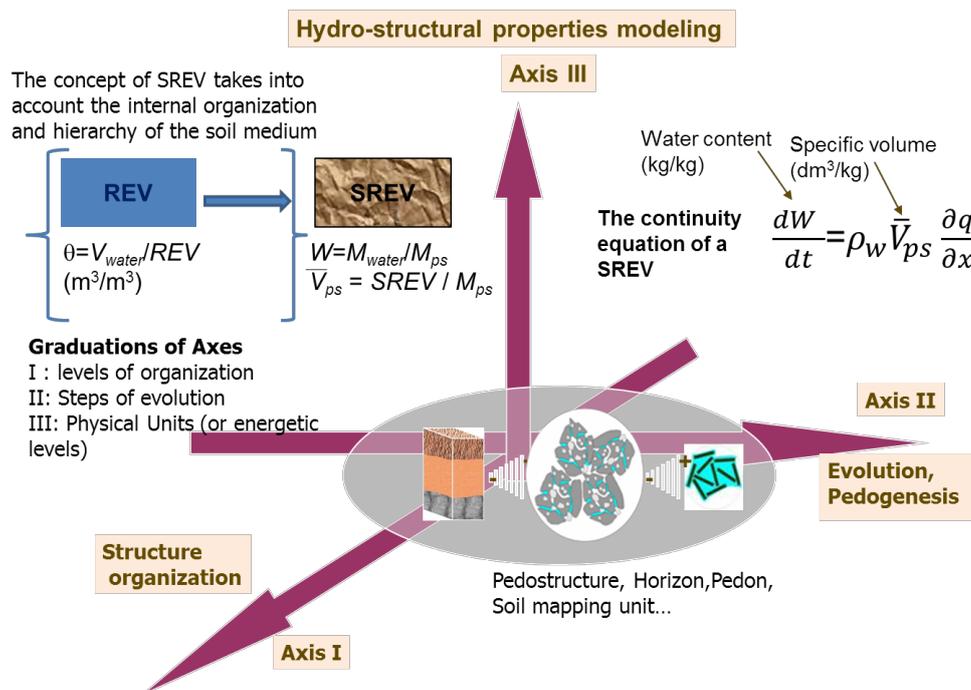


Figure 8. Le concept de SREV (Structural Representative Elementary Volume) permet la jonction des 3 axes de description systémique du même système organisé du sol, et en particulier la modélisation de son activité hydrophysique à ses différents niveaux d'organisation et ses différents degrés d'évolution.

De plus, ces deux variables W et \bar{V}_{ps} sont des variables d'état qui **rentrent explicitement** dans l'équation de transfert de l'eau représentée à la Figure 8 (équation où q est le flux en

m/s, t le temps en secondes, et x la profondeur en m). Pour comparaison, l'équation de transfert utilisée dans les modèles sol-eau actuels bâtis sur la notion de REV, s'écrit: $d\theta/dt = \partial q/\partial x$, où seule la variable d'état normalisée θ est utilisée ($\theta = W/\rho_w/V_{ps}$).

Il est évident donc que sans l'utilisation des variables systémiques (définies d'après le concept de SREV), descriptives de l'organisation interne du volume de sol étudié (comme SO d'un SG), il est impossible modéliser les propriétés hydro-structurales du sol comme le fait le modèle Kamel[®]. Celui-ci prend en compte les variations de volume (retrait-gonflement) des organisations internes (pédostructure, agrégats primaires) avec la teneur en eau, l'équilibre des potentiels de l'eau dans la micro et macroporosité de la pédostructure, etc., choses impossibles à considérer par les modèles construits dans un paradigme non systémique comme celui du REV.

3.2.4 Le concept de « Structural Representative Elementary Volume » (SREV) nécessaire à la description systémique du pédon

Définition et particularités du SREV du milieu matriciel d'un horizon de sol

Le SREV est un volume découpé du milieu sol qu'il représente, comme un prélèvement du sol dont la structure interne aura été conservée (pour l'étude). La structure est tranchée par le découpage et donc sa masse restera constante dans le volume découpé. Par contre, les phases liquide et air ne sont pas perturbées par ce découpage fictif et continueront à circuler librement à travers. C'est un système (puisque délimité) thermodynamique **clos sur la structure** et librement ouvert aux flux d'eau et de gaz. Un prélèvement non remanié pris dans un horizon de sol, peut être considéré comme un échantillon de la pédostructure de cet horizon, milieu tri phasique constitué comme un assemblage d'agrégats primaires et éventuellement de particules grossières (sables grossiers, nodules, graviers ...) en quantité variable.

Les particularités de ce volume structural représentatif (SREV) sont les suivantes :

1°) Sa délimitation est concrète : une fois tracée lors de la discrétisation du milieu, elle enveloppera toujours la même masse constante de solides qui composent la structure. Cette

enveloppe est donc, contrairement au REV, imperméable à la phase solide, alors qu'elle reste perméable aux phases liquides et gazeuses mobiles dans cette structure.

2°) Toutes les variables définies sur un SREV sont rapportées non plus au volume variable du SREV mais à la masse de la phase solide structurale circonscrite dans ce volume. Les variables sont donc, contrairement à celles d'un REV, physiquement définies par rapport à l'organisation interne et hiérarchisée du « milieu sol ». Un échantillon de pédostructure est un exemple de SREV du milieu matriciel d'un horizon de sol.

Cette possibilité de transformation de l'organisation du milieu-sol en système grâce à la notion de SREV, a une conséquence capitale en physique du sol, à savoir que les notions de structure et d'organisation hiérarchisée du « milieu sol » pourront dorénavant être prises en compte dans les équations physiques et thermodynamiques des modèles sol-eau, décrivant le fonctionnement hydrostructural du pédon dans le paradigme systémique des trois axes de description de la Figure 8; et ceci à ses différentes échelles d'organisation (Braudeau et Mohtar, 2014a).

Les organisations internes du pédon

Grâce à ces 2 notions de SREV et de référentiel de description systémique, les différents niveaux d'organisation hydro-fonctionnels à l'intérieur du sol et en surface vont pouvoir être reconnus et définis sur les axes I et III en connexion l'un avec l'autre.

Ainsi la cartographie pédologique pour la reconnaissance et caractérisation des unités de sols dans le paysage pourra se faire, comme présenté à la Figure 6, en connexion avec l'organisation interne et le fonctionnement hydrostructural du pédon représentatif.

Le pédon est ce volume de sol (Figures 2 et 6) généralement de 1 m² de surface et 1m20 de profondeur qui est considéré comme représentatif de l'unité de l'unité de sol à laquelle il appartient. Une observation visuelle sur le terrain (fosse pédologique) définit les horizons du pédon qui sont différenciés essentiellement par leur morphologie structurale (type de structure, couleur, porosité, etc.).

L'utilisation du concept de SREV pour la définition des variables systémiques décrivant en détail le pédon et son organisation interne, a permis la modélisation physique (non empirique) du fonctionnement hydrostructural du pédon à ses différents niveaux d'organisation emboîtés représentés à la Figure 9 (pédon, horizon, pédostructure, agrégats primaires). C'est cette modélisation hydrostructurale du sol qui a été concrétisée par le modèle informatique Kamel[®] (Braudeau 2006, Braudeau et al. 2009, Braudeau et Mohtar, 2014a).

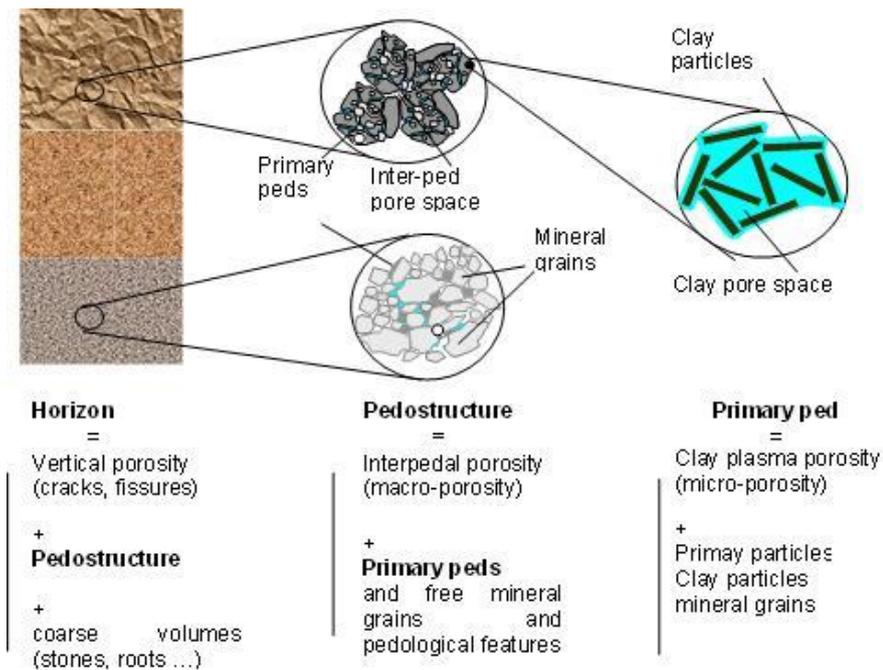


Figure 9. Représentation schématique du pédon et de son organisation interne.

Dans cette modélisation l'horizon de sol a été considéré au départ comme constitué uniquement de la pédostructure, c'est-à-dire le matériau matriciel du sol sans les autres composants biotiques et abiotiques plus grossiers (racines, macro-pores biologiques, cailloux ou autres éléments grossiers) qui sont éventuellement présents en plus moins grande quantité dans l'horizon de sol. Le jeu de variables systémiques qui a été mis en place pour décrire le pédon, ses horizons et les propriétés hydrostructurales de la pédostructure caractéristique de chaque horizon, est présenté au Tableau (2). Les premières versions du modèle informatique Kamel[®] ont été élaborées sur cette base de description systémique du pédon tel qu'il est défini à la Figure 9 et dont les variables descriptives sont données, pour chaque horizon, au Tableau 2 (Braudeau, 2006, Braudeau et al. 2009).

Tableau 2. Variables descriptives des organisations internes hiérarchisées du pédon

| Functional levels linked to the pedostructure | Specific volume (dm ³ /kg) | Specific pore volume (dm ³ /kg) | Specific water content (kg/kg) | Soil water retention (kPa) | Hydraulic Conductivity (dm/s) | Non saturating water (kg/kg) | Saturating water (kg/kg) |
|---|---------------------------------------|--|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Horizon SREL | | $\bar{V}p_{fiss}$ | W_{fiss} | h_{fiss} | k_{fiss} | | |
| Pedostructure SREV | \bar{V}_{ps} | | W_{ps} | h | k_{ps} | | |
| Interpedal pore space | | $\bar{V}p_{ma}$ | W_{ma} | h_{ma} | k_{ma} | w_{st} | w_p |
| Primary peds | | $\bar{V}p_{mi}$ | W_{mi} | h_{mi} | k_{mi} | w_{ce} | w_{bs} |
| Primary particles | \bar{V}_s | | | | | | |

Ce tableau présente la liste exhaustive des variables d'état de *la pédostructure* et de ses sous composants organisationnels, comme si elle remplissait complètement l'horizon. L'utilisation de ce jeu de variables (que l'on peut qualifier maintenant de systémiques) avait permis l'étude du fonctionnement hydrostructural de la pédostructure en laboratoire et d'établir les équations systémiques des différentes courbes d'humidité caractéristiques de la pédostructure : courbe de retrait, courbe de rétention de l'eau, vitesse de gonflement des agrégats dans l'eau (Braudeau et al. 2004, Braudeau et Mohtar, 2004, 2006).

Nous présentons ci-après la nouvelle physique de l'eau du sol qui ne pouvait se réaliser qu'après le remplacement du concept de REV par le SREV (Braudeau et Mohtar, 2009) conduisant à la définition physique du *système thermodynamique* de la pédostructure et de ses composants en eau et en air dans un horizon de sol.

3.3 La physique systémique du milieu organisé du sol définie sur l'axe III

3.3.1 Le système thermodynamique de la pédostructure

La pédostructure telle que représentée à la Figure 9 est définie comme l'organisation triphasique (solide, solution aqueuse, air) du milieu sol en agrégats primaires (Braudeau et al. 2004), conforme à la description naturaliste de la structure hiérarchisée du sol par Brewer (1963). Cependant cette organisation du milieu sol n'est pas reconnue dans la modélisation courante actuelle basée sur le principe du REV, que ce soit en thermodynamique ou en hydrophysique des sols, où le milieu triphasique du sol est traité (modélisé) comme une mixture homogène des trois phases : il n'y a pas de distinction des trois phases entre elles et

donc pas de reconnaissance possible d'une structuration quelconque de la phase solide ni d'une organisation quelconque des trois phases les unes par rapport aux autres.

Or, outre la structuration du sol en agrégats primaires, il faut tenir compte aussi de cette autre caractéristique de l'organisation tri-phasique du sol qui est l'agencement ordonné des trois phases entre elles : la phase solide est entourée de la phase liquide laquelle est entourée de la phase gazeuse. Les particules solides sont en contact avec d'autres particules solides ou avec l'eau mais jamais avec l'air dans un sol en vie. La conséquence de cet ordonnancement en physique de l'eau du sol et notamment en thermodynamique, est qu'il y a deux interfaces à mettre en évidence et considérer pour la définition des variables descriptives de l'organisation: **solide-liquide (s.w.) et liquide-air (w.a.) qui sont les limites intérieure et extérieure de la couche d'eau entourant la phase solide.** Ces deux limites définissent exactement le *système thermodynamique* de l'eau de la pédostructure et les variables d'état (systémiques) associées : \bar{V}_w et W (Tableau 3).

En plus de cet ordonnancement des phases entre elles, auxquelles correspondent les variables d'organisation listées au Tableau 3, on doit tenir compte aussi de la structuration de la phase solide en agrégats primaires dans **la pédostructure**. Les agrégats primaires (ou primary peds) sont constitués d'un plasma argileux fait des particules d'argile et limons fins, pouvant éventuellement contenir en inclusion des grains grossiers de quartz ou autres, et dont la particularité pour être qualifiés de *primaires* est qu'ils ne présentent pas de trace de fissuration interne, montrant qu'ils ne sont pas composés de plusieurs sous-agrégats (peds).

Tableau 3. Variables descriptives procédant de la distinction des 3 phases ordonnées de la pédostructure

| Phases | Masse | Volumes pédostructuraux | Teneur en eau et en air | Volumes spécifiques |
|---------|-----------|-------------------------------|-------------------------|---|
| Solide | M_s | $\bar{V}_s = V_s/M_s$ | | $\hat{V}_s = V_s/M_s$ |
| Liquide | M_w | $\bar{V}_w = V_w/M_s$ | $W = M_w/M_s$ | $\hat{V}_w = \bar{V}_w/W$ |
| Gaz | M_{air} | $\bar{V}_{air} = V_{air}/M_s$ | $\bar{A} = M_{air}/M_s$ | $\hat{V}_{air} = \bar{V}_{air}/\bar{A}$ |

Deux sous-systèmes hydro-fonctionnels de la pédostructure se distinguent d'eux-mêmes, conceptuellement sur l'axe I (descriptions micro-morphologiques du sol en lame mince) et expérimentalement sur l'axe III par la mesure et interprétation de la courbe de retrait (Figure 10) :

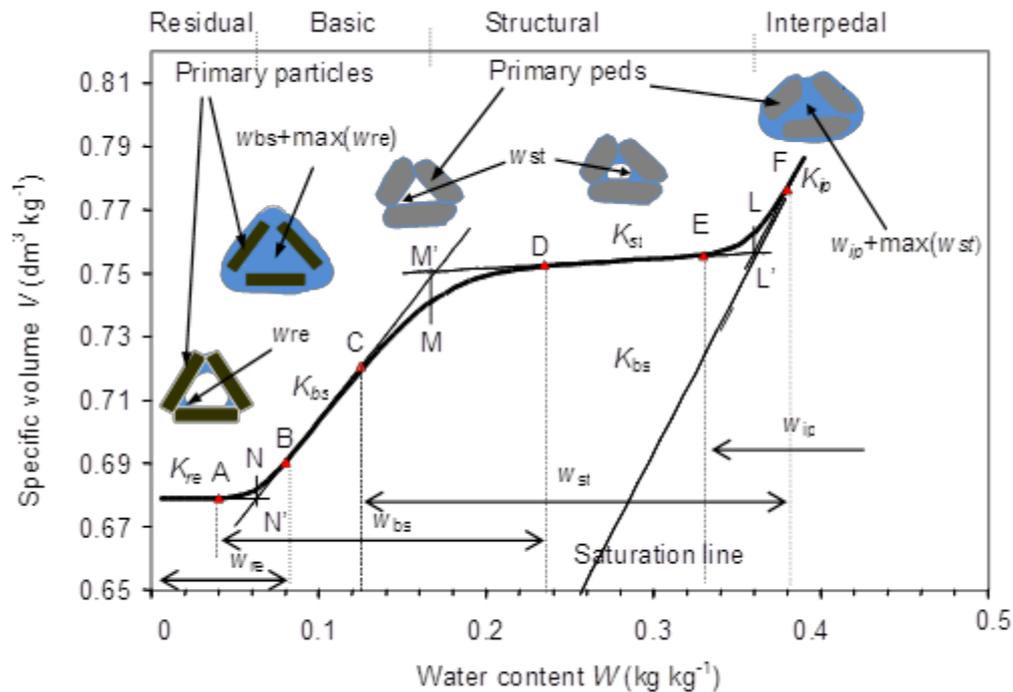


Figure 10 . Courbe de retrait caractéristique d'un échantillon de sol (pédostructure). Les différentes configurations de distribution de l'eau et de l'air dans les espaces inter et intra agrégats de la pédostructure, en relation avec les différentes phases de retrait de la courbe de retrait [water content vs. specific volume]. (Tiré de Braudeau et al. 2004)

- L'intérieur des peds primaires, constitué des particules d'argile et de l'espace poral (variable) dit *micro* ; celui-ci reste saturé en eau avec la dessiccation tant que la teneur en eau est supérieure à la teneur en eau du point d'entrée d'air W_B , repérable sur la courbe de retrait (Figure 10). Les variables descriptives sont, $\bar{V}p_{mi}$, W_{mi} , et \bar{A}_{mi} , respectivement volume poral micro, teneur en eau micro et teneur en air micro de la pédostructure ; elles sont définies dans le Tableau 4 des variables descriptives de la pédostructure.

- L'extérieur des peds primaires constitué de la surface des peds primaires et de l'espace poral inter-agrégats, dit *macro*. Les variables descriptives sont (Tableau 4): $\bar{V}p_{ma}$, W_{ma} et

\bar{A}_{ma} , respectivement volume poral micro, teneur en eau micro et teneur en air micro de la pédostructure.

Tableau 4. Variables d'organisation de la pédostructure en deux systèmes poraux micro et macro.

| Systèmes concernés | Volumes pédostructuraux | Teneurs en eau de la pédostructure | Teneurs en air de la pédostructure |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| SREV de la Pédostructure | $\bar{V}_{ps} = V_{ps}/M_s$ | $W = M_w/M_s$ | $\bar{A} = V_{air}/M_s$ |
| Volume poral inter-ped (ma) | $\bar{V}_{p_{ma}} = V_{p_{ma}}/M_s$ | $W_{ma} = M_{wma}/M_s$ | $\bar{A}_{ma} = V_{airma}/M_s$ |
| Volume poral intra-ped (mi) | $\bar{V}_{p_{mi}} = V_{p_{mi}}/M_s$ | $W_{mi} = M_{wmi}/M_s$ | $\bar{A}_{mi} = V_{airmi}/M_s$ |

3.3.2 Mise en équation de l'équilibre hydro-structural de la pédostructure

Reconnaître l'existence des peds primaires dans la pédostructure c'est reconnaître deux composants différents de la phase liquide : W_{mi} et W_{ma} placés en opposition de pression (suction vers l'intérieur et suction vers l'extérieur de l'agrégat). Ces deux composants doivent figurer dans l'équation du potentiel thermodynamique de Gibbs écrit sous sa forme d'équation d'Euler (Sposito, 1981, Braudeau et al. 2014) :

$$\bar{G}_\alpha = (\sum_\alpha \sum_i \mu_{i\alpha} m_{i\alpha}) / M_s \quad (1)$$

où α représente une phase (solide, liquide ou gaz) et $i\alpha$ les composants de cette phase. \bar{G}_α est l'énergie libre pédostructurale (rapportée à la masse M_s de la pédostructure) de la phase α (solide, liquide, air) de la pédostructure. Les \bar{G}_α comme $\mu_{i\alpha}$ sont par convention négatifs. Par conséquent, appliquée à la solution aqueuse de la pédostructure, l'Equation (1) s'écrit :

$$\bar{G}_w = (W_{mi}\mu_{mi} + W_{ma}\mu_{ma}) = \bar{G}_{wmi} + \bar{G}_{wma} \quad (2)$$

où par définition $\bar{G}_{wmi} = W_{mi}\mu_{mi}$ et $\bar{G}_{wma} = W_{ma}\mu_{ma}$ se rapportent aux deux types d'eau micro et macro. Notons dès à présent que l'on ne peut écrire $\bar{G}_w = \mu_w W$ mais que la relation $\mu_w = \bar{G}_w / W$ n'est pas valide car les potentiels ne peuvent pas être moyennés : $\mu_w = \mu_{wma}$ dans la phase aqueuse macro et $\mu_w = \mu_{wmi}$ dans la phase aqueuse micro.

