

Avant-propos

Cet ouvrage a pour but de définir le plus complètement possible la matière et les contours de cette nouvelle discipline, la pédologie hydrostructurale, telle qu'elle est maintenant théorisée. Nous mettrons en évidence les concepts qui la sous-tendent, ses buts et le rôle qu'elle doit jouer au sein des sciences agro-environnementales.

Il se divise en deux parties :

- une partie théorique où est présentée l'approche systémique appliquée à la question du sol, montrant comment celle-ci conduit à la formulation thermodynamique de l'eau dans le milieu organisé du sol et à la modélisation systémique du couple eau-sol dans les organisations naturelles ou aménagées ;
- une partie méthodologique consacrée à la détermination des caractéristiques hydrostructurales de la *pédostructure*¹, paramètres caractéristiques des équations d'état d'équilibre et de fonctionnement hydrostructural du sol.

1. Si les peds primaires constituent le premier niveau d'agrégation des particules fines du sol, l'assemblage de ces peds primaires avec les autres grains du squelette constitue la *pédostructure* ; c'est l'élément moteur du sol. Elle constitue la majeure partie d'un horizon de sol (couche de sol à structure homogène), répartie avec les mêmes propriétés hydrostructurales et partageant l'espace avec les autres sous-systèmes présents dans l'horizon : racines, macroporosité biologique, cailloux, etc. Son taux de présence dans l'horizon de sol et ses propriétés hydrostructurales dues aux argiles minéralogiques qui la composent, déterminent en premier lieu le fonctionnement hydrique et les qualités agronomiques de l'horizon de sol dans lequel elle se trouve.

Nous donnons ci-dessous un aperçu des points-clés de la naissance de cette discipline jusqu'à l'élaboration d'une théorie physique de l'eau du sol ; on pourrait en effet s'étonner et se demander pourquoi seulement aujourd'hui, en 2015, cette théorie est-elle présentée comme nouvelle et complète ?

Prise de conscience de la nécessité d'un changement de paradigme pour la description quantitative des interactions eau-structure du sol

Ce n'est que suite à la possibilité de mesurer la courbe de retrait en continu et avec une grande précision² que les propriétés hydrostructurales des organisations du sol sont devenues accessibles à l'étude expérimentale de laboratoire et à leur modélisation physique ; en particulier la *pédostructure* reconnue comme le premier niveau hydrofonctionnel de base d'un horizon de sol. La prise en considération de la courbe de retrait comme témoin de l'interaction entre l'eau et la structure du sol nous a amenés très logiquement à concevoir un nouveau paradigme de la caractérisation du sol qui consistait en l'adoption d'un autre système de variables descriptives du sol que celui utilisé habituellement, capable de prendre l'organisation hiérarchisée du milieu sol en considération. Notons qu'en étant parmi les seuls à posséder l'appareil de mesure de cette courbe (rétractomètre), nous étions pratiquement les seuls à travailler sur la courbe de retrait comme produit de l'interaction eau-structure du sol ; et donc à entrevoir la nécessité du changement de paradigme. Un nouveau paradigme de la caractérisation et modélisation hydrostructurale du sol a finalement été théorisé, en lien étroit avec l'approche systémique qui de ce fait a dû être revue et précisée dans ses principes pour être appliquée à la pédologie et servir à la définition des systèmes organisés. Tout cela est exposé dans les sections 3.1 et 3.2 de l'ouvrage.

Formalisation des équations dans le nouveau paradigme et finalisation de la théorie de la modélisation physique et systémique du couple eau-sol

Cependant, la mesure de la courbe de retrait seule, c'est-à-dire sans l'autre courbe caractéristique d'humidité du sol : la courbe de rétention, ne suffisait

2. Braudeau E., « Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, n° 307, p. 1933-1936, 1988.

pas pour conclure sur la validité des équations de la théorie sur l'interaction eau-sol qui se mettait en place dans le nouveau paradigme. Il manquait encore l'appareil de laboratoire **qui mesurerait simultanément et en continu les deux courbes caractéristiques d'humidité du sol** : la courbe de retrait et la courbe de rétention de l'eau du sol pour permettre de finaliser la théorie. Cet appareil, nommé TypoSoil[®], a été construit en 2012 par le laboratoire d'hydrophysique des sols de l'IRD de Bondy en collaboration avec la société Valorhiz. Il constitue le tout premier appareil du genre en science du sol pouvant effectuer simultanément la mesure en continu des deux courbes caractéristiques d'humidité du sol ; il a été testé au centre de recherche QEERI de la « Qatar Foundation » en 2013³. Son utilisation a effectivement permis d'établir la formulation thermodynamique exacte des équations d'état de la pédosstructure : la courbe de retrait et la courbe de rétention de l'eau (ou *matric potential curve*), écrites dans le nouveau paradigme systémique où la notion de système thermodynamique, clos sur la structure du sol, a également pu être établie. Ces avancées scientifiques majeures en thermodynamique de l'eau du sol sont explicitées dans les sections 3.2 et 3.3.

