



HAL
open science

8.6. Structuration du sol

Isabelle Cousin

► **To cite this version:**

| Isabelle Cousin. 8.6. Structuration du sol. 2017. hal-02789829

HAL Id: hal-02789829

<https://hal.inrae.fr/hal-02789829>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

8.6. Structuration du sol

Isabelle Cousin

8.6.1. Spécification biophysique du SE

8.6.1.1. Dénomination précise et nature du SE

Contexte, enjeu et définition

La structure du sol - organisation respective des éléments vides et pleins dans le sol - est un élément clé du fonctionnement des écosystèmes. Elle conditionne les capacités de stockage, de filtration et de rétention du sol, pour l'ensemble des éléments abiotiques qui y transitent (eau, particules physiques constitutives du sol, éléments fertilisants, éléments contaminants). Elle détermine également la pénétrabilité des racines et donc la constitution de la biomasse végétale, car elle contribue directement et indirectement à la germination, à l'émergence des plantules, puis à la croissance et au développement racinaire tout au long du cycle végétatif. La structure du sol est ainsi reconnue comme un indicateur écologique fondamental de l'état du sol (Schluter *et al.*, 2011; Faber and van Wensem, 2012), et contribue à la santé du sol et à la qualité du sol (Andrews *et al.*, 2004). Elle détermine également les caractéristiques du support physique de la vie animale du sol, en particulier pour la faune tellurique dont elle constitue l'habitat.

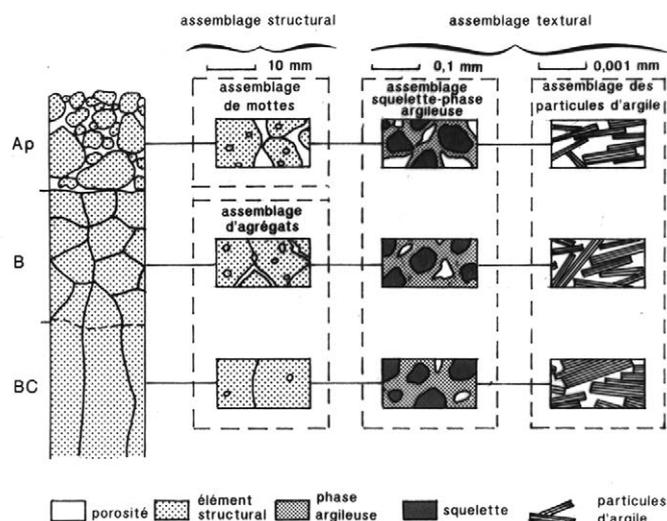
La **structure** du sol représente les arrangements, à toutes les échelles d'espace et tous les niveaux d'investigation, des constituants du sol (Dexter, 1988; Lin, 2003; Baize, 2013). Concrètement, à une échelle donnée, la structure représente l'organisation des éléments solides, liquides et gazeux discernables à cette échelle, sans que ces éléments soient pour autant homogènes dans leur constitution¹. De façon opérationnelle, on décline généralement cette définition à l'échelle de l'horizon de sol ; l'on définit ainsi le réseau poreux textural – qui résulte de l'assemblage des particules constitutives du sol telles que les sables, limons, argiles et composantes de la matière organique – et le réseau poreux structural, qui résulte de l'ensemble des contraintes appliquées sur le sol (Figure 8-6-1). La porosité texturale est en général inférieure à la centaine de microns, tandis que la porosité structurale est plus macroscopique, mais les deux réseaux poreux sont naturellement imbriqués l'un dans l'autre, et des pores d'une centaine de microns peuvent être, selon les cas, des pores structuraux ou des pores texturaux². Dans la suite de ce document, on considérera la structure du sol comme cet assemblage macroscopique à l'échelle de l'horizon de sol.