D'autre part, si h_{mi} et h_{ma} sont les succions (ou rétention) de l'eau à l'intérieur et à l'extérieur des agrégats primaires, on a nécessairement l'égalité des succions dans la pédostructure à tout équilibre à une teneur en eau donnée et la tension h^{eq} mesurée par le tensiomètre est :

$$h^{eq} = h_{mi} = -\rho_w(\mu_{wmi} - \mu_{wmiSat}) = h_{ma} = -\rho_w(\mu_{wma} - \mu_{wmaSat}) \quad (3)$$

μ_{wmi} et μ_{wma} étant les potentiels de la solution aqueuse à l'intérieur (mi) et l'extérieur (ma) du système interne dit « micro ». μ_{wmiSat} et μ_{wmaSat} sont les potentiel de l'eau lorsque l'organisation entière est à l'état saturé (pas d'air dans le milieu).

Or comme l'ont observé Braudeau et al. (2014), \bar{G}_w , \bar{G}_{wmi} et \bar{G}_{wma} (J/kg sol) de l'équation (2) *sont constants avec la variation de teneur en eau*. \bar{G}_w est la somme des deux énergies potentiels créées par les charges de surface des argiles dans l'espace poral micro et dans l'espace poral macro. Cette constance de \bar{G}_{wmi} et \bar{G}_{wma} impose une répartition de l'eau entre la micro et la macro qui, donnée par une équation bien définie, fait que h_{mi} et h_{ma} restent exactement égaux dans la suite des états d'équilibre provoqués par une variation de teneur en eau totale (évaporation par exemple).

En effet, soit $\bar{E}_{mi} = -\bar{G}_{mi} = -\mu_{wmi}W_{mi}$ et $\bar{E}_{ma} = -\bar{G}_{ma} = -\mu_{wma}W_{ma}$, les potentiels spécifiques de charge de la phase solide dans les espaces poraux micro et macro respectivement, \bar{E}_{mi} et \bar{E}_{ma} étant constants on déduit de l'Equation (3) les expressions de h_{mi} et h_{ma} suivantes :

$$h_{mi} = \rho_w \bar{E}_{mi} (1/W_{mi} - 1/W_{miSat}) \text{ et } h_{ma} = \rho_w \bar{E}_{ma} (1/W_{ma} - 1/W_{maSat}) \quad (4)$$

A l'équilibre, l'égalité $h_{mi} = h_{ma}$ implique une répartition de W en W_{ma}^{eq} et W_{mi}^{eq} qui sont les solutions de l'équation du 2nd degré développée à partir de l'égalité des équations (4) ; elles ont pour expression (Braudeau et al. 2014) :

$$W_{ma}^{eq}(W) = \frac{1}{2} \left(W + \frac{\bar{E}}{A} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left[\left(W + \frac{\bar{E}}{A} \right)^2 - \left(4 \frac{\bar{E}_{ma}}{A} W \right) \right]} \quad (5)$$

et

$$W_{mi}^{eq}(W) = W - W_{ma}^{eq} = \frac{1}{2} \left(W - \frac{\bar{E}}{A} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{\left[\left(W + \frac{\bar{E}}{A} \right)^2 - \left(4 \frac{\bar{E}_{ma}}{A} W \right) \right]} \quad (6)$$

où A est une constante représentant la différence des potentiels chimiques des deux types d'eau à l'état saturé:

$$A = -(\mu_{maSat} - \mu_{miSat}) = \frac{\bar{E}_{ma}}{W_{maSat}} - \frac{\bar{E}_{mi}}{W_{miSat}} \quad (7)$$

$$\bar{E} = \bar{E}_{mi} + \bar{E}_{ma} \quad (8)$$

et W_{miSat} and W_{maSat} étant les teneurs en eau micro and macro at saturation telles que:

$$W_{Sat} = W_{miSat} + W_{maSat} \quad (9)$$

Les équations 6a et 6b déterminent la répartition de l'eau de la pédostructure à l'équilibre pour toute teneur en eau W .

3.3.3 Détermination des paramètres hydrostructuraux du sol

Si au cours d'un changement de teneur en eau (évaporation, drainage) celui-ci est suffisamment lent pour que l'on puisse considérer que le passage d'un état hydrique (W_1) à un autre (W_2) s'opère par une suite d'états d'équilibre hydrostructural, les courbes de retrait $\bar{V}(W)$ et de rétention de l'eau $h(W)$ sont alors des suites de points représentant l'état du système (pédostructure) à l'équilibre défini et déterminé par les valeurs de $W_{mi}^{eq}(W)$ et $W_{ma}^{eq}(W)$ données par les équations (5) et (6).

C'est effectivement ce que l'on obtient expérimentalement (suite d'états d'équilibre) lorsque les courbes de retrait et de rétention sont mesurées simultanément avec l'appareil Typosoil[®] (Figure 11) sur des échantillons de pédostructure (cylindres de sol de 5cmx5cm) que l'on fait sécher par évaporation à partir de l'état saturé en eau dans l'appareil mis à 30 ou 40 °C (Braudeau et al. 2014a, Assi et al., 2014). TypoSoil[®] est un appareil récent et est le seul à mesurer en continu et simultanément sur un même échantillon, la courbe de rétention :

$$h(W) = h_{mi}(W_{mi}^{eq}) = h_{ma}(W_{ma}^{eq}) \quad (11)$$

dont l'équation physique exacte a été donnée ci-dessus (Equations 4), et la courbe de retrait :

$$\bar{V}(W) = \bar{V}(W_{mi}^{eq}, W_{ma}^{eq}) \quad (12)$$

dont on connaît aussi la formulation théorique exacte en fonction de W_{mi}^{eq} et W_{ma}^{eq} , établie par Braudeau et al. (2014).

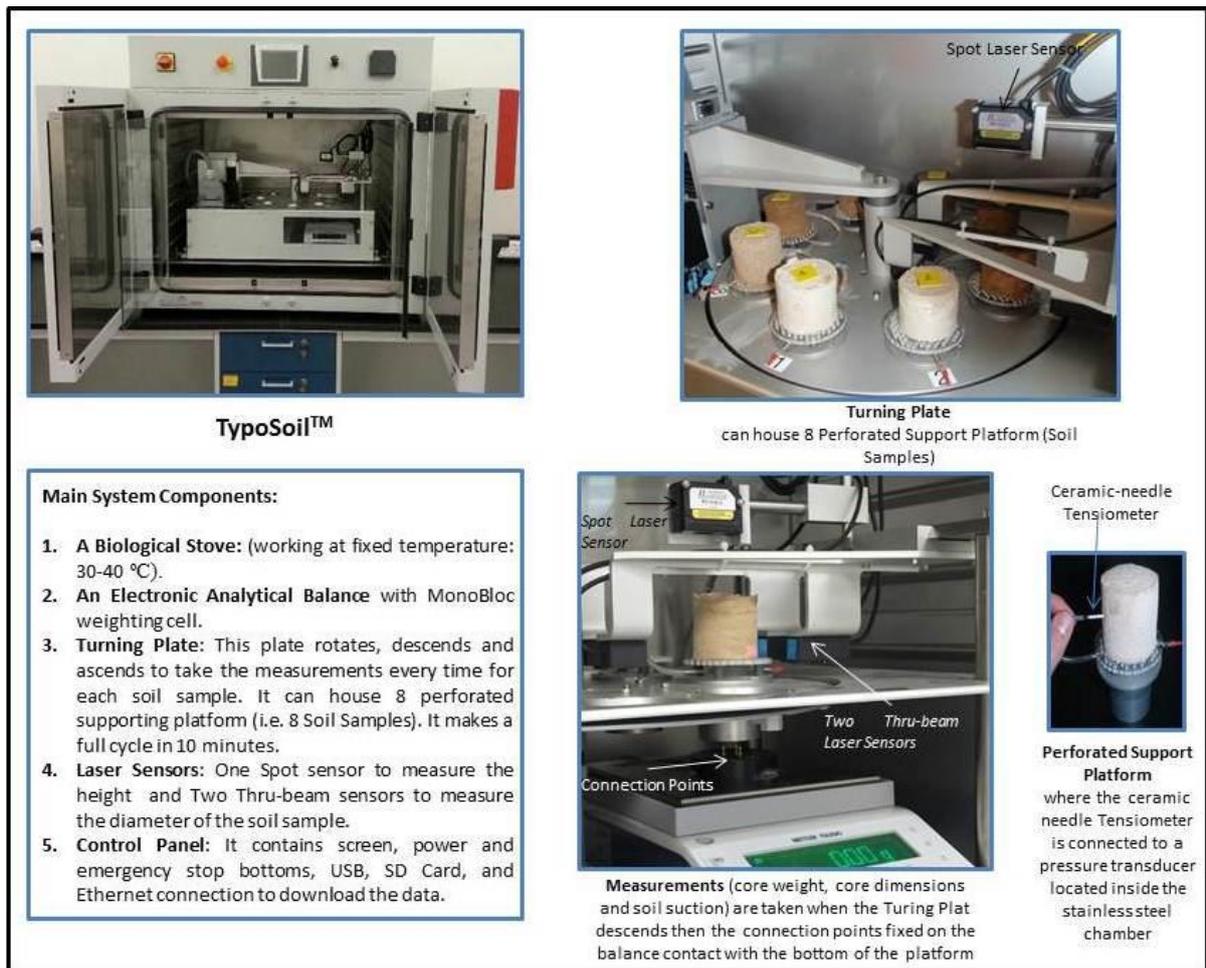


Figure 11. TypoSoil, appareil de mesure en continu des 2 courbes caractéristiques d'humidité du sol : la courbe de retrait $\bar{V}(W)$ et de rétention $h(W)$ (Assi et al. 2014)

La Figure 12 suivante montre en exemple les deux courbes caractéristiques mesurées par TypoSoil et modélisées d'après leurs **équations théoriques (4 à 7)** qui ont été fondées sur la thermodynamique du milieu organisé du sol (Braudeau et al. 2014). Le résultat est une superposition parfaite des courbes mesurées et calculées ; il confirme dans un premier temps notre vision de l'eau pédostructurale en deux types d'eau, micro et macro (ou interne et externe aux agrégats primaires) en équilibre thermodynamique à chaque instant du processus d'évaporation. Il confirme également le bon choix du « système » de variables utilisées qui est celui défini dans le paradigme du SREV. L'avantage de disposer des équations théoriques appropriées, explicatives des courbes mesurées à ajuster, est que l'ajustement fournit une valeur précise des paramètres de ces équations ; paramètres qui sont des propriétés physiques intrinsèques de l'échantillon parfaitement définies (par exemple la teneur en eau microporale

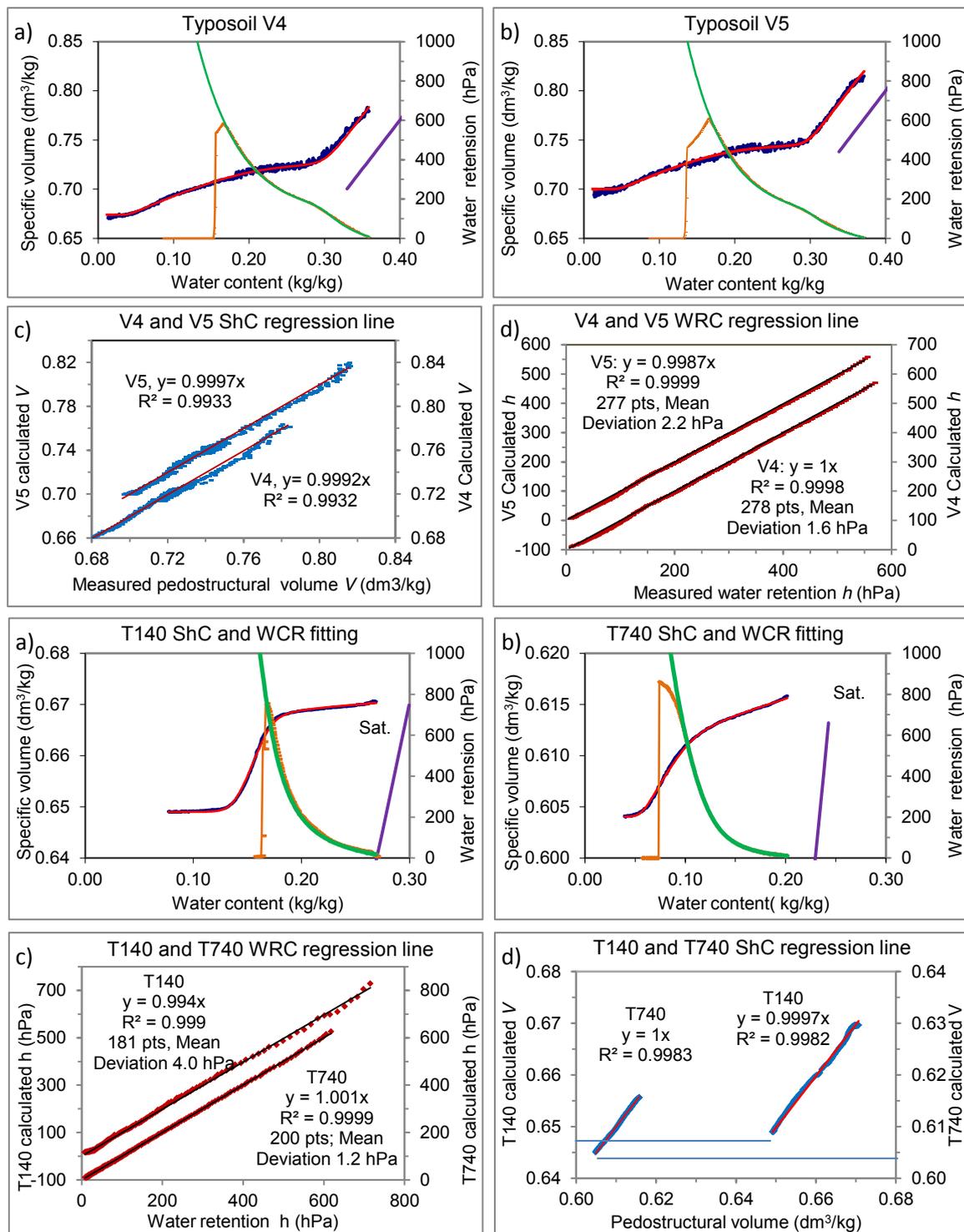


Figure 12. Résultats de mesure par TypoSoil de deux répétitions d'un même sol limono-argileux (images du haut) et de deux sols ferrallitiques différents en taux d'argile (images du bas) : a) et b) : Courbes de retrait mesurées (en bleu) et théoriques (en rouge), et courbes de rétention mesurée (en jaune) et théoriques (en vert) c) et d) Comparaison statistique des courbes de retrait (ShC) et de rétention (WRC) mesurées et calculées. (Tirée de Braudeau et al. 2014a).

à saturation, W_{miSat}). Ces paramètres sont appelés paramètres hydrostructuraux du sol, caractéristiques de la pédostructure (Braudeau et al. 2014a).

3.3.4 Les équations du fonctionnement hydrodynamique de la pédostructure

Comme nous l'avons vu ci-dessus, l'adoption du paradigme basé sur le SREV au lieu du REV nous a conduit à reformuler l'équation d'équilibre thermodynamique ; il en sera de même pour les équations de transfert de l'eau dans le milieu sol et leurs paramètres caractéristiques (Braudeau et Mohtar, 2009, 2014a). Il y a deux types de transfert d'eau à considérer dans la pédostructure : l'un est le flux de Darcy, que l'on considère généralement comme étant le seul existant quand le sol est décrit d'après le principe du REV comme milieu poreux continu et sans interaction avec l'eau ; l'autre est le flux d'eau échangée localement entre les deux systèmes poraux, micro et macro, pour rééquilibrer les deux systèmes en pression ($h_{mi} = h_{ma}$) suite à une variation de la teneur en eau macro W_{ma} .

a) Considérant que le flux de Darcy est seulement celui de l'eau inter agrégats (W_{ma}) et sachant qu'avec la variation de W_{ma} la teneur en eau micro W_{mi} des peds primaires augmente ou décroît en fonction de cette variation pour maintenir localement l'équilibre des pressions de rétention entre les deux systèmes poraux ($h_{mi} = h_{ma}$), l'équation de Richards du transfert de l'eau dans la pédostructure s'écrit (Braudeau et Mohtar, 2009 ; Assi et al. 2014):

$$dW/dt = \rho_w \bar{V} d[k_{ps}(dh/dz + 1)]/dz \quad (13)$$

où k_{ps} est la conductivité hydraulique de la pédostructure, z la profondeur et dh/dz le gradient de pression.

En fait k_{ps} ne sera fonction que de W_{ma} l'eau dans la macroporosité puisque l'échange d'eau micro-macro est local et la quantité W_{mi} au temps t , reste localement la même pendant le temps dt dans l'élément de pédostructure entre les surfaces z et $z+1$. Cela se traduit par la relation :

$$dW/dt = dW_{maDarcy}/dt + dW_{maLocal}/dt + dW_{mi}/dt = dW_{maDarcy}/dt \quad (14)$$

où $dW_{maDarcy}$ est la variation de teneur en eau macro dans l'élément de pédostructure due au flux de Darcy alors que $dW_{maLocal} = -dW_{mi}$ est la variation de W_{ma} due seulement au rééquilibrage local des pressions entre les deux phases aqueuses micro et macro de la pédostructure.

Par ailleurs, k_{ps} étant complètement défini par les équations (13) et (14), on pourra utiliser le dispositif de mesure HYPROP® (UMS GmbH, Munich, Germany) qui offre les conditions expérimentales exactes correspondant à ces équations (Figure 13).

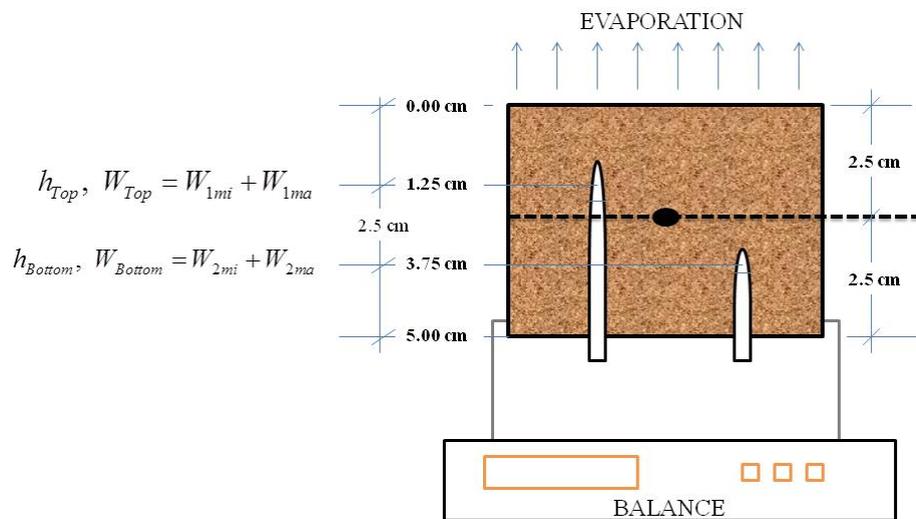


Figure 13. Schéma de principe du dispositif HYPROP® utilisé pour la mesure de la conductivité hydraulique d'un échantillon cylindrique de sol (250 cm² sur 5cm de hauteur). La teneur en eau décroît par évaporation par le haut du cylindre laissée libre. La mesure en continu du poids total de l'échantillon et de la succion (h_{top} et h_{Bottom}) à deux niveaux de profondeur par 2 mini-tensiomètres, permet de calculer W_{mi} et W_{ma} à ces deux niveaux à chaque instant et par suite la variation de la conductivité hydraulique comme exprimé dans le texte.

Mais celles-ci ne pourront être physiquement exploitées, sans hypothèse ou approximation comme c'est nécessairement le cas aujourd'hui (Schindler et al. 2010), que si l'échantillon de sol soumis à la mesure dans HYPROP® aura préalablement été caractérisé par la mesure de ses courbes caractéristiques d'humidité, par l'utilisation de l'appareil TypoSoil (Assi et al. 2014) et la détermination des paramètres hydrostructuraux qui s'ensuit. En effet, connaissant grâce à ces paramètres les courbes théoriques univoques qui lient h aux teneurs en eau W_{mi}^{eq} ou W_{ma}^{eq} (Equation 4), ces teneurs en eau sont calculables pour chaque valeur de h mesurée *localement* aux deux hauteurs dans l'échantillon par les mini-tensiomètres du dispositif de mesure (Figure 13).