La pédosstructure et l'eau pédosstructurale, *green water* du sol : nouveaux objets d'étude et d'investigation des sciences agro-éco-environnementales

On peut dire de la pédologie hydrostructurale qu'elle intègre la pédologie classique – science descriptive des organisations du sol (internes au milieu sol) et de l'organisation horizontale des types de sol (couverture pédologique) – et la physique de l'eau du sol dans une même modélisation physique et systémique du *fonctionnement hydrique des organisations naturelles à leurs différents niveaux d'échelle hydrofonctionnels*.

L'eau est en effet omniprésente dans le milieu environnemental ; elle est le facteur premier de la formation des sols, de la mise en forme des paysages, de la mise en place de l'organisation hiérarchisée des unités hydrofonctionnelles (unités de relief, unités géomorphologiques, unités de sols, pédon, horizons, agrégats, peds primaires), de leurs activités et de leur maintien en équilibre. L'eau est ainsi présente dans tout l'écosystème : dans l'air au-dessus de la

3. Bellier G., Braudeau E., Device for measurement coupled with water parameters of soil, WO 2013/004927 A1, World Intellectual Property Organization, WIPO, 2013.

plante, dans la plante qui fait remonter l'eau du sol dans l'atmosphère et dans le sol qui reçoit l'eau de pluie dont une partie est stockée et réservée à la plante et dont l'autre s'infiltré en profondeur par gravité et alimente les nappes souterraines. Ces deux cycles d'eau n'ont pas la même fonction et doivent être distingués dans le sol qui est en fait le lieu d'échange naturel entre les deux types d'eau : *l'eau gravitaire* (pluie, irrigation) allant vers le bas et *l'eau « thermodynamique »* absorbée et retenue par les argiles du sol, que les plantes introduisent dans le cycle d'eau ascendant du système sol-plante-atmosphère (*critical zone*). Les agronomes ont donné le nom de *green water* à cette eau *thermodynamique* qui est stockée dans le sol et transite par la plante pour rejoindre l'atmosphère.

Savoir quantifier ces deux types d'eau et leur dynamique respective dans le sol a toujours été un challenge d'une très grande importance en agriculture car elle est reliée aux besoins en eau de la plante, aux conditions de vie de l'agro ou écosystème, à sa résilience en cas de changement climatique, etc. Or comme nous le montrons ici c'est seulement dans le nouveau paradigme de la modélisation et caractérisation hydrostructurale du sol, qui prend en compte la structure du sol et son organisation interne en agrégats, que ce challenge peut aboutir. Nous avons en effet été en mesure d'identifier cette « eau verte du sol » à l'eau de la *pédostructure* (ou *eau pédostructurale*) et d'en définir et déterminer les propriétés thermodynamiques et hydrostructurales en établissant les équations physiques correspondantes. Ceci a donné lieu à l'élaboration du modèle Kamel[®], le seul modèle sol-eau existant qui soit en mesure de prendre en compte la pédostructure et ses propriétés hydrostructurales, incluant par conséquent la dynamique de l'eau pédostructurale dans le système sol-plante-atmosphère.

Une prise de position radicale : l'organisation naturelle n'est connaissable qu'après sa transformation en système (organisé) dans l'approche systémique

Nous expliquons, dans notre texte, pourquoi la compréhension des mécanismes de l'activité du milieu naturel ou d'objets naturels comme les sols et leur modélisation physique, nécessite de prendre une position tranchée dès le départ sur la distinction entre organisation et système : « L'organisation est à Dieu ce que le système est à l'homme ». L'approche systémique a dès lors pour fonction de transformer l'organisation à étudier en système organisé mis à la disposition de l'homme pour la compréhension de son fonctionnement interne, la maîtrise de son activité externe, sa gestion, son exploitation, etc. Nous nous

sommes mis sur les traces de Bertalanffy et ses compagnons fondateurs de la théorie du système général (1932-1950), notamment en réadaptant les travaux d'un systémicien contemporain, J.-L. Le Moigne (1994) à la problématique de la modélisation physique de l'objet sol, fonctionnant avec l'eau. Réadaptation qui réinscrivait la théorie de la modélisation systémique dans la logique cartésienne en abandonnant « les quatre préceptes du nouveau discours de la méthode » que Le Moigne avait posés à la base de sa théorie en remplacement des quatre préceptes de Descartes qu'il réfutait « radicalement ».