La structure du sol évolue en permanence sous l'effet de contraintes qui créent des vides ou qui les font disparaître. Ces contraintes sont d'origine climatique, anthropique, et biologique et leurs conséquences peuvent se faire sentir à très long terme (effet du climat ou de la mise en culture sur la pédogenèse), à moyen terme (fissuration saisonnière ou annuelle due à des alternances d'humectation/dessiccation par exemple ; perforation par la macrofaune ou croissance des racines), à très court terme (développement de croûtes de battance en quelques heures sous l'effet de pluies) ou de façon brutale et instantanée (tassement ou fragmentation de l'horizon de surface par les activités culturales) (Cousin, 2007).

¹ A une échelle inférieure, l'objet est caractérisé par sa texture.

² Des pores d'origine structurale peuvent également, suite au vieillissement de la structure ou à son tassement, se comporter comme des pores texturaux (Bruand et Cousin, 1994 ; Richard *et al.*, 2001).

Figure 8-6-1. Les différents niveaux d'organisation du sol. Concepts de porosité structurale et de porosité texturale (Bruand and Tessier, 1996).



La structure du sol contribue de manière essentielle à de nombreux SE, tels que, par exemple, les SE « S stockage et restitution de l'eau », « Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion », « Régulation du climat global » *via* l'action de séquestration de la matière organique (voir par exemple Lavelle *et al.* (2006), Cf. description de ces SE). Une structure très aérée, continue et connectée, par exemple, permet une bonne infiltration de l'eau dans le sol et contribue à la recharge en eau souterraine sous forme d'eau bleue, mais peut limiter le stockage d'eau dans le sol sous forme d'eau verte. L'évaluation de l'effet de la structure du sol sur l'ensemble des SE est ainsi délicate à appréhender de manière globale.

Définition d'un SE décrivant la structure du sol – Analyse de la littérature

La structure du sol est identifiée par de nombreux auteurs comme une composante essentielle de la qualité du sol (Karlen *et al.*, 1997; Arshad and Martin, 2002; Garrigues *et al.*, 2012; Virto *et al.*, 2015) ou de la santé du sol (Doran and Zeiss, 2000; Kibblewhite *et al.*, 2008; Rudisser *et al.*, 2015). Il est donc essentiel que l'écosystème soit composé d'un sol dont la structure « est de bonne qualité » et que l'ensemble des actions/rétroactions dans cet écosystème permette son maintien à long terme.

Les premiers écrits sur les SE en lien avec les sols définissent ainsi un SE « Structure du sol », qui, plus qu'un SE, correspond à l'état de la structure du sol à un instant donné (voir, par exemple, Arshad and Martin (2002)).

Le Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) mentionne, parmi les SE de support, un SE « Formation du sol » repris par de nombreux auteurs à sa suite (voir par exemple Lavelle *et al.* (2006)) et cité dans la classification CICES. Ce SE couvre *a priori* la dynamique de développement du sol sur de très longues échelles de temps et n'est pas en adéquation avec les définitions que nous avons posées au paragraphe précédent (voir aussi la section 8.5). Il est possible, cependant que, dans l'esprit de certains auteurs, le SE « Formation du sol » s'entende à plusieurs échelles de temps et englobe un SE en lien avec la structure du sol *sensu stricto*.

Robinson *et al.* (2009) introduisent ensuite le concept de capital naturel « sol », composé de constituants organisés selon trois axes de masse, d'énergie et d'organisation : la structure du sol est le composant essentiel de l'axe d'organisation. Dominati *et al.* (2010) considèrent également la structure du sol comme un élément essentiel du capital naturel et l'on peut théoriquement l'évaluer à partir de plusieurs variables managables du sol (Cf. section 8.4). Le SE défini est alors celui de « Approvisionnement en support physique ». Dans les deux cas et malgré une avancée conceptuelle notable, l'évaluation concrète du SE reste délicate.

Dans des écrits plus récents, plusieurs auteurs mentionnent un SE de « Maintien de la structure du sol » (*soil structure maintenance* ou *soil structure regulation* ou *soil structure modification*) (Kibblewhite *et al.*, 2008; van

Eekeren *et al.*, 2010; Pulleman *et al.*, 2012; Sanabria *et al.*, 2014). Ce SE décrit la capacité de l'écosystème à maintenir ou réguler une structure du sol permettant à celui-ci de remplir ses fonctions de support, habitat, filtre, et stockage.