Tous les termes de l'équation (13) sont alors calculables et on peut tracer la courbe expérimentale : $\text{Log}(\Delta k_{ps}/\Delta W_{ma})$ fonction de W_{ma}^{eq} . Il s'avère que la courbe est une droite (Figure 14) avec un coefficient de corrélation proche de 1 (Assi et al., 2014), ce qui conduit pour k_{ps} à l'équation paramétrique suivante :

$$k_{ps} = k_{ps0} \exp(\alpha_{ps} W_{ma}^{eq}) \quad (15)$$

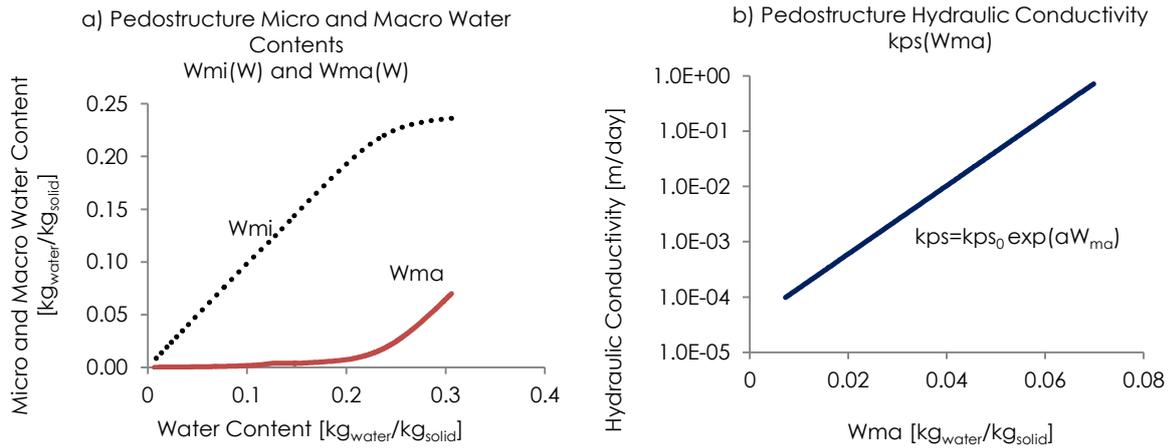


Figure 14. a) Courbes calculées de W_{mi} et W_{ma} à l'équilibre en fonction de la teneur en eau W ; et b) Log de la conductivité hydraulique de la pédostructure en fonction de W_{ma} .

La conductivité hydraulique de la pédostructure est une fonction exponentielle simple à deux paramètres (k_{ps0} et α_{ps}) de la teneur en eau macro à l'équilibre (W_{ma}^{eq}). Etant donnée la relation univoque (4) entre h et W_{ma}^{eq} , on peut tout aussi bien exprimer k_{ps} en fonction de h (en kPa) plutôt que de W_{ma}^{eq} :

$$k_{ps} = k_{ps0} \exp\left[\alpha_{ps} \bar{E}_{ma} / (h + (\bar{E}_{ma} / W_{masat}))\right] \quad (16)$$

Remarquons que les équations (15) et (16) qui sont les équations physiques exactes de k_{ps} trouvées expérimentalement, n'auraient jamais pu l'être sans une définition et une formulation systémique de la conductivité hydraulique de la pédostructure par les équations (13) et (14) (systémiques car leurs variables sont toutes systémiques).

b) Considérant maintenant le deuxième type de transfert d'eau local « micro-macro » dans l'élément de pédostructure et pris en compte dans l'équation (14), l'équation de transfert correspondante est :

$$dW_{mi}/dt = k_{mi}(h_{mi} - h_{ma}) \quad (17)$$

où k_{mi} est le coefficient de transfert caractéristique de la microporosité. Attendant de plus amples investigations sur la constance de ce paramètre, il a été considéré fixe, c'est-à-dire indépendant de la teneur en eau de la pédostructure ou de celle des peds primaires (Braudeau et Mohtar, 2006, 2009). Sa détermination consiste à mesurer la variation de hauteur d'un lit d'agrégats fins (terre fine tamisée à 2mm) immergé à l'état sec dans l'eau : la vitesse de variation de la hauteur indiquant la vitesse d'absorption d'eau par la microporosité décroît exponentiellement selon une équation théorique qui a été établie dans le paradigme de la pédostructure (Braudeau et Mohtar, 2006). L'ajustement de la courbe théorique à la courbe mesurée (hauteur du lit d'agrégat en fonction du temps juste après l'immersion) fournit le paramètre k_{mi} recherché, celui de l'équation (17).

Au total, les *paramètres hydrostructuraux de la pédostructure* définissant les états d'équilibre thermodynamique de la pédostructure en fonction de la teneur en eau, ajoutés aux *paramètres hydrodynamiques* que l'on vient de voir (k_{ps0} , α_{ps} et k_{mi}), constituent ce qu'on appelle les *paramètres pédostructuraux*. Ces paramètres définissent et représentent le fonctionnement hydrostructural et hydrodynamique de la pédostructure. La question qui se pose maintenant est de savoir comment la pédostructure, en tant que système dont le fonctionnement est entièrement décrit par les paramètres pédohydriques, est intégré dans le fonctionnement global du système organisé du pédon et de ses horizons.

3.3.4 Le modèle Kamel® de fonctionnement hydrostructural d'un pédon

Suite à la mise ne place de cette nouvelle physique du milieu organisé du sol, le modèle Kamel® a été implémenté (Braudeau et Mohtar, 2014a) non seulement pour prendre en compte les équations thermodynamiques de l'eau dans la pédostructure nouvellement établies (Braudeau et al. 2014a,b) mais aussi pour tenir compte des sous-systèmes qui sont présents et connexes à la pédostructure dans le même horizon de sol (volumes occupés par les racines, macropores biologiques, éléments grossiers etc.). Grâce à cette implémentation, de véritables relations interdisciplinaires pouvaient être envisagées entre le modèle Kamel et les modèles des autres disciplines agro-environnementales dont l'objet d'étude est dépendant du sol.

Remplacement par les nouvelles équations.

Les équations à remplacer étaient déjà systémiques, dans le sens donné ici (variables et paramètres systémiques) mais ne provenaient pas des lois de la thermodynamique comme c'est le cas des nouvelles équations. Concernant les courbes de retrait et de rétentions de la pédostructure, le nombre des paramètres utilisés reste le même et on sait comment passer d'un jeu de paramètres à l'autre plus récent. Remplacer les anciennes équations de ces deux courbes par les nouvelles dans le corps du modèle n'a donc pas d'intérêt. En revanche, la nouvelle équation de la courbe de conductivité hydraulique $k_{ps}(W)$ n'a plus que deux paramètres au lieu de quatre dans la version précédente. Ceci venant du fait que la nouvelle équation thermodynamique de la courbe de rétention $h^{eq}(W)$, représentée par les équations (3) à (6), est valide sur toute la gamme de teneur en eau et non plus seulement limitée à la zone de validité du tensiomètre (Braudeau et al. 2014b).

Prise en compte des autres sous-systèmes connexes à la pédostructure dans l'horizon de sol

Dans la version originale de Kamel[®], les horizons de sol n'étaient constitués que de la pédostructure ($V_{ps}=V_{hor}$) et donc les paramètres de celles-ci suffisaient pour caractériser le fonctionnement hydrostructural de l'horizon. Comme nous allons le voir, ces paramètres de la pédostructure restent valables dans la nouvelle version mais doivent être complétés des paramètres relatifs aux propriétés des autres sous-systèmes partageant l'horizon de sol avec la pédostructure comme on peut le voir au Tableau 5 tiré de Braudeau et Mohtar (2014a).

Tableau 5. List of the hydro-functional subsystems of a pedon SREV, their internal components and the corresponding parameters. Parameters are explained in the text.

| SREVs of concern | Internal components | Morphological parameter | Functional parameters |
|------------------------|---|-------------------------|--|
| Pedon | - Surface layer - Horizons | S_{xy}, L_z | Bottom conditions Surface conditions |
| ▪ Surface layer | - Pedostructure, clodes - Macro inter aggregate space | H_{surf} | $K_{satSurf}, V_{surfSat}, a_{surf}, b_{surf}, c_{surf}, d_{surf}$ |
| ▪ Horizons | - Succession of SRELS | $H_{hor}, Depth$ | SREL parameters -Field saturated hydraulic conductivity K_{sat} |
| • SRELS | Pedostructure V_{ps} , macropore volumes ($V_{p_{bio}}, V_{p_{fiss}} \dots$) and solid elements (V_{stones}, V_{roots}) | H_{iSat}, S_{xy} | -Volumetric % of components $a, b, c, d \dots$ in the horizon -Pedostructure parameters |

Les paramètres donnés dans le Tableau 5 sont considérées comme des données fixes du milieu organisé et fonctionnel du sol, contrairement aux variables. Cependant on sait que l'activité des systèmes biologiques présents dans l'horizon (accroissement des racines, émission de substances organiques par les racines, activité de la microfaune...) modifient certaines ses caractéristiques au cours du temps, au cours d'un cycle cultural par exemple. Il n'y aucune difficulté à prendre en compte cette variation lente des paramètres au cours du temps dans le modèle.

Braudeau et Mohtar (2014a) ont donné toutes les indications méthodologiques pour la prise en compte des autres volumes organisationnels généralement présents dans un horizon de sol : macropores biologiques, racines des plantes, éléments minéraux grossiers comme les cailloux, pierres, nodules, etc. Ces indications méthodologiques ne concernent pas seulement l'écriture des équations complémentaires dans Kamel qui relativisent l'activité de la pédostructure par rapport aux nouveaux volumes structuraux ajoutés dans l'horizon, mais aussi la manière d'estimer les paramètres supplémentaires à observer ou mesurer à l'échelle du pédon sur le terrain. Le meilleur exemple est celui de la mesure de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) qui se fait traditionnellement sur le terrain à l'aide d'un infiltromètre à disques ou à double anneau (Angulo-Jamarillo et al. 2000). Ce K_{sat} est la somme de la conductivité hydraulique de la pédostructure (k_{psat}) et de celle de la porosité macroscopique d'origine biologique hors de la pédostructure, très variable spatialement contrairement à celle de la pédostructure. Cette variation spatiale ne dépend donc pas de la texture mais d'autres facteurs liés à l'activité macro-biologique du sol en place, ce que l'on doit savoir si on veut utiliser les fonctions pédotransfer au lieu de la mesure pour l'estimation du K_{sat} .

Discretisation des horizons en SRELS (Structural Representative Elementary Layers)

La simulation du transfert d'eau gravimétrique et les processus associés à l'intérieur et à travers le pédon nécessite la discretisation du milieu en couches élémentaires représentatives de la structure des horizons. En supposant que l'horizon de sol a des propriétés hydro-structurelles homogènes, et qu'il s'agit d'un SREV de l'horizon correspondant dans l'unité de cartographie du sol, alors chaque horizon du sol peut être discrétisé en couches minces horizontales (SRELS) qui ont les propriétés physiques (paramètres de la pédostructure) de

l'horizon considéré, et qui sont à différents états d'équilibre en fonction de la teneur en eau de la couche (Figure 15). Ces couches sont appelées couches élémentaires représentatives de la structure (SRELS). Elles ont une épaisseur minimale de 2 cm dans Kamel[®]. En outre, le pédon de 1 m de côté est supposé assez large pour qu'il puisse être représentatif du sol de l'unité cartographique en ce qui concerne certaines caractéristiques pédologiques comme des fissures, des pierres, etc., observables à l'échelle du pédon sur le terrain.

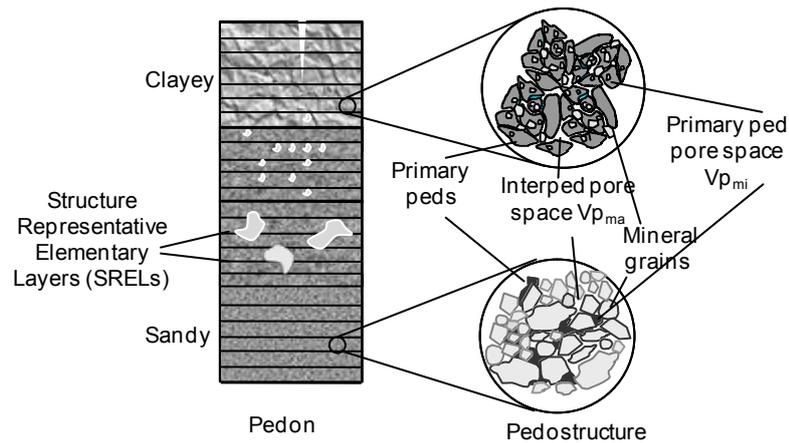


Figure 15. Schéma du pédon et de son organisation interne tel qu'il est modélisé par Kamel[®]. La discrétisation des horizons en SRELS de 2cm d'épaisseur, permet la modélisation physique et systémique (non empirique) des états d'équilibre thermodynamiques et hydrostructuraux de chaque SREL ainsi que la dynamique et la répartition des types d'eau en en chaque point du pédon.

Les variables descriptives d'un SREL comprennent celles de la pedostructure ainsi que d'autres éléments tels que des racines, des macro-pores biogènes, des pierres, etc., dont les volumes sont rapportés à la masse de la pedostructure total de la couche (M_{psL}). Le tableau 5 présente les différents sous-systèmes hydro-fonctionnelles du pédon, comme les SRELS, dont les variables et les paramètres doivent être définis selon le concept de SREV pour être compatible avec les autres niveaux de l'organisation du pédon (horizons, pédon).

En particulier, la masse de pedostructure incluse dans le SREL est avantageusement prise comme référence au lieu de la masse totale de solides appartenant à la couche. Cela nous permet de garder les variables et les propriétés de la pedostructure telles qu'elles sont mesurées parmi variables supplémentaires de la nouvelle version du SREL.

Supposons par exemple qu'une SREL d'un horizon de sol soit composé d'une certaine quantité (en volume) de pedostructure et d'autres éléments organisationnels comme les volumes de pierres, racines, macro-pores d'origine biologique, etc. Tous ces volumes, y

compris celui de la pedostructure, doivent être estimés en fractions du volume total de la couche représentative de l'horizon, comme cela est sous-entendu dans les équations 18 à 21 ci-dessous. Cependant seule la masse de la pedostructure contenue dans le SREL, à l'exclusion des autres masses de solides, sera utilisée comme masse de référence pour les différentes variables extensives de la SREL. C'est pourquoi la discrétisation de l'horizon en SRELS de 2 cm d'épaisseur doit être faite à l'état saturé de l'horizon (ou à un même état hydrique dans tout l'horizon) pour que la masse de la pédostructure puisse être supposée uniformément répartie en haut comme en bas dans tout l'horizon. Chaque SREL de l'horizon aura alors exactement les mêmes paramètres caractéristiques que ceux de l'horizon.

Soit $a = (V_{ps} + V_{fiss})/V_{horizon}$ la proportion volumétrique de pedostructure et des fissures associées (dues au gonflement-retrait de celle-ci) dans un SREV de l'horizon considéré ; et soit $\bar{V}_{ps} = V_{ps}/M_{ps}$ (dm³ / kg), le volume spécifique de la pedostructure mesuré au laboratoire sur un échantillon de sol représentant la pedostructure de cet horizon, alors, la masse de la pedostructure dans le volume discrétisé (V_{layer}) de la de la couche, SREL de l'horizon, sera:

$$M_{psL} = aV_{layer}/\bar{V}_{ps} \quad (18)$$

où M_{psL} est toute la masse de la pedostructure contenue dans la couche, et \bar{V}_{ps} est le volume spécifique de la pedostructure. Par conséquent, si l'on pose b, la fraction volumique de pierres dans l'horizon, c, la fraction volumique de vides biologiques, d, la proportion de racines, etc., le volume spécifique \bar{V}_{layer} d'un SREL de l'horizon sera:

$$\bar{V}_{layer} = \bar{V}_{ps} + V_{pfiss}/M_{psL} + V_{stone}/M_{psL} + V_{pbio}/M_{psL} + V_{roots}/M_{psL} \quad (19)$$

$$\bar{V}_{layer} = \bar{V}_{ps} + \bar{V}_{pfiss} + \bar{V}_{stone} + \bar{V}_{pbio} + \bar{V}_{roots} \quad (20)$$

et les volumes spécifiques des différents sous-systèmes d'un SREL:

$$(\bar{V}_{ps} + \bar{V}_{pfiss}) = a \bar{V}_{layer}; \bar{V}_{stone} = b \bar{V}_{layer}; \bar{V}_{pbio} = c \bar{V}_{layer}; \text{ and } \bar{V}_{roots} = d \bar{V}_{layer} \quad (21)$$

L'équation (21) définit les coefficients a, b, c, d comme des paramètres caractéristiques d'un horizon du pédon qui doivent être estimés par simple observation du profil de sol in situ; ils

sont telles que leur somme est égale à 1. De la même façon que nous avons distingué les volumes poreux \overline{Vp}_{fiss} et \overline{Vp}_{bio} de la couche en plus des volumes poreux \overline{Vp}_{mi} et \overline{Vp}_{ma} de la pedostructure, on a distingué également les teneurs en eau dans ces volumes, telles que, respectivement, W_{fiss} , W_{bio} , et W_{ps} . Remarquons que parmi tous les volumes spécifiques pris en compte dans les équations (19) à (21), seulement \overline{Vp}_{ps} et \overline{Vp}_{fiss} sont des propriétés de la pedostructure variables avec l'état hydrique de sol. Elles sont fonctions de la teneur en eau pedostructurale W_{ps} et déterminées d'après les paramètres de la courbe de retrait.

3.4 Cartographie systémique des sols dans le paysage

Comment envisager la cartographie pédologique comme une représentation *systémique* géo-référencée des unités primaires de sol caractérisées par leur pédon représentatif ?

3.4.1 Unités cartographiques hydro-fonctionnelles hiérarchisées du paysage

Une carte pédologique classique est *une représentation cartographique de l'espace occupé par les organisations du sol telles qu'elles sont définies, décrites et caractérisées sur les axes I et II*. Quant à l'axe III, il a toujours été ignoré de la cartographie pédologique à cause de l'incompatibilité des approches REV et SREV comme nous venons de le voir. La carte pédologique classique n'est donc pas complètement systémique au sens où nous l'avons défini. Mais il est possible d'en approcher la définition en reprenant cette carte et en opérant une délimitation cartographique à plusieurs niveaux d'échelle d'organisations emboîtées (unités de relief comprenant les unités de modelé qui comprennent les unités primaires de sols) selon le schéma de structuration hiérarchique des organisations naturelles présenté plus haut à la Figure 6. Rappelons que les unités primaires de sols sont qualifiées de primaires car elles sont représentées par un pédon représentatif qui, comme on l'a vu, est caractérisé et modélisé de façon systémique par le modèle Kamel[®].

Les unités de relief et de modelé géomorphologique sont facilement reconnues et délimitables en systèmes emboîtés par interprétation des photos satellites et/ou aériennes. Le dernier niveau, celui des unités cartographiques de sol inscrites dans les unités géomorphologiques, nécessite une prospection sur le terrain permettant de délimiter, à l'intérieur de ces unités géomorphologiques, les « unités primaires de sol » c'est-à-dire *des zones homogènes du point*

de vue du comportement hydrostructural des horizons présents. Généralement ces unités de

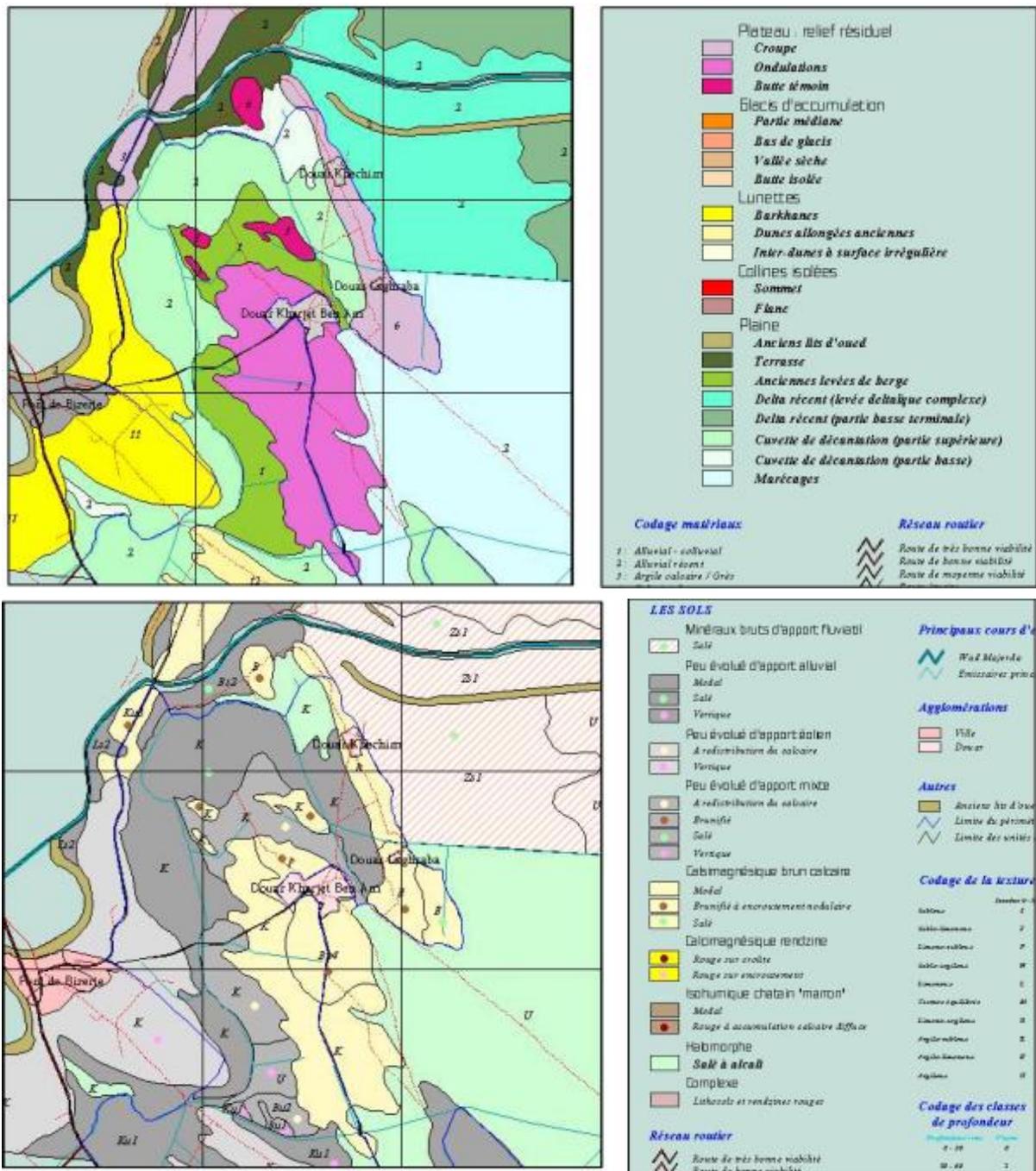


Figure 16. a) Extrait réduit d'une partie de la carte pédologique dressée au 1/20 000 et de sa légende; et b) Extrait de la carte physiographique du périmètre irrigué de Cébala dressée au 1/20000. (Derouiche et al. 2001)

sol sont en nombre limité (3 maximum) dans une même unité géomorphologique; et chaque unité sera représentée par son pédon représentatif qui est en fait un SREV de l'unité cartographique de sol.

