

# Le système complexe du paysage: repères de modélisation écotogéographique des territoires

## The complex landscape system: benchmarks for territories ecogeographic modelization

Opdecamp Luc<sup>1</sup> et Engels Patrick<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Consultant chercheur indépendant - agrophil.org, Belgique

<sup>2</sup>Collaborateur scientifique de l'Université de Liège, Belgique

© Les auteurs, version du 12 avril 2016

### Plan de l'article

Résumé et mots-clé

Abstract and keywords

Introduction

Repères conceptuels

- Les facteurs interactifs du paysage

- Niveaux micro-, méso- et macropaysagers

- Agents, attributs et types d'holons de niveau micropaysager

  - Types d'agents et d'anthrobiotes

  - Attributs de fertilité des sols

  - Types d'holons micropaysagers

- Agents et attributs du niveau mésopaysager

  - Types d'anthromes et d'agents

  - Attributs géomorphopédologiques et altitudinaux dans les UP

  - Attributs de cadre de vie

- Agents et attributs du niveau macropaysager

- Repères dynamiques

Repères méthodologiques

- Synthèse théorique

- Observatoires interdisciplinaires du paysage

- Echelles et données initiales

- Outil SIG pour exploration et validation du modèle SMA/CAS

FP de régions agropastorales d'altitude au Burundi

Conclusions

Bibliographie

## Résumé

L'approche paysagère est adoptée par un nombre grandissant de disciplines. Elle cible généralement la composante épigée de l'écosphère et néglige sa composante hypogée constituée notamment des sols. Il en résulte des visions partielles et réductrices. Elles amputent l'intérêt de ce type d'approche dans la gestion des affectations des sols en milieu rural et urbain. Une modélisation écogéographique associe la géographie, l'écologie et l'économie du développement. Elle peut aussi s'intégrer dans l'environnement disciplinaire encore plus large des observatoires des paysages préconisés par le Conseil de l'Europe. Des repères conceptuels et méthodologiques sont rassemblés, ordonnés et synthétisés pour modéliser la complexité paysagère en trois niveaux hiérarchiques spatio-temporels. La modélisation est holistique et consacre l'émergence des micro-, méso- et macroholons paysagers dans une perspective de développement durable. Ces trois niveaux d'holons correspondent respectivement aux facettes paysagères, aux unités paysagères et aux systèmes paysagers. L'angle de vue du modèle reste local plutôt que global et se compose d'une simulation multi-agents (SMA) qui règle les changements d'affectation des sols (CAS). Ces agents sont les agriculteurs, éleveurs, forestiers, artisans, industriels, commerçants et résidents des milieux rural et urbain ou les représentants des groupes sociaux et autres collectivités. Le modèle est particulièrement original car il repose sur un couplage des attributs universels de fertilité à la fois physique, chimique et biologique des sols avec les anthrobiotes génériques et antiques d'Ager, de Saltus et de Silva ainsi que d'Urbs et d'Hortus au niveau interactif micropaysager. Au niveau focal intermédiaire "méso", il propose des repères de couplage entre les pédopaysages et les types d'anthromes. Ces derniers sont élargis au niveau "macro" des systèmes paysagers. Un système paysager partage structurellement le même type d'anthrome et de pédopaysage que les holons intermédiaires mais sous un angle de vue qui dépasse celui du cadre de vie. La perspective spatiale et temporelle s'élargit du bas vers le haut. Les repères de dynamique sont évoqués par les changements techniques, les crises économiques, les réformes politiques et les grands tournants historiques. L'anthropisation paysagère est marquée par des phases pionnières et de consolidation, ainsi que d'intensification ou d'extensification. C'est une dynamique qui modifie les limites des facettes paysagères et les types d'unités et systèmes paysagers. Une série de sept règles sont énoncées dans les décisions d'affectation des sols par les agents. Les repères conceptuels peuvent être ainsi synthétisés en un modèle théorique de type explicatif plutôt que descriptif. La métaphore du géotype et génome paysagers s'y applique plutôt que celle du phénotype et phénomène pour un modèle de type descriptif. La méthodologie pour implémenter le modèle peut être inspirée de celle de l'élaboration des atlas de paysage. Dans le cadre du recours à un Système d'Information Géographique (SIG) les types et échelles de données nécessaires sont précisées. Outre l'accès et le traitement des informations, le SIG-logiciel doit permettre simultanément une communication aisée entre les agents pour favoriser une R&D participative. L'intérêt d'un tel modèle est finalement discuté et illustré à partir de données écogéographiques relatives aux régions agropastorales d'altitude du Burundi. Le modèle permet d'abord une lecture compréhensive de l'affectation des sols dans les paysages. Il offre aussi un appui considérable à l'évaluation pertinente de scénarios de développement socio-économique durable.