On notera enfin que, parmi les travaux qui traitent des SE auxquels contribuent les sols, très peu ne mentionnent pas un SE en lien avec la structure ou la formation du sol (Janvier *et al.*, 2007; Xue *et al.*, 2015). Dans ceux qui ne le mentionnent pas, la structure du sol est cependant prise en compte de façon indirecte par l'utilisation d'une variable ou d'un indicateur qui décrit la structure ou qui en est très fortement dépendant. Citons, par exemple, Grimaldi *et al.* (2014) et Forouzangohar *et al.* (2014) qui utilisent la masse volumique du sol pour caractériser le stockage du carbone ou la réserve utile du sol pour caractériser la capacité de stockage en eau du sol.

Définition et périmètre

Après analyse des différentes propositions de la littérature, la dénomination retenue pour le SE est « **Structuration du sol** ». Il décrit la capacité de l'écosystème à maintenir une structure du sol permettant à celui-ci de remplir ses fonctions de support, habitat, filtre, et stockage.

Ce SE est défini exclusivement dans le compartiment sol, et à l'échelle de l'horizon de sol. On le considère à la fois dans l'horizon de surface du sol, là où la structure évolue à des échelles de temps rapides (depuis l'événement pluvieux jusqu'au cycle cultural), mais également dans les horizons profonds, où sa dynamique s'inscrit dans des temporalités plus longues (pluriannuelles).

Type d'écosystème et éléments du SE

Ce SE est donc un ensemble de processus qui détermine un état structural du sol. Les éléments de structure de l'écosystème agricole pertinents pour l'évaluer sont : le sol (en particulier, sa masse volumique et sa teneur en matière organique, les caractéristiques de sa faune en termes d'abondance et de diversité) et la plante (par son activité racinaire).

Les processus qui permettent de maintenir la structure du sol sont :

- les processus qui sont à l'origine de la **disparition de pores** :
 - o des processus physiques : reprise en masse, battance, encroûtement, désagrégation;
 - o des processus biologiques : perforation, tassement, création d'agrégats très denses par digestion par les organismes endogés (notamment vers de terre) ;
- les processus qui sont à l'origine de la **création de pores**
 - o des processus physiques : fissuration par alternances humectation/dessiccation ou gel dégel ;
 - o des processus biologiques : perforation par la faune ou l'activité racinaire et, plus généralement, bioturbation³ ; agrégation par l'activité biologique ;

8.6.1.2. Bénéficiaire(s) et avantage(s) dérivé(s) du SE

Le bénéficiaire du SE est l'agriculteur, qui en dérive les avantages suivants :

- **réduction du besoin de travail du sol du fait du maintien d'une structure du sol favorable à l'enracinement ;**
- **maintien d'une structure du sol portante, favorable au passage des engins agricoles ;**

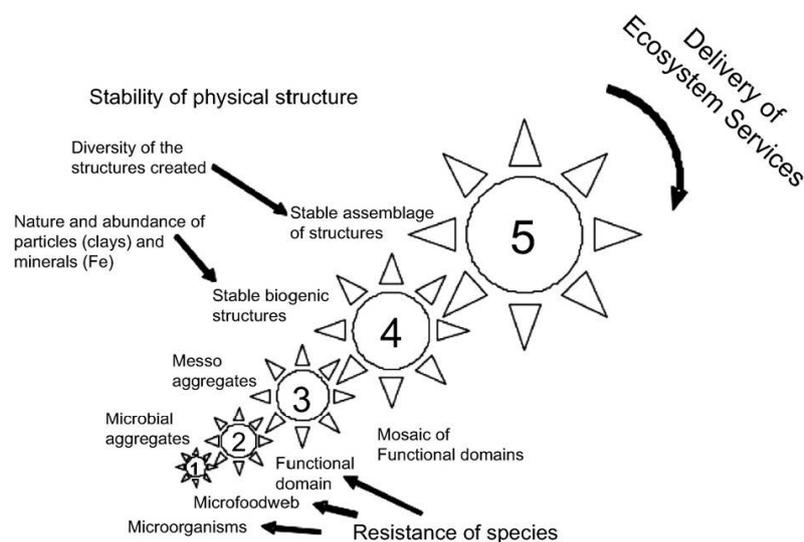
8.6.1.3. Déterminants biophysiques clefs du SE