En associant le modèle Kamel[®] du pédon représentatif à la cartographie des trois niveaux d'organisation emboîtés qui vient d'être présentée, on aboutit bien à une description systémique complète des sols d'une zone ou une région sur les 3 axes de référence.

La numérisation de ces unités cartographiques associée à la base de données géoréférencées contenant les paramètres de modélisation (par Kamel[®]) de tous les pédon représentatifs de la zone, conduit à la réalisation de ce que nous avons appelé le SIRS-Sols d'une zone donnée: Système d'Information à Référence Spatiale des Sols de la zone.

Un exemple de cartes de sols résultant d'une cartographie systémique (Braudeau et al. 2001) est donné ci-dessus. Les cartes pédologiques et physiographiques dont des extraits sont donnés à la Figure 16, sont des sorties graphiques (lay-out de projets Arc View) du SIRS- Sols du périmètre irrigué de Cébala. Les deux extraits représentent la même portion de la carte. On peut constater que les unités sont emboîtées ; les chiffres dans les unités de modèle réfèrent au matériau (nature, mise en place) et les lettres dans les unités de sol indiquent la classe texturale.

Ainsi la caractérisation d'une unité primaire de sol de la carte des sols (comme celle donnée en exemple Figure 16a) sera considérée comme équivalente en moyenne à la caractérisation du fonctionnement hydrostructural de son pédon représentatif. Celui-ci, composé de ses différents horizons, pourra être exhaustivement modélisé par la version améliorée de Kamel[®] récemment décrite par Braudeau et Mohtar (2014a) et qui satisfait à l'approche systémique *et thermodynamique* définie plus haut.

Les paramètres caractéristiques du sol nécessaires à cette modélisation par Kamel[®] sont alors les paramètres caractéristiques des équations physiques établies selon cette approche aux trois niveaux d'organisation du pédon résumés au Tableau 5 donné plus haut; ce sont :

a) **Les paramètres hydrostructuraux et hydrodynamiques de la pédostructure** de chaque horizon du pédon représentatif, c'est-à-dire :

- les paramètres des équations d'équilibre hydrostructural de la pédostructure, paramètres des équations théoriques de la courbe de rétention de l'eau ($h(W)$) et de la courbe de retrait ($V(W)$) ;

- Les paramètres de l'équation transfert de l'eau dans la pédostructure ($k_{ps}(W)$ et k_{mi})

b) **Les paramètres d'organisation et la conductivité hydraulique à saturation des horizons**, provenant de l'observation morphologique des horizons de sol dans une fosse pédologique ; c'est-à-dire :

- les paramètres de description en termes de pourcentages de la composition de l'horizon en taux de volume occupé par la pédostructure (terre fine), le système racinaire, la macroporosité biologique, les cailloux ou autres éléments grossiers, et le nombre de fissurations verticales ;

- le paramètre k_{sat} à mesurer au niveau de chaque horizon par les outils classiques.

c) **Les paramètres d'organisation du pédon** provenant d'une description de la surface du sol et du profil de sol représentatif, comme :

- certaines caractéristiques de surface du sol (couvert végétal, croûte de surface, fissures, microrelief) prises en charge par Kamel[®] ;

- les profondeurs moyennes des limites de chaque horizon.

3.4.2 Le SIRS-Sols

Le SIRS-Sols d'une zone donnée fournit comme information la délimitation des unités de sol définies de façon systémique dans une structure à niveaux d'organisation hiérarchisés (relief, modelé, sols). Inscrites dans cette structure, au premier niveau d'organisation, elles sont délimitées avec un minimum d'erreur selon les trois axes de description de l'approche systémique de la Figure 8. La nouveauté par rapport à la cartographie pédologique des années 70-80 qui étudiait l'organisation des sols sur les 2 axes « organisation » et genèse, est la modélisation hydrostructurale du pédon sur l'axe III. C'est pourquoi la classification pédogénétique des naturalistes de cette époque (C.P.C.S. 1967) reste tout à fait justifiée et doit être conservée pour l'appellation des unités de sol au niveau géomorphologique ; elle sera complétée par une typologie des propriétés hydrostructurales du sols au niveau des unités primaires de sol.

Les deux problèmes intrinsèques à la science du sol présentés plus haut illustrés par les Figures 1 et 2, ont été résolus avec l'établissement du SIRS-Sols. On est passé d'une caractérisation et modélisation empirique du « milieu sol » à une caractérisation et

modélisation rattachée à une théorie de la physique de l'organisation de ce « milieu sol » et qui est une physique systémique et thermodynamique de l'interaction entre l'eau du sol et la structure du sol.

Le nouveau challenge pour la science du sol peut être défini comme la généralisation de la méthodologie d'élaboration du SIRS-Sols aux nombreuses bases de données pédologiques existantes. Il dépend de la mise en place de cette nouvelle physique qui permet de caractériser et de modéliser le fonctionnement hydrique et structural du pédon (Figure 15) représentatif de l'une unité cartographique de sol. On aura ainsi pour la première fois un moyen d'identification et de comparaison des sols d'après leur fonctionnement hydrostructural défini en lien avec son organisation interne (axe I) et sa pédogénèse (axe II).

4. Le Système Général (SG), modèle générique des disciplines scientifiques relatives à l'étude et la gestion des espaces naturels

4.1 Le Système Humain, d'étude ou de gestion d'un espace naturel, isomorphe au Système Général

Comme annoncé plus haut, nous avons repris la représentation que Le Moigne a donnée du SG de niveau 9 (Figure 4) pour représenter idéalement la relation de l'homme à un objet particulier du milieu naturel, le sol, que ce soit pour son étude, sa gestion ou son exploitation. Nous considérons donc que le modèle du SG de Le Moigne (1994), à condition d'être associé au référentiel de description systémique que nous avons défini plus haut, est le modèle universel du système d'organisation mis en place par l'homme pour prendre en charge la connaissance, l'exploitation ou la gestion des espaces naturels aménagés dont le sol est le support.

La Figure 17 représente l'isomorphie d'organisation entre le SG et le système humain (SH) idéalement organisé pour l'étude ou la gestion d'un espace naturel (aménagé ou non) dont les sols constituent l'infrastructure première. On y distingue les noms des trois sous-systèmes nécessaires de la discipline scientifique (le SH) représentée : les garants de la discipline, le système d'information à référence spatiale et l'espace naturel concerné.

Le schéma du SG met en évidence l'importance du Système d'Information pour la bonne gestion du Système Opérant. Celui-ci est matériellement en contact avec l'environnement externe par l'intermédiaire des flux entrant et sortant du système, qui le traversent et interagissent ou non avec lui.

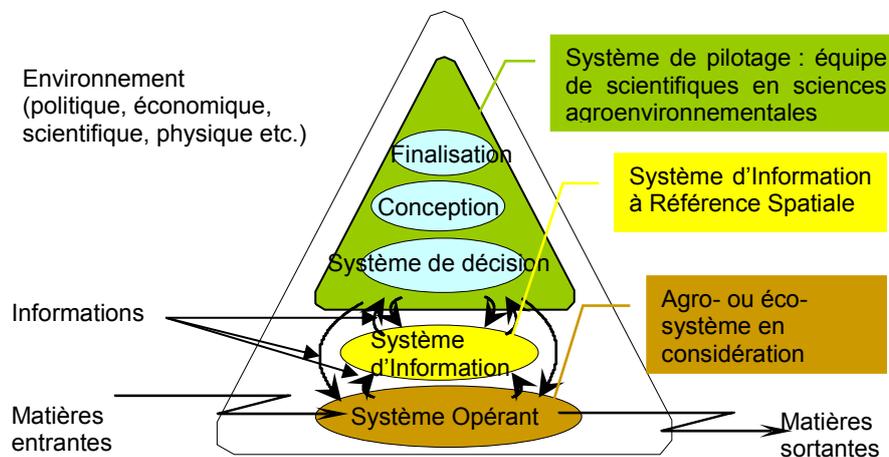


Figure 17. Le modèle du Système Général (adapté de Le Moigne, 1994) comme étant le modèle de la relation idéale de l'homme à son objet d'étude, d'investigation ou d'exploitation.

Ces flux sont contrôlés en entrée et sortie par le Système de Pilotage sur la base des informations et connaissances du système stockées et organisées dans le Système d'Information. Celui-ci constitue une plateforme de modélisation écologique ou agronomique des unités cartographiques de sol reconnues du SO, dont on simulera l'activité (consommation, production) et l'évolution structurale (variation cyclique, aggradation, dégradation) sous l'influence des intrants et flux de matière (en particulier l'eau) qui le traversent et interagissent avec lui. Le SI est donc la base de connaissance nécessaire à l'optimisation du contrôle des ressources (intrants et SO).

Cependant une remarque s'impose sur la nécessité d'imposer un cadre de physique systémique (au sens défini plus haut par référence aux trois axes gradués) au modèle de SG de Le Moigne (1994). Ce dernier n'a jamais évoqué la possibilité que cette représentation du SG de niveau 9 puisse être considérée comme le modèle universel de la relation de l'homme à son objet d'étude, ou d'exploitation, de gestion ou autres. Il était impossible pour Le Moigne d'envisager une telle possibilité car pour cela il aurait fallu qu'il puisse faire une distinction radicale entre le SO, représentant systémique d'une organisation naturelle, et le SG ou même le SP, représentants systémiques d'une organisation humaine comme nous

l'avons déjà définie ci-dessus. En effet, énonçant ainsi le premier précepte son nouveau discours de la méthode (Le Moigne, 1994, p. 43) : « Le précepte de pertinence : convenir que tout objet que nous considérerons se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur », il ne pouvait reconnaître au SO, représentation systémique de l'organisation naturelle à l'étude, une description totalement objective au sens où le disait Descartes « Ma pensée n'attribue aucune nécessité aux choses » (cité par Le Moigne à propos du précepte de causalité p. 37). Il réfutait au contraire cette possibilité d'objectivité en ne portant plus dorénavant l'attention que sur le « comportement-finalité visible aux sens mais toujours soumis aux intentions du modélisateur ». Il dit en effet : « A l'explication cause-effet, l'intelligence substitue alors, par une féconde généralisation, l'interprétation (ou la compréhension) comportement-finalité », esquivant ainsi la question de la relation structure-comportement (selon lui inconnaissable) qui pourtant fait partie du paradigme systémique (Figure 3) pris comme base de sa méthodologie de description sur les 3 axes.

Nous n'avons donc pas suivi Le Moigne dans cette voie et, en reformulant les principes de la description systémique dans le référentiel universel aux trois axes gradués définis plus haut (Cf. 3.2.2 : constituants et forme des organisations ; évolution de ces organisations, activité interne-externe), nous avons maintenu la réalité de ce challenge déterminant qui est « la systémisation » de l'organisation naturelle (comme le sol) : un préalable nécessaire à son investigation comme objet d'étude ou d'exploitation du système humain selon le modèle du SG.

4.2 Les Systèmes Naturels, Systèmes Opérants du Système Général

Comme nous l'avons vu plus haut (Figure 17), les trois sous-systèmes : Système Opérant (SO), Système d'Information (SI), Système de Pilotage (SP) du Système Général (SG) méritent le nom de système s'ils sont descriptibles sur les 3 axes de l'espace de description systémique. Le SO est un système représentatif d'une organisation naturelle, en l'occurrence une zone naturelle que l'on a délimitée pour la considérer en système.

Dans nos domaines des sciences de l'environnement ou de la nature, on sait bien que l'homme n'a aucune part dans la création des organisations naturelles, quelles qu'elles soient, alors qu'il a une responsabilité totale sur le système qu'il met en place et qu'il peut décrire en détail dans sa composition, sa structure, ses capacités d'action. L'homme a ainsi une part

entière dans la gestion, l'exploitation, l'investigation, etc. de ces organisations naturelles qu'il a simplement prélevées ou délimitées pour en faire des *systèmes naturels* (SN), et être transformés et utilisés selon son besoin. Et c'est précisément le *système d'étude ou de gestion*, mis en place pour étudier ou utiliser ce *système naturel*, qui peut prétendre être construit selon le modèle du *Système Général* (Figure 17) et que l'on peut appeler *Système Humain* (SH). Alors que le *système naturel* (SN), provenant de la *délimitation consciente par l'homme d'un volume appartenant à l'organisation naturelle, ou d'un volume fait d'éléments naturels*, ne peut constituer que le *système opérant* (SO) du *système général* (SG). Il ne peut en aucun cas être identifié à un SG contrairement à ce que l'on pouvait comprendre de la présentation de la théorie du SG par Le Moigne (cf. les nouveaux préceptes cartésiens).

Dans cet ordre d'idée, un *Système Naturel* est défini comme étant le Système Opérant d'un Système Général (dont tout *Système Humain* est isomorphe) ; il provient d'une délimitation spatiale (zonation, découpage, ou prélèvement) d'une organisation naturelle, à un niveau d'échelle donné. Ainsi la définition du SN s'établit clairement sur la base du modèle du Système Général de Le Moigne (1994) et du principe de description systémique d'une organisation naturelle. Elle est en accord avec la méthodologie de description systémique du SO (identifié au SN) entraînant une représentation cartographique systémique de l'organisation étudiée mise en mémoire dans le Système d'Information (SI) du SG correspondant.

4.3 Les Systèmes d'information des Systèmes Humains mis en place pour l'étude ou la gestion des Systèmes Naturels

D'après notre vision du système humain, isomorphe au SG, on peut définir plusieurs catégories de SH, dépendant de la perspective avec laquelle celui-ci aura été créé. Ce peut être un système de gestion, d'exploitation, ou de maintenance du SO, si le SO est à exploiter, à gérer ou à maintenir ; ce peut être aussi un système d'investigation scientifique si le SO représente l'organisation naturelle à étudier, comprendre et modéliser. Les deux orientations du SG sont représentées dans l'exemple donné à la Figure 18 suivante. On peut remarquer sur la figure que le SI du SG est tout simplement l'analogue de nos SIG (Systèmes d'Information Géographiques) actuels, à part le fait que ces derniers ne sont pas totalement systémiques : les unités cartographiques, naturelles ou non, des SIGs actuels n'ont pas été élaborés sur le plan

des axes I et II en relation avec l'axe hydro-fonctionnel (axe III) du référentiel systémique comme c'est le cas du SIRS-Sols (système d'information à référence spatiale sur les sols) vu à la section 3.4.

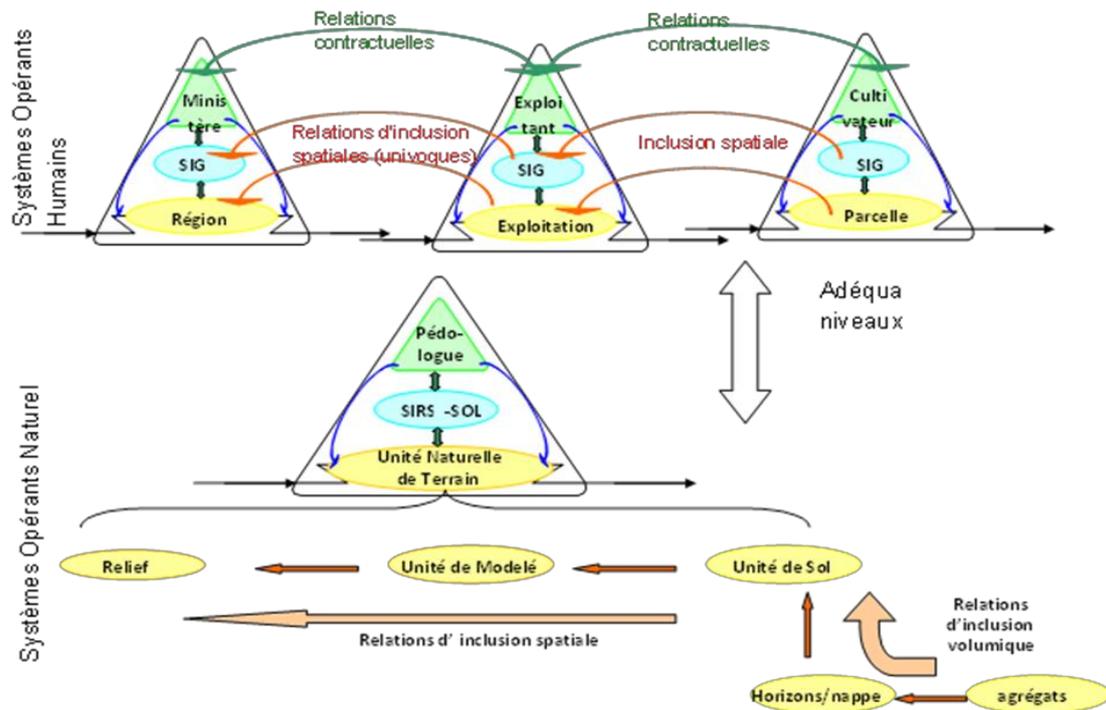


Figure 18. Distinction des Systèmes Opérants du milieu naturel et humain, donnant lieu respectivement aux SIRS-Sols et SIGs. L'adéquation entre les différents SG (disciplines scientifiques, systèmes de gestion) se fait entre les Systèmes d'information respectifs (Braudeau et al. 2001).

Quelle que soit la catégorie du SH (étude, investigation ou gestion, exploitation), le Système de Pilotage (SP) contrôlera et agira dans la perspective du SH (perspective qui fait la catégorie). Le Système d'information (SI), quant à lui, n'est lié à la catégorie que par le fait qu'il doit contenir, *à minima*, les informations nécessaires au pilotage du SO ; sans être cependant contraint de rester à ce minimum requis lié à la spécificité du SO : grâce à la compatibilité des informations entre niveaux d'organisation dans l'approche systémique, le SI peut contenir toute la connaissance qu'il est possible d'avoir sur le SO à ses différents niveaux d'organisation.

Un autre type de limitation du SI est lorsque le SH est considéré comme le SO d'un SH de niveau supérieur, sa liberté d'action sera réduite par les injonctions du SH de niveau supérieur qui agira en fonction de son propre système d'information. Un exemple de cette

hiérarchie de SHs est donné à la Figure 18. Il faut alors garantir la compatibilité des SI des deux SH emboîtés; ce que l'approche systémique permet de réaliser (Braudeau et Mtimet, 2001, Braudeau et al. 2002). Notons qu'une catégorie de SH échappe théoriquement à toute limitation de son SI, c'est la « discipline académique » élaborée selon le modèle du SG dont le but premier est la connaissance de l'objet naturel, indépendamment de toute idée d'utilisation.

4.4 La pédologie hydrostructurale et son propre système d'information à référence spatiale : le SIRS- Sols

Cela nous amène à une compréhension plus précise de ce qu'est le modèle du Système Général présenté plus haut Figure 17 et de son rapport étroit avec l'approche systémique telle que nous l'avons définie ici comme application du référentiel de description systémique (Cf. 3.2) aux objets à considérer comme systèmes (SO, SI, SP, SG, SN, SH). Ainsi, l'approche systémique appliquée à la discipline scientifique en charge de l'étude des sols, sera de convenir que :

1°) Le SG tel que représenté à la Figure 17 est le modèle universel d'une discipline scientifique dont l'objet d'étude et d'investigation, le SO, est virtuellement reproduit (modélisé) et mis en mémoire dans un système d'information (SI) **conformément aux trois axes de description** du paradigme systémique. Le SO étant un espace délimité constitué de sols répartis dans cet espace, le SI sera nécessairement un SIRS : Système d'Information à référence Spatiale. Il reposera sur les concepts systémiques explicités plus haut pour les sols (Pédon, horizons, SREV, SREL, pédostructure, agrégats primaires) pour la définition de ses unités cartographiques. La discipline scientifique correspondante sera appelée « Pédologie hydrostructurale » en référence aux propriétés hydrostructurales du sol que cette discipline prend complètement en charge comme nous le verrons plus loin.