**Mots clé:** complexité, paysage, modèle, holon, écogéographie, échelles spatio-temporelles, sols, anthrobiote, anthrome

## Abstract

The landscape approach is adopted by a growing number of disciplines. It usually targets the aboveground part of the ecosphere and neglects its belowground component consisting especially of soils. This results in partial and reductive visions. They amputate the interest of this type of approach in the land uses management in rural and urban areas. An ecogeographic modelization combines geography, ecology, and development economics. It can also be integrated into an even broader disciplinary environment like landscape observatories recommended by the Council of Europe. Conceptual and methodological benchmarks are assembled, ordered and synthesized to model the landscape complexity in three spatio-temporal hierarchical levels. The modeling is holistic and consecrate emergence of micro, meso

and macro landscaped holons in a perspective of sustainable development. These three holons levels correspond to land facets, land units and land systems. The viewing angle of the modelization remains local rather than global and consists of an agent based model (ABM) which regulates land use changes (LUC). These agents are the farmers, ranchers, foresters, craftsmen, industrialists, shopkeepers and residents of rural and urban areas or representatives of social groups and other communities. The model is particularly original because it is based on a coupling of universal attributes of physical, chemical and biological soil fertility with generic and antique anthrobiotes of Ager, Saltus and Silva as well as Urbs and Hortus at the deterministic microscale level. At the intermediate "meso" focal level, it offers benchmarks for coupling soilscape and anthrome types. They are expanded at the "macro" level of land systems. Land system shares structurally the same soilscape and anthrome type than intermediate holons but at an angle of view that exceeds that of the living environment. The spatial and temporal perspective widens from bottom to top. Dynamic benchmarks are referred to by technical change, economic crisis, political reforms and major historical turning points. Land anthropisation is marked by pioneer and consolidation phases as well as by intensification or extensification ones. It's a dynamic that changes the boundaries of land facets and the types of land units and land systems. A set of seven rules are contained in land use decisions by the agents. Conceptual benchmarks are synthesized in a theory which is an explicative rather than descriptive model. The metaphor of the genotype and genome scapes applies rather than the phenotype and phenome one applied to a descriptive model. The methodology for implementing the model can be inspired by the one used for landscape atlases production. The use of a Geographic Information System (GIS) is recommended. The necessary data types and scales are specified for the ABM/LUC modelization. In addition to accessing and processing information, GIS must simultaneously allow easy communication between agents as part of a participatory R&D. The interest of such a model is finally discussed and illustrated from ecogeographic data on agro-pastoral highlands in Burundi. The model provides first a comprehensive land use reading in landscapes. It also provides significant support to relevant evaluation of different scenarios for sustainable socio-economic development.

Keywords: complexity, landscape, model, holon, ecogeography, spatial and time scales, soils, anthrobiote, anthrome