Dans la littérature sur les SE, on note un lien très fort entre structure/structuration du sol et activité biologique, en écho à la perception très importante du rôle des animaux et des plantes dans la création de la structure du

³ phénomène de transfert d'éléments nutritifs ou chimiques par des êtres vivants au sein d'un compartiment d'un écosystème ou entre différents compartiments

sol (Rutgers *et al.*, 2012). La structure du sol détermine les caractéristiques de l'habitat de la faune - macrofaune, mésofaune, microfaune - (Kibblewhite *et al.*, 2008; Rudisser *et al.*, 2015) mais, en retour, celle-ci modifie continuellement la structure du sol. Vers de terre, fourmis et termites, souvent dénommés « ingénieurs du sol » contribuent à modifier la structure du sol par leur activité de perforation et d'agrégation (Blouin *et al.*, 2013; Lavelle *et al.*, 2014; Sanabria *et al.*, 2014). Les plantes, par leur activité mécanique de perforation et la sécrétion de molécules organiques modifient également à moyen terme la structure du sol, y compris dans les horizons profonds (Martins and Angers, 2015) ; certaines plantes sont d'ailleurs réputées pour favoriser le développement d'une structure du sol aérée et connectée (Blanchart *et al.*, 2004; Lambers *et al.*, 2009), et sont parfois utilisées à cette fin dans les rotations culturales. Dans ce cas, l'effet des plantes s'exprime à la fois sur la structure du sol à l'échelle de l'horizon, mais également à l'échelle de l'agrégat de sol, puisque les exsudats biologiques, au contact de la rhizosphère, contribuent à structurer le sol en micro-agrégats. A une échelle plus fine, champignons et bactéries, par leur action sur le processus d'agrégation, participent à l'évolution continue de la structure du sol (Mulder *et al.*, 2011; Spurgeon *et al.*, 2013). L'activité biologique sous toutes ses formes contribue ainsi à stabiliser la structure du sol à toutes les échelles (Figure 8-6-2). En conséquence, le choix des rotations culturales par l'agriculteur a des effets importants sur la structure du sol et sa dynamique.

Figure 8-6-2. Rôle des acteurs biologiques dans la stabilisation de la structure du sol à toutes les échelles (Lavelle *et al.*, 2006).



L'analyse de la littérature montre que, sur une sélection de 30 publications qui décrivent un indicateur de SE en lien avec la structure du sol, les déterminants biophysiques les plus cités sont les suivants :

- l'**organisation du réseau poreux** (29 occurrences sur 30) qui est le plus souvent évaluée *via* un indicateur de **masse volumique apparente** (17 occurrences); certains auteurs recommandent de caractériser la porosité (que l'on dérive de la connaissance de la masse volumique), ou la connectivité⁴ et/ou la tortuosité⁵, deux indicateurs dont la détermination est particulièrement délicate ;
- le **fonctionnement biologique du sol** (22 occurrences sur 30), évaluée *via* un indicateur intégrateur **comme la teneur en carbone ou en matière organique**, ou très spécifique comme par exemple *via* un indicateur de la diversité des macro-invertébrés. Dans tous les cas, ces indicateurs en lien avec le fonctionnement biologique donnent des informations indirectes sur la structure du sol voire la stabilité de celle-ci.
- la **stabilité de l'horizon du sol** (14 occurrences sur 30), évaluée *via* des indicateurs de la distribution de taille des agrégats ou de stabilité structurale⁶ (Le Bissonais, 1996);

⁴ La connectivité du réseau poreux est un indicateur du nombre de chemins possibles pour qu'un élément (particule solide, molécule liquide ou gazeuse) se déplace d'un point A à un point B dans ce réseau. Plus le réseau est connecté, et plus les chemins sont nombreux.