2°) Le SIRS est une mémoire organisée, une base de données qui, lorsqu'elle est aboutie, comprend toutes les informations spécifiques du SO et de ses sous-systèmes, leurs variables et paramètres d'organisation et de fonctionnement. Les données purement empiriques, sans définition sur l'un des trois axes de description, sont peu à peu abandonnées au fur et à mesure de la perfection du système. Ce SIRS sera appelé SIRS-Sols s'il représente la couverture pédologique de la zone d'étude (Braudeau et Mtimet, 2001, Braudeau et al. 2002).

3°) Le SO à l'étude est un Système Naturel (SN) qui a toutes les qualités d'un système organisé : 1) il est délimité dans sa forme externe par une limite interdisant tout transfert de matière solide appartenant à la structure du milieu mais transparente aux phases liquide et gaz ; et 2) il est constitué d'un assemblage de systèmes, organisés ou non, mais aux délimitations précises et bien définies ; toutes les délimitations étant définies sur l'axe 1.

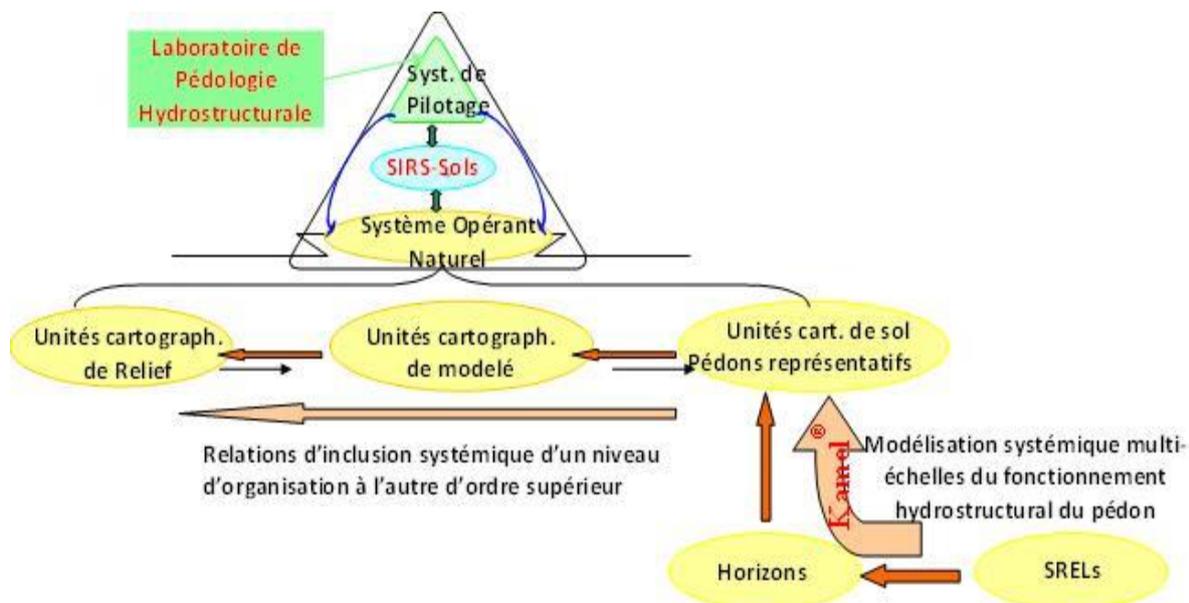


Figure 19. Représentation de la Pédologie Hydrostructurale, discipline scientifique isomorphe du Système Général et composée de ses trois sous-systèmes fondamentaux (SP, SI, et SO), respectivement: le laboratoire de pédologie hydrostructurale, le SIRS-Sols et le système naturel à l'étude dont les pédons représentatifs sont modélisés par le modèle systémique du sol : le modèle Kamel®.

Ainsi, la discipline scientifique en charge de l'étude des sols organisée selon le modèle du SG et satisfaisant aux critères de l'approche systémique est typiquement la Pédologie hydrostructurale définie ci-dessus avec son système d'information spécifique : le SIRS-Sols. Celui-ci, déjà présenté à la section 3.4, est le réceptacle de la description et modélisation systémiques des sols d'une zone d'étude (le SN); il constitue le cœur de la discipline que l'on a schématisée à la Figure 19 en isomorphie du SG (Figure 17) de la relation universelle de l'homme à son objet d'étude, de gestion ou d'exploitation.

La pédologie hydrostructurale est une nouvelle discipline dans les sciences agroenvironnementales environnementales qui naît de la connexion de l'axe III, de modélisation systémique du fonctionnement hydrostructural et multi-échelles du pédon, au plan des axes I et II de la description pédologique des organisations internes des sols, de leur

répartition spatiale et de leur genèse. Elle devrait s'affirmer progressivement au sein des sciences agro-environnementales avec la reconnaissance par les autres disciplines des nouveaux concepts marqués en rouge sur le schéma à la Figure 19, issus de l'application de la notion de SG et de description systémique à la description, caractérisation et modélisation du milieu naturel: le laboratoire spécifique de la discipline qui sera détaillé plus loin, le SIRS-Sols, et le modèle Kamel[®] qui représente entièrement l'organisation interne et le fonctionnement hydrique et structural du pédon représentatif de l'unité cartographique de sol.

Le SIRS-Sols est un produit générique de la nouvelle discipline ; il est valable pour toutes les situations de sol : il sera toujours constitué de la carte des unités cartographiques des trois niveaux d'organisation emboîtés figurés le schéma (Figure 19) : celui des unités primaires de sol, des unités géomorphologiques, et des unités de relief, avec en plus, l'adjonction des paramètres de modélisation du pédon, représentatif de chacune des unités primaires de sol.

5. Émergence d'une nouvelle discipline scientifique, la pédologie hydrostructurale

5.1 La place de la pédologie hydrostructurale dans les sciences de la nature

La Figure 20 suivante montre la place qu'occupe la pédologie hydrostructurale dans les sciences agro-environnementales, à côté de l'hydropédologie, discipline récente née de la mise en commun des deux disciplines traditionnelles : la pédologie et l'hydrologie de surface pour traiter des problèmes agronomiques et environnementaux (Lin 2003, 2012 ; Lin et al. 2006).

La pédologie hydrostructurale remplit un rôle qui restait inoccupé dans les sciences agroenvironnementales faute de théorie scientifique expliquant le fonctionnement hydrostructural et thermodynamique du milieu sol. Ce rôle est « *la caractérisation, la cartographie et la modélisation physique et systémique des propriétés hydrostructurales du sol* », c'est-à-dire du milieu physique structuré que constitue le sol pour les organismes vivants qui y vivent (micro et macrofaune) ou en dépendent (végétaux). Son objectif est de produire le SIRS-Sols de la zone d'étude, rassemblant toute l'information concernant la délimitation des unités de sol de la zone considérée et le fonctionnement hydrostructural de leur pédon représentatif.

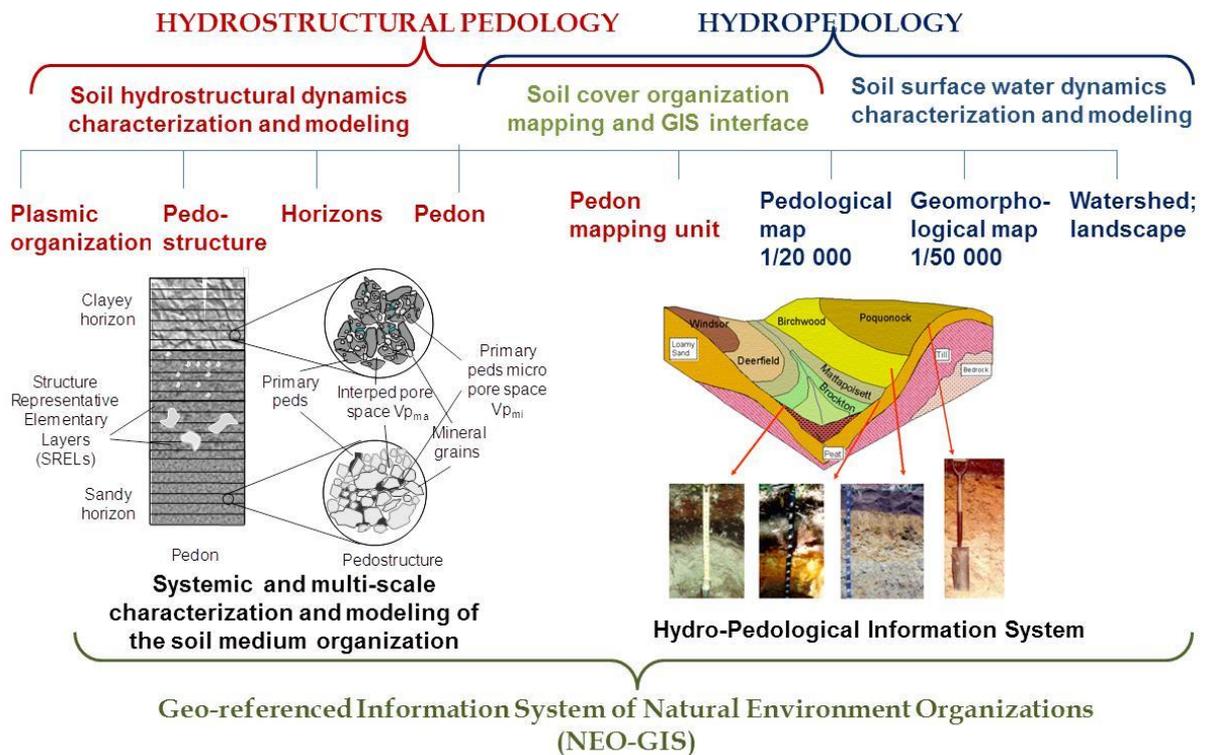


Figure 20. Place de la Pédologie Hydrostructurale dans les sciences de la terre. Le NEO-GIS est construit sur le SIRS-Sols pris comme couche de base, accueillant en plus les informations concernant le milieu environnemental (couvert végétal, microclimat, système d'irrigation, drainage, etc.).

L'association avec l'hydro-pédologie d'une côté et la biologie des sols de l'autre ouvre deux grandes perspectives de recherche et développement en sciences agronomiques et environnementales :

- Généralisation méthodologique du NEO-GIS (Natural Environment Organization- Geo-referenced Information System, Figure 20) à l'ensemble des situations sols-climat de la planète. Comme son nom l'indique le NEO-GIS contiendrait toutes les informations géoréférencées nécessaires à la modélisation systémique de la « critical zone » (Figure 2) d'une étendue géographique, aménagée ou non. Comme la première de ces informations est l'unité cartographique de sol munie de son pédon représentatif, le NEO-GIS est nécessairement construit et développé à partir du SIRS-Sols de la zone géographique considérée qu'il doit contenir comme couche de base de façon à ce que les autres informations de la « critical zone » à la surface du sol, comme le couvert végétal et le

microclimat (ou climat local) aient une relation bien déterminée avec les unités cartographiques de sol. Ainsi, de par sa construction systémique, le NEO-GIS est le lieu de rencontre de tous les couplages des disciplines agro-environnementales avec le sol via le SIRS-Sols : l'imagerie satellitaire en relation avec les délimitations des unités et les informations de surface du sol, l'agriculture et l'écologie en relation directe avec les propriétés hydrostructurales du pédon et de l'unité de sol correspondante.

- Etude des processus biologiques et biogéochimiques du sol en laboratoire et in situ. Toutes les disciplines dont le sujet d'étude est un organisme (ou ensemble d'organismes) vivant dans le sol ou en fonction de lui, sont concernées puisque, pour la première fois, le milieu physique dans lequel se développent ces organismes est défini comme un *système thermodynamique organisé*, dont les variables d'état micro et macro sont déterminées en fonction de la teneur en eau (Braudeau et Mohtar, 2014a ; Braudeau et al. 2014a, 2014b ; et Assi et al. 2014). Cela donne la possibilité d'expérimenter et contrôler le « milieu sol » en laboratoire, et ainsi de suivre et étudier un processus biologique quelconque *dans les conditions matricielles naturelles qu'offre le milieu sol en termes de régime pédoclimatique et d'espace poral*. Cela correspond à un énorme besoin de la part des laboratoires de biologie du sol qui, sans aucun outil de caractérisation et modélisation des propriétés hydrostructurales du milieu sol de leur expérimentation, n'ont aucune possibilité de généraliser les résultats obtenus aux autres sols ou sous d'autres conditions environnementales (régime hydrique, climat, situation géomorphologique,...).

Les perspectives de recherche sont nombreuses concernant ce deuxième point: par exemple la détermination sur colonne de sol en laboratoire des paramètres de couplage des équations de l'activité d'un processus biologique ou géochimique soumis aux contraintes hydriques contrôlées du milieu sol ; ou bien encore de l'accumulation des polluants dans l'espace inter ou intra agrégats primaires, en fonction du régime hydrique qui induit des échanges d'eau entre la microporosité et la macroporosité inter agrégats calculés par Kamel[®].

Ainsi, pour remplir pleinement son rôle, la discipline doit se pourvoir de 3 unités spécialisées pour traiter des objets d'étude propres à la discipline (cités en rouge Figure 20); elles seront fédérées par le même paradigme (physique et systémique) représenté par Kamel[®]:

1) Un laboratoire spécifique muni des équipements et de la méthodologie standards nécessaires à la mesure des courbes caractéristiques de la pédostucture (courbes de retrait, de rétention, de la conductivité hydraulique et de la vitesse de gonflement) des autres paramètres du pédon pris en charge par Kamel[®].

2) Une unité de modélisation développant le logiciel Kamel[®] dans ses différents aspects de couplage interdisciplinaire, autant pour le suivi en laboratoire des expérimentations de couplage que pour la simulation d'une production agronomique sur le terrain à partir des informations du SIRS-Sols ou du NEO-GIS.

3) Une unité de cartographie, liée à l'imagerie satellitaire et la prospection géophysique, pour l'établissement en premier lieu du SIRS-Sols qui doit contenir toutes les informations relatives à la délimitation systémique des unités cartographiques et la caractérisation hydrostructurale du pédon représentatif. Comme on le sait, ces informations rendent modélisables les unités de sol par Kamel[®] qui pourront être couplées avec les modèles biologiques ou agronomiques.

Les unités 2 et 3 ne présentent pas de spécificité nouvelle, leurs fonctions sont définies aux sections 3.3 et 3.4. L'unité de laboratoire en revanche doit posséder une organisation particulière que nous présentons ci-dessous.

5.2 Spécificité du laboratoire de pédologie hydrostructurale

Le laboratoire (Figure 21) est organisé de façon à pouvoir répondre aux deux objectifs de développement et de recherche cités plus haut, c'est-à-dire : 1°) aux besoins de la cartographie systémique pour l'élaboration du SIRS-Sols, et donc être en mesure de caractériser les unités de sol pour leur modélisation hydrostructurale par Kamel[®]; et 2°) aux besoins d'une recherche expérimentale sur les processus biologiques et biogéochimique du sol en conditions pédoclimatiques contrôlées, aussi bien à l'échelle de la pédostucture sur colonne de sol qu'à l'échelle du pédon en cases lysimétriques.

Le laboratoire proprement dit comprend une partie pour la caractérisation de la pédostucture et une partie pour l'expérimentation hydro-physique sur colonne de sol ou en lysimètre.

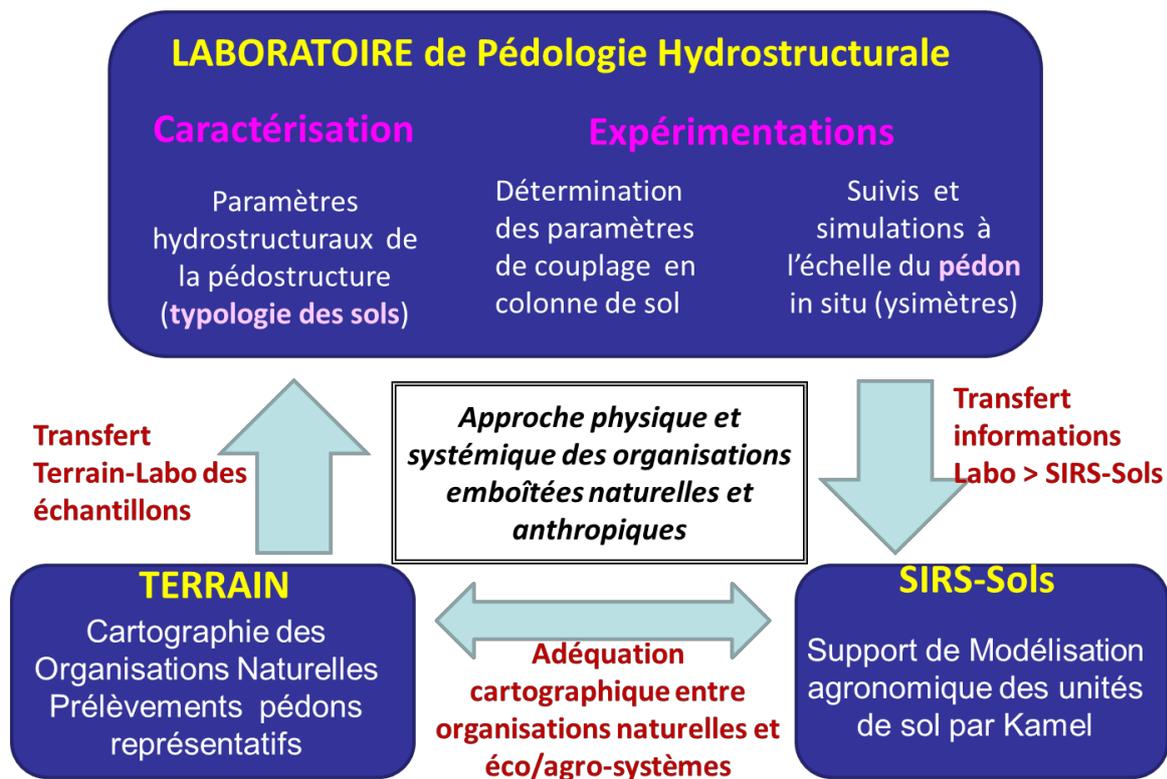


Figure 21. Le laboratoire de la pédologie hydrostructurale à l'interface entre la reconnaissance des organisations de sol sur le terrain et le système d'information (SIRS-Sols) de la nouvelle discipline,

Caractérisation hydrostructurale de la pédostructure

La spécificité du laboratoire tient en son équipement : un ensemble d'appareils de mesure spécialement conçus pour la détermination des paramètres hydrostructuraux et hydrodynamiques de la pédostructure, paramètres caractéristiques du sol directement utilisés par le modèle Kamel[®]. L'équipement premier et indispensable est l'appareil TypoSoil[®] (Bellier et Braudeau, 2014), un appareil de conception nouvelle qui mesure en continu, sur 8 échantillons à la fois, les 2 courbes caractéristiques d'humidité du sol: la courbe de retrait $\bar{V}(W)$ et la courbe de rétention d'eau de la pédostructure $h(W)$. Cet appareil et la méthodologie de mesure et d'extraction des paramètres hydrostructuraux de la pédostructure sont décrits dans Assi et al. (2014). Il est indispensable car il fournit les informations (les paramètres hydrostructuraux de la pédostructure) nécessaires à l'interprétation des résultats issus des autres appareils de mesure. Il en est ainsi par exemple de la détermination des paramètres de la courbe de conductivité hydraulique ($k_{ps}(W)$) comme on l'a vu en 3.3.4 ; ou

encore de la constante de vitesse d'absorption de l'eau par les agrégats primaires (k_{mi}) (Braudeau et Mohtar, 2014a).

Cette fonction première du laboratoire : caractérisation hydrostructurale de la pédostucture, est celle qui permet de renseigner les unités de sol du SIRS-Sols en leurs paramètres caractéristiques de fonctionnement hydrostructural que le modèle Kamel[®] prend en charge. Puisque celui-ci, grâce à cette caractérisation de la pédostucture, permet ensuite de modéliser le pédon représentatif de l'unité selon la même organisation interne que celle rencontrée sur le terrain, il est impératif de conserver le traçage des échantillons dans le cycle des opérations représentées à la Figure 21, depuis prélèvement des échantillons dans les horizons du pédon jusqu'à la restitution des résultats d'analyse dans le SIRS-Sols.

Concernant les autres caractéristiques du sol que celles de la pédostucture, qui sont nécessaires à la modélisation du système sol-plante-atmosphère par Kamel[®], elles sont mesurées ou estimées à l'échelle du pédon, sur le terrain, de manière classique (Braudeau et Mohtar, 2014a).

Analyse expérimentale des couplages bio-sol sur colonne de sol

La partie « expérimentations » du laboratoire (Figure 21) est elle aussi innovante car elle ne peut exister que si le sol, milieu physique des processus étudiés soumis à l'expérimentation, est préalablement caractérisé dans son fonctionnement hydrostructural. A l'aide de ces caractéristiques, non seulement les conditions pédoclimatiques imposées au processus pourront être contrôlées et programmées mais aussi les variables d'état du milieu parfaitement connues à chaque instant, modélisées par Kamel[®].