## *Introduction*

Le développement socio-économique peut être perçu comme un phénomène émergent propre à la dynamique de systèmes complexes géographiques. Il résulte d'une anthropisation de l'écosphère caractérisée par une coévolution de systèmes ruraux et urbains, distaux ou proximaux. Le développement des premiers permet celui des seconds qui à leur tour rétroagissent positivement sur les premiers selon une dynamique non linéaire. Ces interactions spatio-temporelles sont pilotées par des agents décideurs urbains tels qu'ouvriers et employés, commerçants, artisans, industriels, prestataires de services ainsi que des agents décideurs ruraux tels que les agriculteurs, éleveurs et forestiers, et enfin indistinctement l'ensemble des humains en tant que résidents et gestionnaires de l'écosphère. C'est la justesse de leurs décisions et la coordination de leurs diverses actions qui tissent les paysages et en conditionnent la viabilité et la durabilité. L'étude et la compréhension de ces systèmes et de leurs interactions exigent une approche interdisciplinaire. La démarche écogéographique a été entreprise en France par J. Tricart, géographe, et J. Kilian, agropédologue (Bardinet, 1983). Elle se base sur une approche des paysages associant la géomorphologie, l'agronomie, la pédologie, l'écologie et une certaine forme d'économie du développement. Ils peuvent être considérés à ce titre comme des précurseurs d'une vision holistique de l'écosphère, embrassant la plupart des composants et facteurs actifs des paysages. Ils s'inscrivent ainsi dans la ligne des géographes allemands comme K. Troll, J. Schmithussen, E. Neef, G. Haase ou des russes comme V.N. Sukachev et V.B. Sochava et plus récemment encore A.G. Issachenko, cités par Melnyk (2008). C'est en continuation de cette approche qu'est proposée ici une série de repères conceptuels et méthodologiques pour produire un modèle d'organisation du territoire en tant que système complexe paysager. Le paysage peut également être perçu de manière socio-culturelle en tant que cadre de vie, pour ses qualités esthétiques et environnementales telles que les services écosystémiques au quotidien. Ce dernier aspect est

aussi important et il est pris en compte par la Convention européenne du paysage (CoE, 2000). C'est également un objectif des atlas des paysages élaborés en France et en Wallonie (Belgique). Cependant, à côté de cet objectif socio-culturel subsiste clairement aussi celui de fournir un outil de décision pour l'aménagement du territoire et l'exploitation des ressources naturelles. Or, ces dernières ne sont pas seulement épigées mais aussi hypogées comme les sols et les eaux d'infiltration. Ils font en effet partie intégrante des écosystèmes constitutifs des paysages. La démarche écogéographique est nécessaire pour expliquer la différenciation et l'évolution des paysages car elle permet d'intégrer les facteurs biophysiques et socio-économiques. Les connaissances à ce sujet sont en effet le plus souvent dispersées, épidermiques et surtout incomplètes principalement du point de vue structurel. A cet égard, les sols et leurs propriétés physiques, chimiques et même biologiques jouent un rôle clé. Or, ils ne sont généralement pas ou peu pris en compte en aménagement du territoire et notamment dans les atlas de paysages à l'exception peut-être tout récemment de celui des Hautes-Pyrénées qui publie leurs "pédopaysages" à l'échelle du 1/250.000<sup>ème</sup> (CAU 65, 2015). Un modèle écogéographique conjuguant le temps et l'espace permettrait de préciser leur influence en tant que facteur de prospérité socio-économique des populations humaines et d'évolution historique des paysages.

Des repères conceptuels et méthodologiques pour un tel modèle sont proposés, documentés et illustrés selon une vue holistique et systémique. La démarche continuée d'écogéographie vise à structurer l'hétérogénéité spatio-temporelle de l'écosphère terrestre. Elle s'appuie sur plusieurs axiomes. Le premier est que les paysages sont assimilés à ce que Wu (1999) et Sayama (2015) appellent des systèmes à complexité organisée. Ce type de complexité se prête à la modélisation systémique plutôt qu'analytique. Du point de vue écogéographique, les systèmes paysagers comportent à la fois des "sujets" humains et des "objets" biophysiques hybridés, dans la ligne d'une épistémologie constructiviste. Un deuxième axiome consiste à percevoir les composants paysagers en référence au concept d'holon de Koestler (1969). Les paysages sont ainsi formés d'entités volumiques intégrant les composants épigés et hypogés de l'écosphère. Pour ces entités tridimensionnelles l'interactivité de leurs composants internes est plus forte que celle, externe, qui opère entre elles. C'est de l'interactivité interne et externe de leurs holons que les paysages acquièrent leur faculté d'évolution et d'adaptation. Trois niveaux d'échelle spatio-temporelle sont retenus: l'inférieur, le supérieur et le niveau intermédiaire qui constitue le niveau focal. Ils permettent de définir les trois plans d'émergence correspondants de micro-, méso- et macroholons paysagers. Le concept d'émergence est fondamental en science de la complexité et se concrétise au niveau paysager par le développement durable, à savoir celui d'une double viabilité économique et écologique pour une population humaine donnée. Dans cette composition multi-échelles, un troisième axiome encore tient en ce que les propriétés ou attributs holonimiques influencent les décisions des acteurs ou agents et ce dès le niveau micropaysager.