⁵ La tortuosité d'un réseau poreux est un indicateur géométrique qui décrit le rapport entre la distance réelle qu'une particule doit parcourir pour se déplacer d'un point A à un point B au sein de ce réseau, et la distance euclidienne entre A et B.

⁶ La stabilité structurale d'un sol est un indicateur de la cohésion des agrégats d'un sol ; il exprime la capacité du sol à résister à l'impact des gouttes de pluie, lesquelles peuvent conduire le sol à se désagréger en particules élémentaires.

- le **fonctionnement hydrique du sol** (13 occurrences sur 30), évalué *via* des indicateurs en lien avec la capacité du sol à stocker de l'eau (indicateur : Réserve Utile) ou en lien avec la capacité du sol à permettre le transfert de l'eau ou des gaz (indicateur : perméabilité, par exemple) ;
- la **portance du sol ou résistance du sol au tassement** (8 occurrences sur 30) évalué *via* des indicateurs tels que la sensibilité au tassement ou la résistance à la pénétration ;

Notons que les indicateurs présentés ci-dessus caractérisent l'état du système plutôt que sa capacité à maintenir une structure de bonne qualité. Pour caractériser l'état de l'écosystème en lien avec le SE de structuration du sol, deux déterminants biophysiques majeurs sont donc identifiés :

- la **masse volumique apparente de l'horizon de sol**
- la **stabilité structurale de l'horizon de surface**.

Masse volumique apparente

Des données de masse volumique apparente sur les horizons des sols de France sont disponibles dans la base de données RMQS (Jolivet *et al.*, 2006). On prendra garde toutefois à l'utilisation de ces données car elles ont été déterminées à des dates variables au cours du cycle cultural et reflètent ainsi souvent plutôt une pratique agricole qu'une caractéristique du sol ; la masse volumique est ainsi plus faible juste après un labour, puis plus élevée en sortie d'hiver lorsque celui-ci a été « rappuyé ». De la même façon, on utilisera avec discernement les fonctions de pédotransfert qui permettent d'évaluer la masse volumique à l'échelle du territoire mais, pour une évaluation nationale, on pourra utiliser les propositions de Martin *et al.* (2009), qui proposent une évaluation de la masse volumique des horizons de sol en tenant compte principalement de la **texture** et de la **teneur en matière organique**.

Stabilité structurale

La stabilité structurale des sols dépend fondamentalement de la **texture** du sol et de sa **teneur en matière organique** (Chenu *et al.*, 2000). Une fonction de pédotransfert permettant d'évaluer la stabilité structurale de sols français a été développée par Chenu *et al.* (2011) mais les auteurs de ce modèle relativisent son emploi étant donné son faible pouvoir prédictif, probablement en partie liée à l'évolution au cours de l'année, de la valeur de la stabilité structurale des sols sensibles à la battance et à l'érosion (Algayer *et al.*, 2014).

8.6.1.4. Facteurs exogènes clefs du SE

Les **pratiques agricoles** jouent un rôle essentiel dans la dynamique de la structure du sol, car elles contribuent à la fois à dégrader et à entretenir la structure du sol. Quelle que soit l'opération mécanisée réalisée dans une parcelle, cette opération est susceptible de dégrader la structure par tassement sous le passage des roues si l'engin est passé en mauvaises conditions, lorsque l'humidité du sol est importante, et même si la finalité de l'opération est de créer de la porosité. Des récoltes de betterave en conditions très humides, par exemple, compactent fortement le sol, mais un labour peut également générer un tassement important si le sol est humide. On notera cependant que le tassement est localisé au passage de roues, et que les pratiques actuelles de *controlled traffic farming*, où les engins passent systématiquement au même endroit dans la parcelle, limitent cet effet de tassement et le cantonnent à des zones bien définies.