On peut prévoir des versions adaptées de Kamel[®] et de ses interfaces pour permettre de simuler les expérimentations de couplage de la pédostucture avec les systèmes biologiques en même temps que le suivi de leur déroulement expérimental. La confrontation des résultats expérimentaux avec ceux de la simulation de la dynamique pédostructurale et pédoclimatique du sol par Kamel[®] couplé au modèle de croissance et de production du système biologique étudié, est un moyen inédit d'obtenir les paramètres des fonctions de croissance et production du modèle biologique.

Simulation des processus à l'échelle du pédon en case lysimétrique

Il en est de même pour les expérimentations à l'échelle du pédon en case lysimétrique : la connaissance au préalable des caractéristiques pédostructurales des horizons du pédon permet l'utilisation de Kamel[®] pour simuler le fonctionnement hydrique du pédon. Il pourra donner exactement l'état d'équilibre hydrostructural en tout point du sol à un moment donné, ainsi que les flux d'eau dans les différentes porosités des horizons (Braudeau et Mohtar, 2014a), et ceci dans les conditions au champ (couvert végétal, ETP, pluie). On peut ainsi envisager ce qui n'était pas réalisable auparavant :

- La simulation physique des expérimentations de couplage comme ci-dessus mais à l'échelle d'un pédon (succession d'horizons différents) et en conditions de terrain.

- L'aide à l'interprétation des résultats des analyses chimiques et biologiques faites en laboratoire sur prélèvements de sols effectués dans le cadre d'un suivi de la qualité des eaux et des sols dans les systèmes hydro-agricoles. La modélisation systémique du sol par Kamel[®] est la seule méthode de modélisation en mesure de restituer les données de laboratoire dans les conditions du sol in situ.

6. Implications dans les sciences agroenvironnementales

6.1 Une théorie unifiée de l'approche systémique et thermodynamique du milieu naturel

La modélisation du milieu naturel et les préceptes cartésiens

Nous avons noté l'absence d'une théorie unitaire de la description des sols pour résoudre les deux problèmes fondamentaux que nous avons relevés, intrinsèques à la science du sol : la reconnaissance des niveaux d'organisation hydro-fonctionnelle du milieu naturel et la formulation physique de la fonctionnalité hydrique du milieu organisé et structuré du sol.

Ces deux problèmes ont été résolus en inscrivant la science du sol dans *un même paradigme de description (modélisation) systémique du sol*, celui de la pédologie hydrostructurale. Il procède entièrement d'une théorisation fondamentale de *l'approche systémique du milieu naturel* que nous avons faite ici à partir principalement des travaux de Le Moigne (1994) sur la définition et la description (modélisation) de ce que « devrait être » le Système Général.

Adhérant à cette idée d'un Système Général comme modèle d'un système universel de la relation de l'homme à la nature comme le pressentait Bertalanffy, nous avons repris certains matériaux décrits par Le Moigne mais en les réinscrivant dans la logique cartésienne qu'il avait « radicalement » abandonnée, en 1976 (1^{ère} édition de son livre), quand il a posé « Les quatre préceptes du niveau discours de la méthode » (Le Moigne 1994, p. 42), en remplacement des 4 anciens préceptes donnés par Descartes (1637) (Le Moigne 1994, p. 30). L'un d'eux en particulier, que Le Moigne a remplacé par celui d'agrégativité, est justement celui qui pouvait conduire à la notion de Système Naturel Organisé tel que nous l'avons défini à partir de la notion de SREV (§ 3.2.1) nous permettant d'écrire : $V_{tot} = \sum V_i$ où chaque V_i est déterminé. Il est énoncé ainsi : « Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales que je fusse assuré de ne rien omettre. »

Le précepte d'agrégativité au contraire, tel qu'énoncé par Le Moigne, donne permission au modélisateur de passer outre ce dernier précepte, ce qui ne peut conduire qu'à la notion de REV ou de boîte noire où la structure (organisation de la phase solide) interne de l'objet est négligée, comme le dit clairement Le Moigne (1994, pp. 40-41) :

« Le dernier précepte de l'ancien discours, celui de l'exhaustivité, est aisé à récuser. Il est si quotidiennement bafoué sans vergogne par chacun, cartésien ou non, que ses défenseurs résisteront peu devant l'argument des faits : il est... en pratique... impraticable ! Qui pourra jamais être assuré qu'il a fait un dénombrement si entier qu'il soit assuré de ne rien omettre. ». Et donc, « ... nous ne pouvons plus convenir que nous serons à même « *de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales que nous soyons assurés de ne rien omettre* ». Mieux vaut en convenir et nous proposer délibérément d'omettre beaucoup de choses en les enfonçant dans l'ombre des agrégats. **Des agrégats que, bien sûr, nous sélectionnerons nous-mêmes, explicitement, publiquement.** Nous ne prétendons plus, dès lors, « tout » expliquer de l'objet considéré (avec quelques risques... ».

Nous avons vu que c'est cette voie qu'ont prise les hydro-physiciens du sol pour la modélisation des transferts d'eau dans le milieu naturel en posant l'hypothèse du REV pour se libérer des contraintes liées à l'organisation multi-échelles du sol et l'hétérogénéité apparente de la structure. Cette organisation était jugée trop complexe pour pouvoir être décrite de manière mécaniste et de là est venue leur adhésion au concept de la boîte noire

développée par la modélisation cybernétique. Ce faisant, les chercheurs ont démissionné devant l'idée traditionnelle « d'un ordre naturel parfait » et ont abandonné du même coup, non seulement le quatrième mais aussi les deuxième et troisième préceptes de Descartes qui sont: (2^{ème}) « *diviser les difficultés en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour les mieux résoudre.* » et (3^{ème}) « *conduire par ordre mes pensées en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusque à la connaissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres.* ».

Ces préceptes également ont été récusés par Le Moigne. Il les a dénommés ainsi : précepte réductionniste et précepte causaliste (déterministe), pour les remettre en cause de façon véhémement en faisant ressortir leur côté dogmatique et contraignant pour le modélisateur: « Nous allons sans doute souffrir longtemps encore de cet impérialisme implicite du troisième précepte, et il sera difficile de nous convaincre qu'il est possible d'être parfaitement rationnel sans être astreint au seul modèle causaliste pour connaître le monde. » Les deux préceptes qu'il propose en remplacement dans son nouveau discours de la méthode sont :

- *Le précepte du globalisme*: Percevoir désormais l'objet à connaître comme une partie insérée, immergée, active, dans un plus grand tout (nous dirons bientôt : dans un environnement), et faire de l'intelligence de cet environnement la condition de notre connaissance de l'objet, telle est la teneur du nouveau précepte, celui que nous allons opposer au réductionnisme : on pourra le reconnaître sous le label du globalisme.

- *Le précepte téléologique* : Interpréter l'objet non pas en lui-même, mais par son comportement, sans chercher à expliquer a priori ce comportement par quelque loi impliquée dans une éventuelle structure.

Nous allons voir en fait que le paradigme systémique que nous avons élaboré est non seulement la réponse méthodologique adéquate aux exigences des préceptes cartésiens, que Le Moigne trouvait impossibles à respecter, mais aussi qu'il résout toutes les critiques de ce dernier. De telle sorte que s'il y a un nouveau Discours de la méthode ce pourrait être celui de Descartes à énoncer dans le paradigme systémique.

En effet, les résultats que nous avons obtenus après la systémisation de l'organisation naturelle (le sol) nous permettent d'avancer les remarques suivantes:

Les deuxièmes préceptes de Descartes et de Le Moigne (réductionniste/globaliste) ne sont pas du tout contradictoires mais au contraire se complètent. La méthode analytique de Descartes est évidemment nécessaire et ne saurait être écartée, cependant il lui manquait les deux concepts systémiques que nous avons introduites ici : i) la définition du système, espace délimité, clos sur sa structure et ouvert aux flux liquide et gazeux ; et ii) le référentiel de description systémique aux 3 axes gradués permettant la reconnaissance et la définition précise des « parcelles de problèmes », ce que nous appellerions aujourd'hui des systèmes organisés fonctionnels.

Avec l'apport de ces deux concepts la critique de Le Moigne d'être un précepte réducteur ne considérant pas l'aspect global externe à l'objet, ne tient plus. En effet, avec la définition de système qui est d'avoir une délimitation externe concrète englobant une phase solide, la délimitation externe du système global constitue l'interface fonctionnelle avec son environnement externe. D'autre part, grâce à l'idée que le volume complémentaire des sous-systèmes (d'un même niveau) dans le système global est exactement celui des phases liquide et gazeuse entourant la phase solide et non retenues par les délimitations systémiques, tous les volumes fonctionnels internes au système global sont nécessairement dénombrés et déterminés. Par exemple, si S1 est un sous-système de S3, le volume complémentaire (V_p), qui n'est pas un système puisque occupé uniquement par les phases mobiles dans S3, est exactement déterminé par la différence de volume des deux systèmes ($V_3 - V_1$). L'analyse systémique apporte donc bien une solution aisée à « l'impraticabilité » du 4^{ème} précepte de Descartes (de tout dénombrer...) selon Le Moigne. Et c'est au contraire au précepte d'agrégation de Le Moigne d'être accompli dans le paradigme systémique pour rejoindre celui de Descartes et éviter que l'on ait recours au principe de la boîte noire (ou plus exactement du REV).

Quant au troisième précepte de Descartes (*conduire par ordre mes pensées...*), à condition d'utiliser le référentiel de description systémique comme base de la méthodologie de systémisation de l'organisation considérée, il correspond exactement à la démarche que nous avons suivie pour élaborer, à partir des concepts de pédostructure et de SREV, le modèle Kamel[®] du fonctionnement hydrostructural du pédon représentatif de l'unité primaire de sol

(Braudeau et al. 2004, Braudeau et Mohtar, 2009 et Braudeau et Mohtar, 2014a). On peut constater que cette démarche ne se réfère aucunement au *précepte de téléologie* proposé par Le Moigne pour remplacer ce troisième précepte.

En fait on peut dire que ce précepte de téléologie vient en contradiction du 1^{er} précepte de Descartes : « de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la connusse évidemment être telle, c'est-à-dire d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention, et de ne comprendre rien de plus en mes jugements que ce qui se présenterait si clairement et si distinctement à mon esprit que je n'eusse aucune occasion de la mettre en doute. » Le précepte de téléologie devait permettre au modélisateur de se passer du 3^{ème} précepte de Descartes : baser sa modélisation sur le rôle imaginé de l'objet au sein de son environnement, plutôt que sur la relation de cause à effet (à rechercher) impliquant l'organisation interne de l'objet. L'utilité de ce précepte se conçoit bien quand l'objet est de fabrication humaine ; on peut effectivement espérer comprendre son mécanisme interne en fonction de son rôle ou utilité dans l'environnement social externe; mais lorsqu'il s'agit d'un objet naturel, le modélisateur observant ce précepte ne pourra que poser des hypothèses téléologiques teintées d'anthropomorphisme qui ne pourront jamais être ni vérifiées ni approfondies.

Quant à nous, nous avons répondu à ce premier précepte de Descartes en posant dès le départ une distinction fondamentale entre organisation et système : l'organisation est une création divine alors que le système est une création humaine et nous avons donné les règles de transformation de toute organisation naturelle en système, transformation que l'on a appelé systémisation. On peut comprendre pourquoi la téléologie n'est pas de mise pour un système naturel et qu'en fin de compte les 4 préceptes de Descartes sont à la base de l'approche systémique *physique*.

Systemisation, base théorique de l'approche systémique

L'opération de transformation d'une organisation en système, est ce qu'on a appelé la *systemisation* de l'organisation (objet d'étude) à décrire. Comme on l'a montré dans notre étude, cette systémisation se fait en deux temps (Figure 22); la première étape est simplement la délimitation concrète de l'objet que l'on veut étudier : un sol, une zone, un territoire c'est-à-dire un corps naturel organisé. Cette délimitation, analogue à un découpage, délimite

précisément l'intérieur de l'extérieur de l'objet et enveloppe globalement toute la phase solide bloquée dans sa structure interne. L'objet est devenu un système que l'on peut porter à l'étude en tant que SO du SG (la discipline scientifique) qui procédera à son étude. Vient ensuite la deuxième étape de la systémisation (Figure 22) que l'on doit effectuer sur l'objet pour le transformer en système organisé. Cette étape est absolument nécessaire car *définit exhaustivement* les variables descriptives de l'organisation interne du SO, à tous les niveaux hydro-fonctionnels reconnus, qui seront les variables à utiliser, exhaustivement, dans la modélisation physique de toute activité interne et externe de l'objet réel. Elle se fait en décrivant l'objet système d'après le concept de SREV dans le *référentiel de description systémique aux trois axes gradués* présenté à la section [3.2.2]. La première étape correspond au principe du REV et la seconde à celui du SREV.

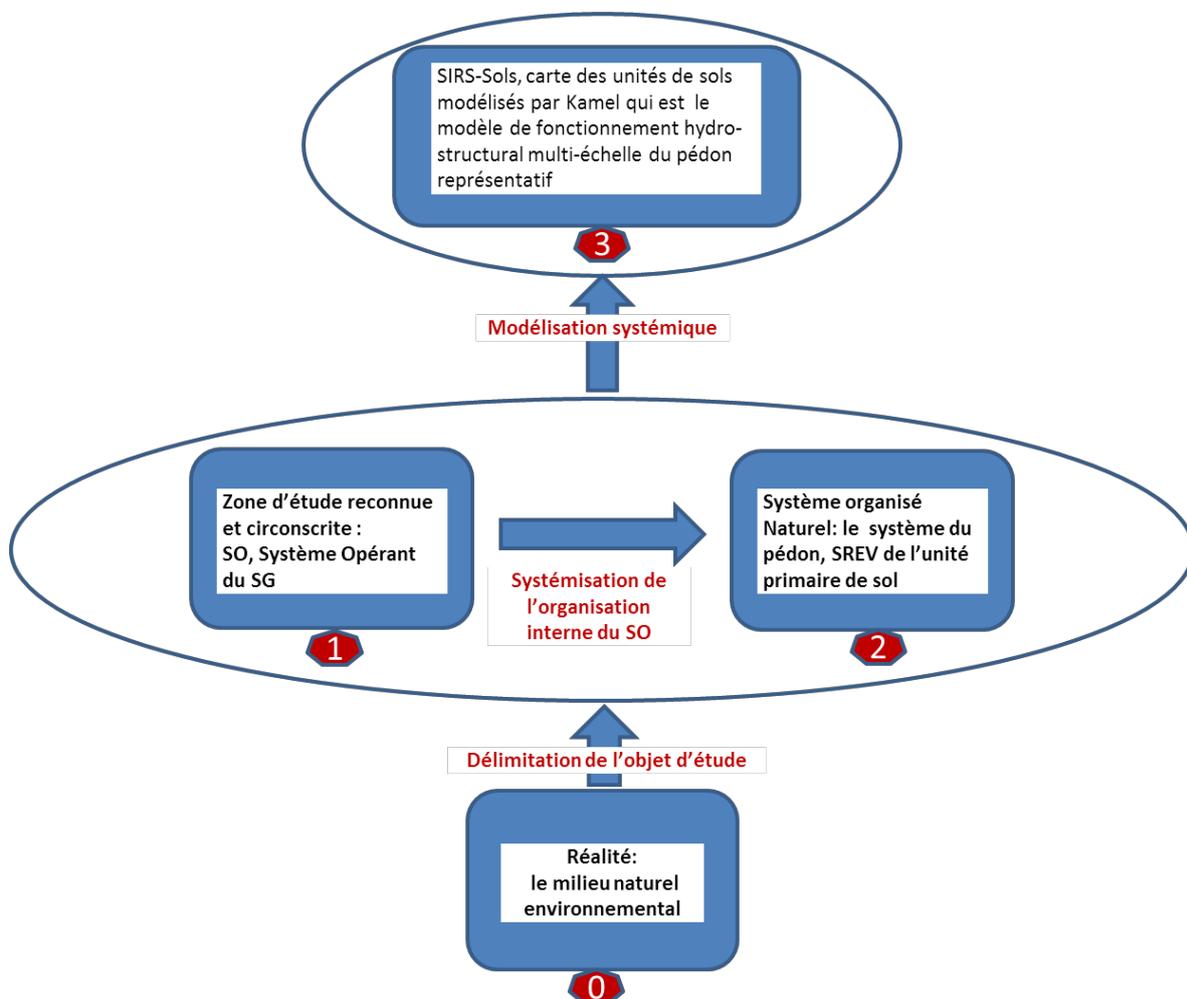


Figure 22. Les différentes étapes d'élaboration du Système d'Information (SIRS-Sols) de la pédologie hydrostructurale.

Or c'est de cette occultation de la structure et de l'organisation hiérarchisée de l'objet naturel par l'utilisation du REV que naît la complexité des « systèmes dits complexes » et l'empirisme des équations mathématiques que l'on attribue au fonctionnement et l'activité de ce REV (ou boîte noire) vis-à-vis de son environnement externe. La complexité dont parlent les « mathématiciens des systèmes complexes » est en fait celle d'une organisation, l'organisation interne naturelle de l'objet étudié, et non pas celle du système organisé correspondant: celui, le SREV, défini par l'homme pour étudier cette organisation. Tout système créé par l'homme peut être compliqué *mais ne peut être complexe par essence*.

Ainsi, la *systemisation* complète de l'objet naturel résout le problème de la complexité apparente de son organisation interne en transformant celle-ci en un système organisé en sous-systèmes, eux même organisés en sous-systèmes, ainsi hiérarchiquement jusqu'à ce que les sous-systèmes finaux soient les objets de la phase solide constituant la structure de l'organisation pluri-échelle. Les organismes vivants du sol, plantes, micro-faune, etc., sont considérés comme des systèmes autonomes, partageant l'espace, l'air, l'eau, et la chaleur avec la pédostructure dans l'organisation interne du sol représentée par son pédon.

Systemologie théorique et appliquée

Nous voulons montrer ici que l'opération de systemisation de l'objet naturel dont nous avons fait état ci-dessus procède de la même démarche que celle des systemiciens comme Mesarovic, Klir et Orchards analysés par Pouvreau (2013) comme d'importants contributeurs au développement de la « systemologie théorique fondamentale » initiée par Bertalanffy et qui ont particulièrement travaillé à la codification logique et méthodologique de la théorisation de « systèmes généraux ». A propos de la « procédure de définition d'un système sur un objet » Pouvreau (2013, p. 940-942) explique notamment que:

Il faut dans cette description prendre en compte le fait que Klir, beaucoup plus clairement que Mesarović, distinguait l'« objet d'étude » du « système défini sur cet objet » (c'est-à-dire d'un modèle systemique de cet objet). Le principe essentiel de la procédure qu'il décrit est que ce système, en tant que « système source » (défini comme l'ensemble des variables du système et des ensembles d'états associés à ces variables) est construit à la fois par homomorphie² à un « système objet » (i.e. une construction de l'objet que je qualifie de pré-systemique, définie comme l'ensemble formé d'une sélection d'attributs de l'objet et des « ensembles d'apparences » de chacun de ces attributs), et par isomorphie à un « système général ». Ce point souligné par Le Moigne en 1977 dans sa théorisation de la « systemographie » le fut déjà par Klir deux ans auparavant³. Mais c'est Orchard qui, dès 1972, contribua le plus significativement à la systematisation de ce que Klir appelait la « procédure de définition d'un système sur un objet », alors qu'il s'efforçait de synthétiser et de compléter les travaux de ce dernier. Orchard insista sur les étapes permettant de connecter un problème spécifique à un « système général » en vue de construire un modèle systemique voué à résoudre ce problème :

Après avoir rappelé les propositions méthodologiques de ces auteurs (des années 1970-80), Pouvreau (2013) en présente la synthèse actualisée sur un schéma (Figure 23) représentant les étapes de construction du « modèle systémique de l'objet » d'étude, passant par celle de l'objet système et l'objet modèle sous l'égide du système général, puis à la modélisation proprement dite qui relie les « sciences du réel » et la « théorie des systèmes généraux » :

« Il me semble non seulement possible, mais utile et même nécessaire de raffiner encore les descriptions de la procédure de construction d'un modèle systémique exposées par Klir et Orchard. La distinction que j'ai opérée dans la seconde partie entre « objet-modèle », modélisation et modèle, dont j'ai illustré la pertinence lorsque j'ai considéré la théorie de la croissance de Bertalanffy, devient ici particulièrement utile.