La découverte de la formulation thermodynamique correcte de la courbe de rétention et, conséquemment, de celle de la courbe de retrait, ne pouvait avoir lieu sans l'adoption de l'approche systémique « cartésienne » et celle du nouveau concept posé dans cette approche : le SREV, *Structural Representative Elementary Volume*, concept de base du nouveau paradigme de la physique de l'eau dans le milieu organisé du sol. Le SREV vient en remplacement de ce qui est à la base du paradigme actuel de la physique de l'eau du sol : le REV, *Representative Elementary Volume*, correspondant à la physique des milieux poreux continus. Les deux paradigmes ont chacun un système propre de variables descriptives bien définies du milieu sol mais sont exclusifs l'un de l'autre ; c'est pourquoi il y a bien un changement de paradigme quand on fait l'hypothèse du SREV à la place du REV puisqu'on change radicalement de système de variables descriptives. Prenant l'hypothèse du SREV, on utilise l'ensemble de variables dites systémiques qui nous donne le droit d'écrire des équations décrivant des processus physiques et non pas seulement, comme aujourd'hui avec l'hypothèse du REV, des équations de bilans dont les variables sont normalisées ou moyennées et donc non systémiques.

La physique systémique de l'eau (gravitaire et thermodynamique) dans le milieu naturel constitue le langage transdisciplinaire de la physique du vivant dans les sciences agro-écoenvironnementales

L'approche systémique du milieu organisé du sol telle que nous l'avons redéfinie en posant le concept de SREV conduit logiquement à la définition de « système thermodynamique naturel », clos sur la phase solide constituant la structure de l'organisation qu'il représente et ouvert aux flux des autres phases (eau, air) qui se meuvent au travers. La nouvelle physique de l'eau du sol qui s'en dégage, physique systémique décrivant les états d'équilibres thermodynamiques et hydrostructuraux du sol à ses différentes échelles d'organisation

(ce que fait le modèle sol-eau Kamel[®]) est d'évidence le langage transdisciplinaire qui permet le couplage interdisciplinaire des modèles des autres disciplines sur la vie et l'activité de leur objet d'étude vivant dans ou en lien avec le sol, avec le modèle sol-eau (Kamel[®]) propre à la pédologie hydrostructurale. Le modèle Kamel[®] peut en effet être couplé avec tous les systèmes abiotiques ou biotiques reconnus dans les sciences environnementales, en utilisant les variables, équations paramètres de la physique systémique de l'eau dans le continuum sol-plante atmosphère.

Pour conclure

Nous dirons que le nouveau paradigme de modélisation systémique et caractérisation hydrostructurale du sol qui est décrit et proposé dans cet ouvrage, satisfait sans ambiguïté aux versets du Coran à propos de la terre au moment où elle reçoit de l'eau :

« Et parmi ses merveilles est que tu vois la terre humiliée et quand nous faisons descendre l'eau sur elle, elle bouge (ʿahetazzat) et se gonfle (rabat) ; celui qui lui redonne la vie est certes celui qui fera revivre les morts, il est omnipotent. » (Fussilat : 41, 39)

et encore :

« ... et tu vois la terre desséchée : lorsque nous faisons descendre l'eau sur elle, elle bouge et se gonfle et fait pousser toutes sortes de splendides couples (zaoji). » (Al Hajj, 22, 5)

« Et de toutes choses nous avons créé (deux éléments) de couple. Peut-être vous rappellerez-vous. » (Ad Dariyat, 51, 49) (An-Najm, 53,45) (Ar Ra'd, 13,4)

En effet, il permet la description distincte et quantitative des trois propriétés essentielles du sol : 1) le gonflement-retrait du sol avec l'humectation-desiccation ; 2) les dynamiques couplées de l'eau pédostructurale, « *green water* du sol » et de l'eau gravitaire au sein du sol et 3) l'équilibre thermodynamique et hydrostructural du couple d'eaux micro et macro qui constitue l'eau pédostructurale (eau interne et eau externe aux agrégats primaires de la pédostructure), ce qui est impossible lorsque le sol est considéré comme un milieu poreux rigide et inerte à l'eau.