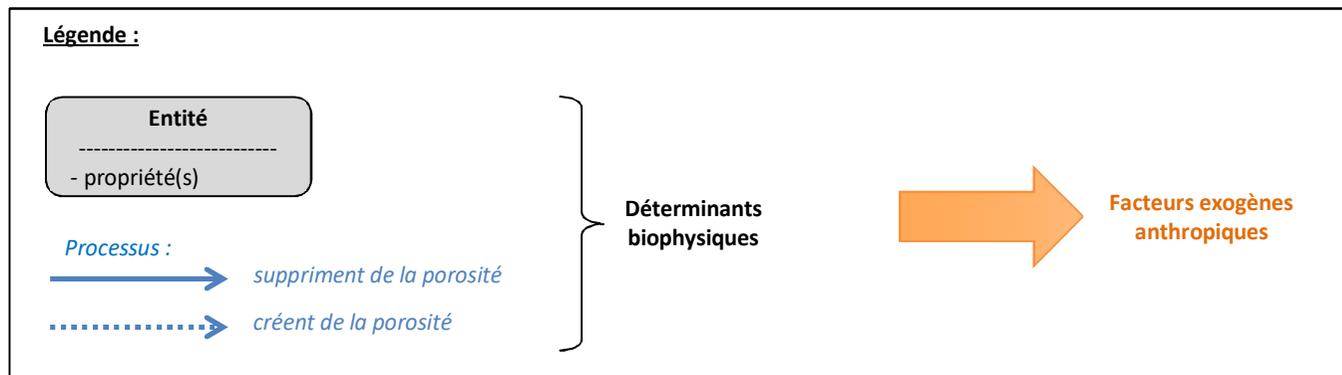
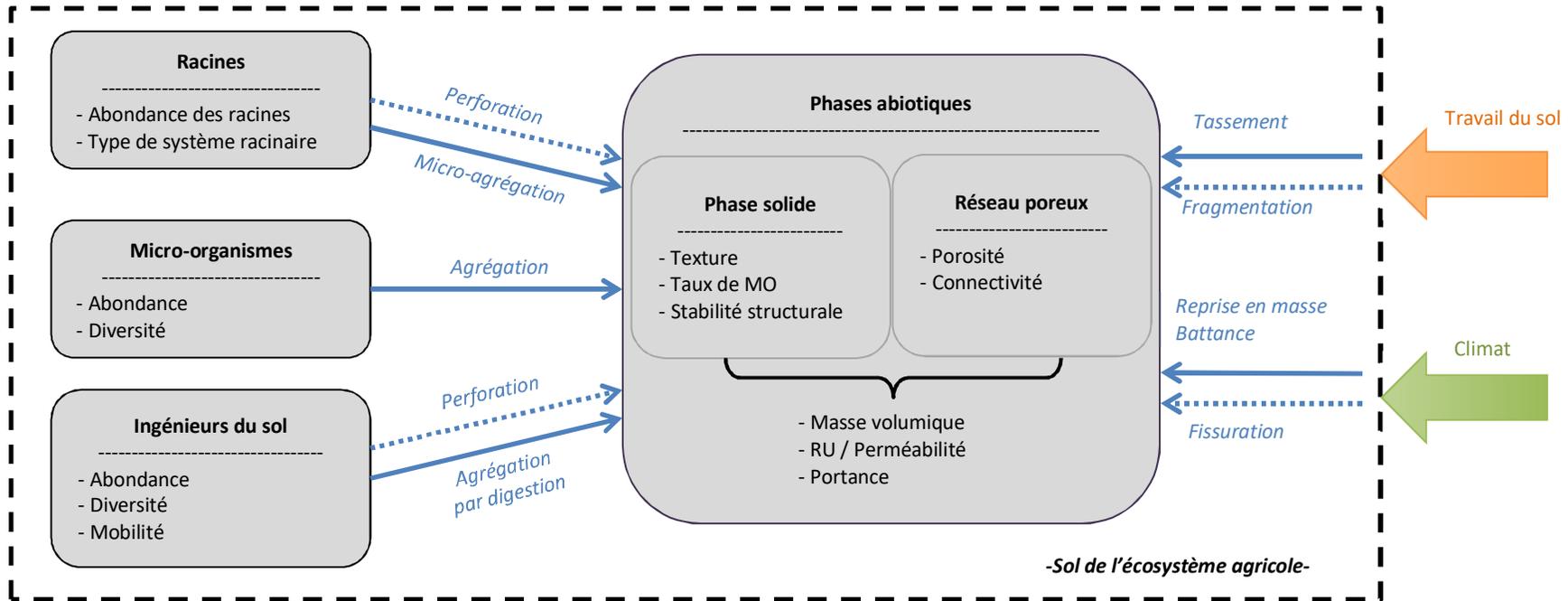
Le niveau de fourniture du SE « Structuration du sol » peut être réduit par les pratiques de travail du sol qui conduisent à une compaction du sol en surface ou en profondeur (ce qui correspond donc à une augmentation de la masse volumique) et qui ne sont pas compensées, à court terme, par des pratiques qui permettent de recréer de la porosité dans le sol. Les pratiques agricoles qui favorisent le développement de croûtes en surface du sol, pour les sols sensibles à la battance (sols limoneux essentiellement) influent également négativement sur le niveau de fourniture de ce SE.