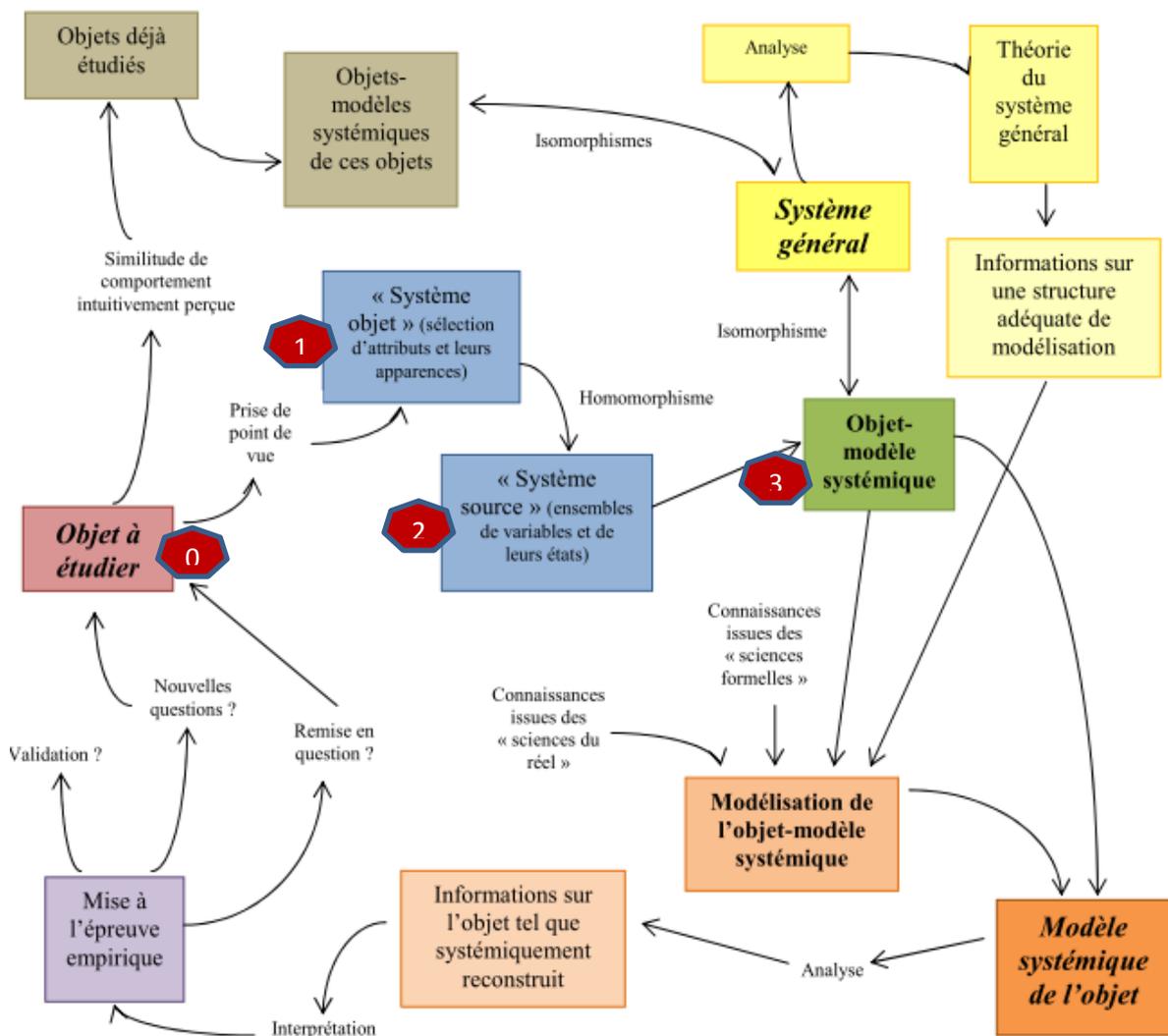


Figure 23. Reproduction du schéma du fonctionnement de principe de la « systémologie théorique appliquée » selon Pouvreau (2013, p. 943).

« Car ce n'est pas directement le « *système source* » dont parla Klir que le systémicien modélise par une construction isomorphe au « système général », mais une représentation abstraite liant de manière encore très formelle et non spécifiée les variables sélectionnées : cette représentation est ce que j'appelle l'« *objet-modèle systémique* » de l'objet d'étude. L'idée de Klir de distinguer entre « *système-objet* » et « système-source » et de considérer leur relation comme un homomorphisme du premier vers le second me semble par contre plus précise que la conception trop vague qu'Orchard se faisait du premier : le « système-objet » d'Orchard apparaît mêler en un seul trois concepts distincts (les deux distingués par Klir et celui d'« *objet modèle systémique* »). Il me semble encore nécessaire de préciser que la fonction directe du « *système général* » concerne la construction de l'objet à modéliser, tandis que celle de la théorie du « *système général* » concerne la modélisation à proprement parler. C'est d'ailleurs là qu'elle exerce sa fonction de guide logique.»

On peut reconnaître sur ce schéma l'exacte correspondance entre les objets numérotés de la Figure 23 et ceux de la Figure 22 précédente qui représente le processus d'élaboration du SIRS-Sols par la pédologie hydrostructurale, discipline organisée en isomorphie du modèle de système général des disciplines scientifiques du milieu naturel tel que nous l'avons défini ici.

A partir de « *l'objet à étudier* » [0], le « *système objet* » [1] correspond à l'objet réel qui a été délimité (SO du SG) et dont on connaît empiriquement certaines propriétés ; le « *système source* » [2] est pour nous le pédon représentatif de l'unité cartographique de sol un système organisé en sous-systèmes eux-mêmes organisés etc. dont les variables descriptives sont toutes répertoriées ; « *l'objet modèle systémique* » [3] est la carte des sols procédant d'une cartographie systémique du paysage, munie des informations sur i) les délimitations des unités cartographiques et ii) les paramètres caractéristiques des unités de sol, à savoir les paramètres physiques de modélisation du fonctionnement hydrostructural du pédon représentatif pris en charge par le modèle Kamel[®].

Ensuite vient, après le [3], la « *modélisation de l'objet modèle systémique* » qui est une simulation par le modèle informatique Kamel[®] (Braudeau et Mohtar, 2014a) de l'activité interne et externe (et éventuellement aussi de l'évolution corrélative de la structure) de « l'objet d'étude », le pédon représentatif, soumis à l'activité de son environnement interne (organismes végétaux, micro-organismes biologiques) et externe (climat, travaux

cultureaux, culture...). Cette simulation de l'objet « sol » dans son environnement climatique, biologique et agronomique nécessite les informations du milieu environnemental contenues dans ce que l'on a appelé le NEO-GIS, système d'informations géoréférencées construit (systémiquement) sur le SIRS-Sols de la zone considérée (Cf. Figure 20). Le « *modèle systémique de l'objet* » est le résultat de la simulation sur une période de temps donnée, d'une zone hydro-agricole par exemple, de sa production, sa consommation en eau, de l'évolution de la nappe etc.. Comme le mentionne le schéma (Figure 23), les résultats de la simulation dans le temps sont ensuite analysés, comparés et confrontés à la réalité pour être interprétés, répondre aux questions etc. Notons ici que si la notion de système physique est respectée à chaque étape, c'est-à-dire si l'on n'a pas fait rentrer de variables empiriques (non systémiques) dans le processus de modélisation, il n'y a pas lieu de rechercher une validation du modèle lui-même. Le modèle Kamel[®], **parce que systémique, reflète exactement la réalité du sol et est, de ce fait, générique** : il fonctionne de la même façon sur tous les types de sol et sans avoir à être calibré si toutes les informations requises sont données.

Dans la partie supérieure du schéma (Figure 23) on note que le « *système général* » est en relation isomorphique avec « *l'objet modèle systémique* » ; c'est sur ce point que nous nous écartons de la définition ou vision de système général des auteurs analysés par Pouvreau, tout en étant conforme à la perception de ce dernier donnée sur son schéma. Le système naturel (SN), représentant l'organisation « générale » du continuum sol-plante-atmosphère, que nous avons physiquement défini comme le pédon représentatif de l'unité cartographique de sols et que Kamel[®] est potentiellement capable de modéliser dans tous ses aspects internes et externes de comportement et d'évolution, à toutes les échelles hydro fonctionnelles, pourrait être dit « Système Général du milieu naturel » (Rosen, Klir, Pouvreau p. 917). Cependant, en imposant dès le départ la « systémisation » de l'objet d'étude comme préalable à toute construction systémique d'un modèle de l'objet, avec les notions de « système » et de « système organisé » que nous avons *physiquement* définies ici, nous écartons dès le départ la possibilité d'une pluralité de modèles non-systémiques pour représenter le même phénomène, modèles qui reposent sur le principe de la boîte noire faisant fi de l'organisation interne et donc de sa physique unitaire. Nous avons vu en effet que tout modèle systémique, au sens physique qu'on lui a donné ici, est dit unitaire car descriptible de façon unitaire dans le référentiel de description systémique aux 3 axes gradués qui a été défini ici ; et le restera tant que l'on n'aura pas introduit de notions empiriques dans son fonctionnement hydro-physique

interne. Si bien qu'il n'y a qu'un seul Système Naturel, représentant l'organisation générale du milieu naturel, et donc un seul modèle systémique pour le représenter. C'est ce système naturel (SN) qui pourrait effectivement être qualifié de système général de la nature ; mais puisque tout système est une création humaine, autant réserver le nom de Système Général à la discipline scientifique (Figure 19) qui, muni de ses 3 sous-systèmes composants (SP, SI, SO), systémise l'objet réel à étudier pour le comprendre, le représenter et le modéliser afin d'en avoir la connaissance et la maîtrise. C'est en cela que nous restons conforme au schéma de Pouvreau (2013, p. 142) qui nous dit « la fonction directe du système général concerne la construction de l'objet à modéliser alors que celle de la théorie du système général » concerne la modélisation à proprement parler ». La discipline concernée, en l'occurrence la pédologie hydrostructurale, utilise son propre référentiel de description systémique (trois axes gradués) pour guider la systémisation de l'objet naturel à décrire, définir ses variables descriptives d'organisation et de fonctionnement, et le modéliser comme nous l'avons expliqué en 3.2 et 3.3.

Par conséquent, le « *système général* » placé au-dessus de « *l'objet modèle systémique* » [3] (Figure 23) est pour nous le SG de la pédologie hydrostructurale tel que nous l'avons défini en 4.4 et représenté à la Figure (19). Son système d'information est bien *en relation d'isomorphie* avec « l'objet modèle systémique », en l'occurrence la carte des sols munie de ses pédons représentatifs modélisables par Kamel®; ce système d'information est ce que l'on a appelé le SIRS-Sols, spécifique du SG de la pédologie hydrostructural.

Pour être complet dans notre comparaison du schéma de Pouvreau (Figure 23) avec notre méthodologie d'élaboration du SIRS-Sols, nous ferons remarquer que les « *objets-modèles systémiques* » d'objets déjà étudiés (en haut à gauche du schéma), qui sont en relation isomorphe avec le SG, sont des SIRS-sols établis selon la même méthodologie systémique en diverses régions de la terre ; ils se juxtaposent en toute compatibilité d'échelle, de frontières et de modèle de représentation. Cette extension du SIRS-Sols à toutes la surface terrestre fait de celui-ci l'image virtuelle du milieu physique, défini et présenté en tout points de l'espace avec ses états d'équilibre thermodynamique et hydro-structural, et dans lequel pourront être modélisés tous les processus physico-chimiques et biologiques du sol causés par les organismes (actifs) vivants. Les disciplines scientifiques concernées sont, comme toutes disciplines d'acquisition de la connaissance sur un objet naturel spécifique, à l'image

isomorphe du SG composé de ses trois sous-systèmes SO, SI et SP ; et c'est leur SI spécifique, correspondant à leur objet d'étude, qui pourra être mis en relation de couplage thermodynamique systémique (entre sous-systèmes de même niveau hiérarchique) avec le SIRS-Sol. La modélisation de ces couplages de la vie biologique avec le sol se fait nécessairement au niveau de la case « *modélisation de l'objet modèle systémique* » représentée sur le schéma, c'est-à-dire qu'ils doivent être prévus et pris en charge par le modèle Kamel[®].

Théorie du Système général des disciplines agro-environnementales

Il est remarquable que le schéma de principe de la systémologie théorique appliquée dressé par Pouvreau (Figure 23) soit aussi complet et en total accord avec ce que nous avons effectivement réalisé et théorisé en termes de cartographie, caractérisation et modélisation agronomique du sol dans l'approche systémique depuis une quinzaine d'années (SIRS-Sols du périmètre irrigué de Borj Tull dans la Basse Vallée de la Majerda en 2001 et le SIRS-Sols de la Martinique en 2005, Braudeau et Mohtar, 2009, Belhouchette et al. 2008, Salahat et al., 2012).

Notre apport à la théorie du système général est principalement les trois concepts que nous avons mis en place pour opérer la systémisation de l'objet d'étude : i) la définition physique de système naturel (Système Opérant du SG) qui le différencie de l'organisation naturelle dont il est un extrait représentatif; le système naturel est un système thermodynamique clos sur sa structure, en accord avec la notion de SREV. ii) Le concept de « référentiel de description systémique » aux trois axes gradués pour transformer l'organisation interne du système naturel en système organisé; et iii) Le concept de Système Général comme étant le système humain d'une discipline scientifique organisé à l'image du système évolué n° 9 de Le Moigne (1994) et dont l'objet d'étude est le milieu naturel. Nous récapitulons ces trois points ci-dessous :

i) **Le système naturel** : La systémisation de l'objet naturel et de son organisation interne nous a conduit à la définition d'un système organisé qui a la propriété d'être un *système thermodynamique* clos sur la structure (phase solide) de l'organisation qu'il représente mais qui reste ouvert aux flux de matières mobiles par rapport à cette structure. Ses variables descriptives procèdent toutes du concept de SREV et sont dites systémiques. Les échanges

entre systèmes d'espace, chaleur, eau, éléments nutritifs, sont alors régis par les lois de la thermodynamique.

ii) **Le référentiel systémique** : Nous l'avons définie comme étant l'approche intellectuelle qui permet de décrire un objet naturel (organisé) en tant que système organisé, concrètement délimité et positionné dans l'espace, dans un espace de description triaxial dont les axes, gradués, représentent, respectivement :

Axe I, la structure des organisations et leur morphologie d'assemblage aux différentes échelles hydro-fonctionnelles (occupation spatiale des organisations, niveaux d'échelle)

Axe II, l'évolution des organisations définies sur l'axe I, leur genèse et leur fin (stades d'évolution)

Axe III, l'activité interne et externe des organisations définies sur l'axe I, à un stade d'évolution donné défini sur l'axe II (simulations en fonction du temps commun t).

La description sur les 3 axes convient aux deux types d'objets naturels que nous devons distinguer: l'organisme vivant et le milieu physique dans lequel cet organisme vit et se développe. Chacun d'eux doit être décrit comme système organisé dans ce même espace de description à 3 axes. Cela assure leur compatibilité relationnelle en termes d'occupation de l'espace et d'équilibre thermodynamique des activités.

iii) **Le Système Général** modèle d'une discipline scientifique: Nous avons montré comment la relation de l'homme à son objet d'étude était parfaitement représentée par le schéma du SG de Le Moigne (Figure 4) adapté aux sciences agroenvironnementales (Figures 17 et 19), au point que toute discipline scientifique du milieu naturel peut être considérée comme un système construit par l'homme en isomorphie du SG. Le référentiel triaxial de description systémique que nous avons établi pour décrire le SO du SG est l'outil méthodologique de la discipline qui lui permet d'ériger son système d'information (SI) en conformité avec le paradigme systémique. L'objectif de la discipline, une fois celle-ci définie isomorphe au SG, est de croître en science, c'est-à-dire en connaissances sur l'objet (SO), et de formaliser cette connaissance de façon à l'inscrire dans le SI, image systémique et virtuelle du SO. Vu la diversité des situations et des échelles d'observation cette croissance en science ne peut qu'augmenter tout en restant dans un même paradigme, le paradigme systémique, qui est comme on l'a vu un paradigme unitaire, non limitant, où les organismes vivants et le milieu

environnemental dans lequel ils vivent sont représentés par des systèmes en relation d'équilibre thermodynamique et hydrostructural.

La théorie du Système Général est donc pour nous la théorie de la relation de l'homme à la nature, objet d'étude, d'exploitation ou encore de management, rejoignant en cela le projet ambitieux de Bertalanffy d'élaborer une théorie générale des systèmes que Pouvreau (2013) comprend et décrit comme une science générale de l'interprétation systémique du " réel ". La reprise des concepts de Le Moigne (1994) de Système Général et de triangulation systémique mais que nous avons modifiés pour les replacer dans le paradigme cartésien de non mélange entre ce qui appartient au divin (organisation naturelle) et à l'humain (système organisé) nous a amenés la notion de système thermodynamique du milieu naturel que nous présenterons ci-dessous; il représente un saut qualitatif dans le paradigme de l'approche systémique en unifiant l'approche systémique à la thermodynamique du milieu naturel.

Thermodynamique systémique

A toutes les échelles du milieu agro-environnemental, la fonctionnalité des systèmes naturels est envisagée par rapport à l'eau. Les niveaux d'organisation sélectionnés lors de la systémisation du système objet 1 au système source 2 sont toujours hydro-fonctionnels (axe III) ce qui fait que la relation de 1 à 2 est toujours homomorphique (respect des échelles emboîtées). Les équilibres du milieu tri-phasique sol-eau-air, au niveau d'organisation de la pédostructure, sont des équilibres hydrostructuraux, fonctions de la teneur en eau. Ils sont dans leur totalité représentés par la courbe de retrait et la courbe de rétention de la pédostructure du milieu sol. Ces deux courbes forment les deux caractéristiques hydro-fonctionnelles de la structure du sol.

La définition systémique de la pédostructure (Braudeau et al. 2004), c'est-à-dire la définition de la pédostructure en tant que système organisé naturel et, par suite, thermodynamique, a représenté une avancée majeure en physique de l'eau du sol : elle a permis la formulation thermodynamique exacte des équations de la courbe de retrait et de rétention de l'eau du sol, réputées non connaissables à cause de la complexité du milieu sol. Ces équations reposent sur une hypothèse fondamentale en thermodynamique de l'eau du sol qui a été totalement validée par l'expérience (Braudeau et al. 2014a,b): à savoir que les énergies libres de Gibbs des phases aqueuses de la pédostructure: $\bar{G}_{wmi} = W_{mi}\mu_{mi}$ et $\bar{G}_{wma} = W_{ma}\mu_{ma}$ (en J/kg sol) de

l'équation (2) *sont constantes avec la variation de teneur en eau*. Ce qui entraîne une relation très simple entre les teneurs en eau micro et macro avec leur potentiel respectif :

$$\mu_{wmi} = \bar{G}_{wmi}/W_{mi} \text{ et } \mu_{wma} = \bar{G}_{wma}/W_{ma} \quad (22)$$

qui, associée à l'équation (3) plus haut, a donné l'équation exacte de la courbe de rétention de l'eau : $h(W) = h_{mi}(W_{mi}) = h_{ma}(W_{ma})$ (Cf. section 3.3.2)

Remarquons que la relation $\mu_w = \bar{G}_w/W$ n'est pas valide car les potentiels ne peuvent pas être moyennés : $\mu_w = \mu_{wma}$ dans la phase aqueuse macro et $\mu_w = \mu_{wmi}$ dans la phase aqueuse micro. L'équation exacte de $h(W)$ ne pouvait *jamais être trouvée tant que l'on ignorait l'existence des deux types d'eau interne et externe aux agrégats primaires* : W_{mi} et W_{ma} ; c'est-à-dire tant que l'on ne prenait pas compte de l'organisation hiérarchisée du milieu sol. Ces deux types d'eau doivent nécessairement apparaître dans l'équation différentielle totale exacte de l'énergie libre de Gibbs à la place du terme habituel (μdW):

$$d\bar{G}_w = -\bar{S}_w dT + \bar{V}_w dP + \mu_{mi} dW_{mi} + \mu_{ma} dW_{ma} \quad (23)$$

Le fait que l'on trouve \bar{G}_{wmi} et \bar{G}_{wma} constants malgré le changement de teneur en eau est dû à ce que la distribution des charges de surface de l'argile dans les peds primaires (micro) et à leur surface (macro) reste la même, indépendamment de la teneur en eau (Braudeau et al., 2014a). Ces charges qui développent un champ de potentiel dans la phase liquide enrobant la phase solide sont directement responsables de la rétention h de l'eau par le sol. Cette pression de rétention correspond exactement à ce que l'on a appelé en science du sol le « potentiel matriciel, ψ_m » sans avoir pu en donner l'explication physique.

La constance des énergies libres des phases micro et macro (\bar{G}_{wmi} et \bar{G}_{wma}) de la pédostructure avec le changement de teneur en eau, entraîne une écriture particulière des équations fondamentales de la thermodynamique relatives à l'eau pédostructurale:

Tout d'abord, \bar{G}_w étant égal à la somme de \bar{G}_{wmi} et \bar{G}_{wma} , est constant et la différentielle totale de l'énergie libre de Gibbs de l'eau pédostructurale, \bar{G}_w , sera toujours égale à 0, *quelle que soit la teneur en eau*.

$$d\bar{G}_w = -\bar{S}_w dT + \bar{V}_w dP + \mu_{mi} dW_{mi} + \mu_{ma} dW_{ma} = 0 \quad (25)$$

D'autre part, la dérivée de \bar{G}_w sous sa forme eulérienne donne :

$$d\bar{G}_w = d\bar{G}_{wmi} + d\bar{G}_{wma} = d(\mu_{mi}W_{mi}) + d(\mu_{ma}W_{ma}) = 0 \quad (26)$$

$$\mu_{mi}dW_{mi} + \mu_{ma}dW_{ma} = -(W_{mi}d\mu_{mi} + W_{ma}d\mu_{ma}) \quad (27)$$

Ce qui, en réécrivant l'équation (25) d'après (27), conduit à l'équation de Gibbs Duhem pour la phase aqueuse de la pédostructure :

$$\bar{S}_w dT - \bar{V}_w dP + W_{mi} d\mu_{mi} + W_{ma} d\mu_{ma} = 0 \quad (28)$$

Enfin, sachant que l'énergie interne de l'eau pédostructurale s'écrit :

$$\bar{U}_w = T\bar{S}_w - P\bar{V}_w + \bar{G}_w \quad (29)$$

sa forme dérivée est :

$$d\bar{U}_w = Td\bar{S}_w + \bar{S}_w dT - Pd\bar{V}_w - \bar{V}_w dP \quad (30)$$

et en ajoutant les équations (25) et (30) termes à termes, on obtient la formulation classique de la forme différentielle de l'énergie interne :

$$d\bar{U}_w = Td\bar{S}_w - Pd\bar{V}_w + \mu_{mi}dW_{mi} + \mu_{ma}dW_{ma} \quad (31)$$

à la différence près que le terme $\mu_w dW$ habituel est remplacé, nécessairement, par les deux termes relatifs aux 2 phases aqueuses micro et macro de la pédostructure, c'est-à-dire interne et externe aux agrégats primaires.