Certaines pratiques agricoles déterminent fortement la structuration du sol (ce qui est attesté, selon Warkentin (2008), depuis Caton l'Ancien). Les pratiques de travail réduites sont réputées pour modifier de façon favorable la structure du sol, notamment parce qu'elles favorisent la diversification des espèces de bactéries, champignons et animaux présents dans le sol (van Capelle *et al.*, 2012; Kohl *et al.*, 2014) et permettent ainsi une action plus efficace des acteurs biologiques sur la structuration du sol (Roger-Estrade *et al.*, 2010). Les pratiques agricoles qui limitent la désagrégation du sol et la déconnexion du réseau poreux et qui favorisent l'agrégation sont

considérées comme favorables au développement d'une structure de qualité : outre la diminution du labour, on peut citer le maintien des résidus de culture à la surface du sol (qui limitent la désagrégation), l'apport d'engrais organiques, l'allongement des rotations et le maintien d'un couvert végétal (Bronick and Lal, 2005). Au final, les bénéfices souvent attendus d'une structure du sol bien développée en contexte de travail du sol réduit sont une meilleure capacité d'infiltration du sol, une diminution de l'érosion grâce à un stockage de carbone plus important, un habitat de qualité pour la faune (Powlson *et al.*, 2011; Lal, 2013). Il convient cependant de considérer la dynamique de la structure du sol dans une perspective pluriannuelle, car des effets bénéfiques sur la structure du sol à long terme de changement de pratiques peuvent être précédés d'une dégradation temporaire de la structure. C'est le cas, notamment des situations de passage du labour au non-labour où l'on observe fréquemment que, pendant 5 à 7 ans, la masse volumique de l'horizon de surface est élevée et le système poreux du sol est peu connecté. Cet effet disparaît après que les processus biologiques et climatiques de régénération de la structure se sont mis en place (Boizard *et al.*, 2013; Bordes and Cousin, 2014).

Les déterminants biophysiques et les facteurs exogènes clefs de la fourniture du SE sont schématisés dans la figure 8-6-3.