En conclusion de cette sous-section, nous pouvons dire que c'est la première fois que l'on dispose d'une terminologie et une formulation thermodynamique et systémique exacte de l'ambiance pédoclimatique en un point du sol. On dispose donc exhaustivement, par l'intermédiaire du modèle Kamel[®], de toutes les variables d'état du milieu sol, localement au niveau d'échelle des processus, qui entrent dans les relations de couplage avec les organismes biologiques, lesquels sont en relation d'échange en « équilibre de flux » d'eau, d'air, de chaleur et d'espace avec le sol.

Rappelons que la thermodynamique est dite systémique quand son lot de variables descriptives est exhaustif et défini par référence à l'organisation interne de l'objet. Les variables comme la densité, la pression partielle ne sont pas systémiques. Il est facile de montrer que le paradoxe de Gibbs n'existe pas si au lieu de parler de pression partielle on parlait plutôt de volume partiel molaire V/N , le volume occupé par une mole dans un ensemble de N moles occupant un volume V bien défini (fonction de la température et la pression). L'analogie du « système clos sur sa structure » (SREV) pour les phases liquides et gazeuses est le volume V variable enveloppant un nombre fixe de molécules N . V/N est une variable systémique, comme toute autre variable *extensive* rapportée à N , alors que N/V ou P/N ne le sont pas. En phase gazeuse par exemple, si V_i et N_i sont les volumes et nombres de molécules du gaz i , on a pour les gaz parfait la relation simple suivante : $V_i/N_i = \sum_i V_i / \sum_i N_i = V/N$ qui a une signification physique contrairement à P_i/N_i . Nous avons montré dans Braudeau et al. (2014b) que c'est par l'utilisation exclusive de ces variables systémiques que l'on a pu établir les équations thermodynamiques de la rétention de l'eau par le sol et montrer l'équivalence de deux méthodes de mesure reposant sur des principes physiques très différents. La définition systémique des variables extensives de la thermodynamique, la présence des variables teneur en eau micro et macro dans les équations d'équilibre thermodynamique de la pédostructure (tous les sols sont concernés), la généralité des équations (10) à (16), tout cela peut être vu comme une contribution nouvelle à la théorie des systèmes, ou mieux, « au projet de *systémologie générale* tel qu'il fut formulé et développé par Bertalanffy, Rapoport, Boulding et ceux des systémiciens qu'ils inspirèrent – Bertalanffy ayant le premier parlé en 1965 de *systémologie générale humaniste* » (Pouvreau, 2013, p. 911).

En effet, par cette thermodynamique systémique, nous répondons aux objectifs de la théorie des systèmes ouverts, exprimés dès les années 1930 par Bertalanffy, à savoir (cité par Pouvreau, 2013, p. 643) « la nécessité de concevoir l'organisme comme un système ouvert et de trouver des formulations permettant de caractériser ses « équilibres de flux », « d'une manière analogue à celle dont les expressions connues de la chimie physique définissent les véritables équilibres chimiques dans les systèmes fermés ».

Notre définition de système naturel qui est décrit comme un SREV de l'organisation dont il est un « morceau », est complètement compatible avec l'idée de Bertalanffy voulant

considérer « l'organisme comme un système physique » ouvert en équilibre de flux avec son environnement. Ce qu'on ne voyait pas à l'époque c'était la distinction à faire entre l'objet actif, l'organisme vivant, et le milieu physique naturel dans lequel cet organisme vit ; c'est ce milieu qui est, lui plus visiblement que l'organisme, « ordonné en niveaux d'organisation successifs, à concevoir comme ordre hiérarchique de systèmes ouverts en équilibres de flux ».

6.2 Le nouveau challenge de la modélisation agroenvironnementale

L'autre implication importante dans les sciences agroenvironnementales est l'émergence incontournable de la pédologie hydrostructurale. Le challenge aujourd'hui rendu possible par l'émergence de la pédologie hydrostructurale, est de modéliser l'activité des organismes vivants, chacun à la place qu'il occupe dans l'organisation hiérarchisée du milieu physique naturel ; l'ensemble formant ce qu'on appelle la « critical zone » (Figure 2). La physique systémique des organisations qui décrit les échanges matériels et les équilibres énergétiques qui les régissent, entre les organismes et leur milieu d'activité, devient de ce fait le langage interdisciplinaire de ce challenge. C'est dans ce même paradigme physique systémique que l'on pourra expérimenter et modéliser le couplage des systèmes biologiques avec le système sol soumis aux variations climatiques externes.

Nous avons vu à la Figure 20 comment cette nouvelle discipline de la science du sol, avec sa physique systémique, jouxte l'hydropédologie qui est non systémique ; et comment aussi avec ses outils d'analyse et concepts spécifiques (caractérisation hydrostructurale, modèle Kamel[®] et le SIRS-Sols), elle vient occuper une place dans les sciences agroenvironnementales aujourd'hui pratiquement vacante. L'hydropédologie, incapable de modéliser la structure du sol et son interaction avec l'eau, ne peut investir les échelles de travail de sa consœur, lesquelles se trouvent aux niveaux fonctionnels des processus *dans* le sol. Inversement, sans les informations locales qui lui sont nécessaires concernant le pédon représentatif et les unités cartographiques, la pédologie hydrostructurale ne peut investir le domaine de modélisation macroscopique (échelles globales, hors échelles des processus) des grands modèles environnementaux utilisés aujourd'hui (SWAT model, SHETRAN hydrological model...).

Or ces deux types de modélisation sont aussi nécessaires l'un que l'autre dans les logiciels d'aide à la décision ou de gestion des ressources naturelles pour un développement agricole

adapté autant à l'échelle locale que nationale ou internationale. Braudeau et Mohtar (2014b) ont montré qu'il était possible d'établir une correspondance et un lien méthodologique entre les deux types de modélisation pratiqués par les deux disciplines de façon à relier la description macroscopique ou globale (mono-échelle, statistique) d'une zone d'étude à la description systémique, multi-échelle et mécaniste, du milieu physique interne à cette zone.

Cela pourrait bien constituer le futur challenge de la modélisation agro-environnementale. En effet, le cycle de modélisation utilisé aujourd'hui pour le développement agricole d'un pays ou d'une région est uniquement le cycle de la modélisation globale ou macroscopique figuré en noir sur le schéma de la Figure 24 ; ce cycle repose entièrement sur une vision non systémique du milieu naturel (Braudeau et Mohtar, 2014b). Au contraire, le cycle tracé en rouge sur le schéma, qui est celui de la modélisation physique et systémique du milieu naturel que l'on a développé ici, n'a pas pu être mis en place puisqu'il fallait un changement de paradigme qui n'était pas encore reconnu.

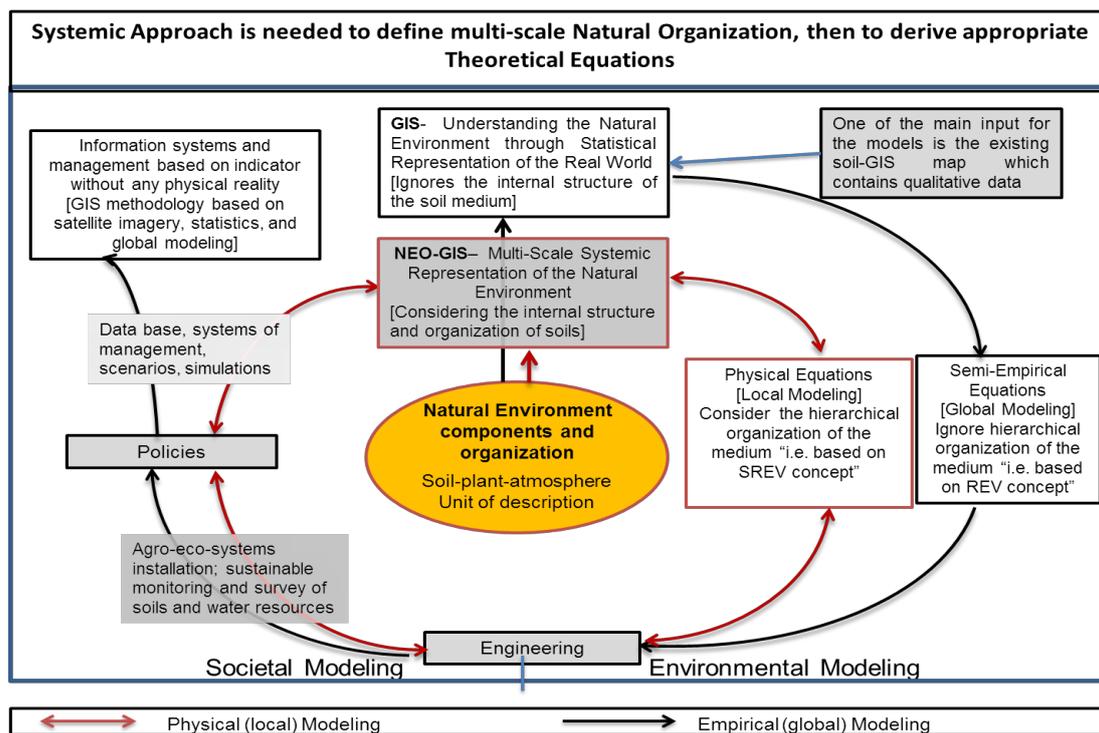


Figure 24. Le double cycle local et global de la modélisation du milieu naturel (écosystèmes) et du milieu sociétal (agrosystèmes) (d'après Braudeau et Mohtar, 2014b)

La première étape du nouveau challenge consistera donc en l'installation du cycle de modélisation physique et systémique du milieu naturel, en rouge sur la Figure 24 ; lequel cycle est mis en place et pratiqué par la pédologie hydrostructurale. Contrairement au

premier, ce cycle est représenté par des flèches à double sens pour signifier qu'il est à l'échelle locale des processus et mécaniste, c'est-à-dire relié aux causes ; toutes les étapes sont explicatives et il est physiquement possible d'établir une comparaison exacte des propriétés hydro-fonctionnelles du milieu environnemental avant et après la transformation qu'il subit sous l'action humaine (installation de systèmes de production agricoles ou de gestion du milieu, partie gauche de la Figure 24).

Ce challenge est donc fortement lié au développement de la pédologie hydrostructurale dont les objectifs scientifiques coïncident avec la construction du cycle de modélisation physique et systémique de l'organisation du milieu naturel et sociétal à mettre en œuvre. Ce cycle physique (ou local, en rouge) doit être mis en relation de correspondance avec le cycle de la modélisation statistique (ou global, en noir) pratiquée par les hydro-pédologues (côté droit du graphique) et par les agro-pédologues (côté gauche) pour le suivi des ressources environnementales et la mise en place des politiques agricoles. Il aboutit (Figure 24) à l'élaboration du NEO-GIS (Natural Environment Organization-GIS) plateforme d'information pour la modélisation systémique de l'unité de sol et son pédon représentatif.

7. Conclusion

Une méthodologie unitaire universelle de caractérisation et modélisation systémique d'une organisation naturelle, le sol, a été élaborée ici en développant les notions de Système Général et de Référentiel de Description Systémique d'un objet organisé. Ces notions ainsi que la physique du milieu naturel qui en est issue (thermodynamique et hydrodynamique du milieu sol) donnent lieu à l'émergence d'une nouvelle discipline en science du sol appelée Pédologie hydrostructurale. Elle occupe un créneau central parmi les disciplines agro-environnementales dont l'objet d'étude est dépendant du « milieu sol » et qui ont besoin pour leurs investigations, de la caractérisation et modélisation thermodynamiques et hydrostructurales de ce milieu en fonction de la teneur en eau.

L'eau est l'élément primordial de ces systèmes naturels, non seulement comme constituant mobile dans leur structure mais aussi comme principale matière d'échange entre eux. La physique thermodynamique et hydrostructurale de l'eau du sol développée ici est seule à permettre d'établir les couplages physiques (mécanistes) des processus biologiques avec le régime pédoclimatique et hydrostructural du sol que modélise le modèle Kamel[®]. Celui-ci

peut être considéré comme représentant complètement le paradigme systémique de la pédologie hydrostructurale dont l'élément clef est la pédostructure, l'outil de caractérisation et modélisation : le modèle Kamel et le produit à réaliser : le SIRS-Sols.

Une nouvelle stratégie de modélisation des agro ou écosystèmes est dorénavant à mettre en œuvre. En effet les disciplines concernées devront nécessairement prendre appui sur cette description et modélisation du milieu naturel par la pédologie hydrostructurale pour pouvoir réaliser le couplage de leurs modèles biologiques, agronomiques, géophysiques etc., avec ce milieu naturel organisé qu'est le sol. Le modèle Kamel[®], qui modélise le fonctionnement hydrostructural du pédon représentatif de l'unité de sol, est par conséquent au cœur de tous ces couplages.

Références

- Ahujat, L.R., L. Ma, and D. Timlin. (2006). Trans-disciplinary soil Physics research critical to synthesis and modeling of agriculture systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:311-326.
- Angulo-Jamarillo, R., Vandervaere, J.P., Roulier, S., Thony, J.L., Gaudet, J.P., Vauclin, M., (2000). Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. *Soil Tillage Research* 55, 1-29. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00098-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00098-2)
- Assi, A.T, Accola, J., Hovhannissian, G., Mohtar, R.H. and Braudeau, E.F. (2014). Physics of the soil medium organization part2: pedostructure characterization through measurement and modeling of the soil moisture characteristic curves. *Front. Environ. Sci.* 2:5. doi:10.3389/fenvs.2014.00005
- Balser, T.C., K.D. McMahon, D. Bart, D. Bronson, D.R. Coyle, N. Craig, M.L. Flores-Manguel, K. Forshay, S.E. Jones, A.E. Kent, and A.L. Shade. (2006). Bridging the gap between micro- and macro-scale perspectives on the role of microbial communities in global change ecology. *Plant Soil.* 289:59-70.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of fluid in porous media*. American Elsevier, New York. 764 pp.

- Bellier, G., Braudeau, E. (2013). Device for measurement coupled with water parameters of soil. WO 2013/004927 A1. World Intellectual Property Organization, WIPO.
- Bouma, J., Stoorvogel, J., van Alphen, B.J., and Booltink, H.W.G. (1999). Precision Agriculture, and the Changing Paradigm of Agricultural Research. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1763–1768.
- Borin P. (2002), SIG concepts, outils et données, Hermès Science Publications, p.96.
- Braudeau, E. (1987). Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Science du Sol*, 25, 85–93.
- Braudeau, E. (1988). Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol base sur l'étude de la courbe de retrait. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 307, 1933–1936.
- Braudeau, E., Costantini, J., Bellier, G., Colleuille, H. (1999). New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. *Soil Science Society of America Journal* 63, 525-535. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300030015x>
- Braudeau, E., Zidi, C., Loukil, A., Derouiche, C., Decluseau, D., Hachicha, M., and Mtimet, A. (2001). Un système d'information pédologique, le SIRS-Sols du périmètre irrigué de Cébala-Borj-Touil. (Basse Vallée de la Majerda). *Bulletin Sols de Tunisie*, numéro spécial 2001. Direction des sols (Ed.), Tunis, Tunisie. 137 p. ISSN 0330-2059. (http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010027518.pdf)
- Braudeau, E., Frangi, J.P., and Mothar, R.H. (2004). Characterizing non-rigid dual porosity structured soil medium using its shrinkage curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 359-370, doi:10.2136/sssaj2004.0359.
- Braudeau, E., Sene, and M., Mohtar, R.H., (2005). Hydrostructural characteristics of two African tropical soils. *European Journal of Soil Science* 56, 375–388. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00679.x>

- Braudeau, E. (2006). Kamel[®] Simile version. Agence pour la Protection des Programmes, Paris, IDDN.FR.001.390019.000.S.P.2006.000.31500.
- Braudeau, E., and Mohtar, R. H., (2006). Modeling the Swelling Curve for Packed Soil Aggregates Using the Pedostructure Concept. *Soil Science Society of America Journal* 70, 494–502. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0211>
- Braudeau, E., and Mohtar, R.H. (2009). Modeling the soil system: Bridging the gap between pedology and soil-water physics. *Global Planet. Change J.*, **67**: 51-61, doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.12.002.
- Braudeau, E., Mohtar, R. H., El Ghezal, N., Crayol, M., Salahat, M., Martin, P.,(2009). A multi-scale "soil water structure" model based on the pedostructure concept. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 6, 1111-1163. <http://dx.doi.org/10.5194/hessd-6-1111-2009>
- Braudeau, E., Assi, A.T., Boukcim, H., and Mohtar, R.H. (2014). Physics of the soil medium organization part1: thermodynamic formulation of the pedostructure water retention and shrinkage curves. *Front. Environ. Sci.* 2:4. doi: 10.3389/fenvs.2014.00004
- Braudeau, E., Mohtar, R.H. (2014a). A framework for soil-water modeling using the pedostructure and structural representative elementary volume (SREV) concepts. *Front. Environ. Sci.* **2**: 24. doi:10.3389/fenvs.2014.00024.
- Braudeau, E., Mohtar R.H. (2014b), Integrative environmental modeling. *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering*, Second Edition, doi:10.1081/E-EAFE2-120049111
- Brewer, R. (1964). Fabric and mineral analysis of soils, John Wiley and Sons (Eds), New York, pp. 482.
- CPCS (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols). (1967). Classification des sols. Grignon, France: -Laboratoire de Géologie et de Pédologie, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie. 87p (http://www.afes.fr/afes/docs/CPCS_1967.pdf)

- Derouiche, C., Loukil, A., Decluseau, D., Braudeau, E. (2001). Le SIRS-SOLS du périmètre irrigué de Cébala, (51-66). In *Sols de Tunisie, Bulletin de la Direction des Sols*, Numéro spécial 2001, Direction des Sols (Ed.), Tunis, Tunisie. 137 p. ISSN 0330-2059. (http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010027518.pdf)
- Donatelli, M., Russell, G., Rizzoli, A.E., Acutis, M., Adam, M., Athanasiadis, I.N., Balderacchi, M., Bechini, L., Belhouchette, H. (2010). A Component-Based Framework for Simulating Agricultural Production and Externalities. In: Brouwer, F., Van Ittersum, M.K. (Eds.), *Environmental and agricultural modelling: integrated approaches for policy impact assessment*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. pp. 581 63-108. E.C., (Eds), 2010.
- Duchaufour, P., Souchier B. (1977). *Pédogenèse Et Classification*. Masson (Ed.), Paris.
- Le Moigne, J. L. (1994). *La théorie du système général, Théorie de la modélisation*. (4ième édition). Collection des classiques du réseau intelligence de la complexité, www.mcxapc.org, <http://www.mcxapc.org/inserts/ouvrages/0609tsgtm.pdf>
- Leong, E.C., and Rahardjo, H. (1997). Review of soil water characteristic curve equations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123:12, 1106-1117.
- Lin H. (2003). *Hydropedology: Bridging Disciplines, Scales, and Data*. *Vadoze Zone J.* 2, 1-11.
- Lin, H., H. Bouma, Y. Pachepsky, A. Western, J. Thompson, R. van Genuchten, H.-J. Vogel, and A. Lilly. (2006). *Hydropedology: Synergistic integration of pedology and hydrology*, *Water Resour. Res.* 42, W05301, doi:10.1029/2005WR004085.
- Lin, H.(2012). *Hydropedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology*. 1st edition, Elsevier, ISBN 9780123869876.
- Pouvreau, D. (2013). *Une histoire de la "systémologie générale" de Ludwig von Bertalanffy - Généalogie, genèse, actualisation et postérité d'un projet herméneutique*. Thèse Spécialité « Histoire des Sciences », Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), Paris. 1139 pages. (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00804157>)

- Soil Survey Division Staff. (1993). Chapitre I in *Soil survey manual*. *Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18*. (<http://soils.usda.gov/technical/manual/>)
- Saxton, K. E., and Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, 1569–1578.
- Schindler, U., Durner, W., Von Unold, G., Müller, L., (2010). Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: extending the measurement range, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74(4), 1071-1083.
- Singh, J., Mohtar, R., Braudeau, E., Heathmen, G., Jesiek, J., Singh, D., 2012. Field evaluation of the pedostructure-based model (Kamel[®]). *Comput. Electron. Agric.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.001>
- Sposito, G., 1981. *The thermodynamics of soil solutions*. Oxford University Press, New York, pp.187-208.