Figure 8-6-3. Représentation schématique des principaux déterminants biophysiques et des exogènes impliqués dans la fourniture du SE « Structuration du sol »



8.6.2. Pistes méthodologiques pour l'évaluation biophysique du SE

8.6.2.1. Indicateur de SE lié à la structuration du sol dans la démarche MAES (Maes *et al.*, 2011; Maes, 2014)

Dans la démarche MAES, le sol est présent de façon indirecte dans de nombreux SE et un SE de régulation intitulé « Contrôle et régulation de la qualité du sol » est proposé (*soil quality regulation control*) dans le premier rapport (Maes *et al.*, 2011). Ce SE est décrit de façon très générale, et l'indicateur proposé est celui de la teneur en carbone dans le sol⁷. Les auteurs reconnaissent que cette proposition est insuffisante et suggèrent de réfléchir à un indicateur plus approprié, tenant compte d'un plus grand nombre de caractéristiques du sol, dans le cadre de travaux traitant de la qualité du sol. Le rapport suivant suggère un SE « Formation et composition du sol » (Maes, 2014), qui s'appuierait sur la connaissance de i) la pratique agricole de fertilisation (chimique vs organique), ii) la teneur en carbone du sol, iii) le pH du sol, iv) la Capacité d'Echange Cationique du sol. Une méthodologie d'agrégation de ces différents indicateurs de SE n'est cependant pas proposée. En conséquence, la démarche adoptée par le MAES ne nous semble pas adaptée ou non directement opérationnelle pour évaluer un SE de structuration du sol des écosystèmes agricoles.

8.6.2.2. Analyse de la littérature

Plusieurs auteurs ont proposé des méthodes d'évaluation du SE « Maintenance de la structure du sol » en utilisant des approches de modélisation mécanistes, mais aucune ne peut être mise en œuvre sur de grands espaces. Pour des exemples à l'échelle locale, nous pouvons citer les travaux suivants : Aitkenhead *et al.* (2011) développent un modèle général d'évaluation de SE (modèle MOSES) qui tient compte de l'évolution de la masse volumique du sol au cours du temps. De même, Dominati *et al.* (2014) utilisent le modèle Sol-Plante-Atmosphère SPASMO pour produire des indicateurs de SE. Cependant, dans les deux cas, le déterminisme de cette évolution n'est pas précisé. La proposition la plus avancée semble celle de Banwart *et al.* (2012), qui proposent d'utiliser le modèle CAST (Carbon Dynamics and Soil Stability) afin de prévoir la dynamique temporelle de paramètres dépendant de la structure du sol, comme la diffusivité des gaz ou la perméabilité à l'eau.

Une autre démarche, proposée par (Velasquez *et al.*, 2007; van Eekeren *et al.*, 2010; Grimaldi *et al.*, 2014; Sanabria *et al.*, 2014) consiste à développer des relations statistiques entre différentes caractéristiques du sol ayant un lien avec la structure. Ces relations permettent notamment de comparer l'effet de systèmes de culture ou de pratiques agricoles dans un contexte agropédoclimatique restreint mais ne peuvent pas être appliquées sur de grands espaces.

Enfin, plusieurs auteurs proposent d'évaluer l'état de l'écosystème résultant du SE plutôt que le SE rendu, en utilisant des indicateurs très indirects de la structure : par exemple la teneur en matière organique ou l'abondance en vers de terre pour Rutgers *et al.* (2012), ou l'occurrence de microarthropodes pour Rudisser *et al.* (2015), ces animaux étant considérés comme indicateurs d'un habitat de bonne qualité. Roger-Estrade *et al.* (2009), cependant, proposent de caractériser la dynamique de la structure du sol par l'analyse de l'évolution de mottes tassées au sein de l'horizon cultivé. Cet indicateur ne peut cependant pas être mis en œuvre sur de grands espaces.

8.6.2.3. Indicateur du niveau de SE et méthodologie

Considérant l'état des connaissances présentées ci-avant, nous ne sommes pas en mesure de proposer de méthode d'évaluation du niveau de SE « Structuration du sol » applicable France entière. En revanche, comme indiqué dans la section sur les déterminants, certains déterminants biophysiques clefs sont évaluables. Cependant, au vu des faiblesses des méthodes d'évaluation de ces déterminants (Cf. section déterminants biophysiques) des travaux sur l'amélioration des performances prédictives de celles-ci sont encore à développer.

⁷ Les auteurs ne précisent pas s'il s'agit de la teneur en carbone dans l'horizon de surface ou la teneur sur la totalité du solum.