Outre des repères conceptuels, des repères méthodologiques s'inspirent de la collecte des données géographiques préconisée dans l'élaboration des atlas des paysages (Raymond et al., 2015; Droeven et al., 2004). Le processus de modélisation envisagé se base alors sur un double module classique: un système multi-agents (SMA) et un Système d'Information Géographique (SIG). Dans un tel modèle, les changements d'affectations des sols (CAS) relèvent de codages algorithmiques simulant les décisions des agents, sensés reproduire ce que Berque (1987) appelle les "trajectories", c'est-à-dire les états de la "motivation" des paysages. Cette motivation est entendue ici dans l'acception tridimensionnelle et holistique de leur différenciation, évolution et adaptation aux variations des conditions socio-économiques ou environnementales. Les trajectoires sont ainsi les résultats de processus historiques et géographiques qui unissent les sujets et les objets au sein des paysages. La rationalité relative des décisions de changements d'affectation des sols (CAS) peut alors être approchée si l'on dispose effectivement des données écogéographiques nécessaires et qu'elles sont rassemblées dans un système de gestion de bases de données (SGBD) intégré à un module SIG-logiciel pour générer notamment les attributs "clés" des trois niveaux d'holons.

En l'absence de SIG opérationnel et de données systématiques publiées, quelques facettes paysagères de régions agropastorales d'altitude du Burundi sont présentées pour entrevoir l'intérêt du modèle écogéographique présenté.

## Repères conceptuels

Les facteurs interactifs du système complexe paysager dans une modélisation de type écogéographique sont connus et reconnus. La conception d'une structure hiérarchique spatio-temporelle à trois niveaux d'holons pour décrire ce système est par contre un point de vue assez nouveau. Il exige de mettre en évidence le phénomène fondamental d'émergence des holons. Cela peut très bien se faire par des arguments socio-économiques. À chaque niveau hiérarchique, des repères typologiques sont assemblés et adaptés pour qualifier le facteur dynamique dominant tantôt à l'échelle locale à partir de concepts d'échelle globale, tantôt aux temps contemporains à partir de concepts qui datent de l'Antiquité mais qui sont très structurant. Les décisions d'affectations des sols par les agents sont supposés relever d'une certaine rationalité et donc d'un certain déterminisme de base au niveau micropaysager. L'idée fondamentale retenue dans une modélisation écogéographique est que les trajectoires des systèmes paysagers sont influencés par les attributs de fertilité à la fois physique, chimique et biologique des sols dans les holons micropaysagers<sup>1</sup>. Des repères dynamiques de motivation paysagère sont basés sur les grandes étapes de la colonisation anthropique de l'écosphère et sur les tournants des histoires agricoles, industrielles ou politiques des territoires.

## Les facteurs interactifs du paysage

Comme le souligne Blandin (1992), le concept de paysage souffre d'un trop-plein de significations selon les disciplines qui l'utilisent. D'un point de vue écogéographique, holistique et systémique, le concept de paysage s'assimile à celui de "système de terre" (land system) de la FAO (2007). Il peut se décomposer en plusieurs facettes (land facets). Repris aussi par Rossiter (1996), on peut considérer le concept de terre, en tant que facette ou système, comme une tranche entière de haut en bas dans l'écosphère terrestre. Une terre est ainsi dotée d'attributs distribués au-dessus et en dessous de la surface du sol dans un périmètre donné. Ces attributs sont de type climatique au niveau de l'atmosphère, de type pédologique et géomorphologique au niveau de la lithosphère et du relief, de type hydrologique au niveau de l'hydrosphère, ou encore de type biotique ou "anthrobiotique" au niveau de la biosphère naturelle ou anthropisée. Les attributs anthrobiotiques intègrent les particularités des populations animales et végétales ainsi que les effets de l'affectation des sols par les humains dans la terre considérée. Le concept de paysage atteint une envergure spatio-temporelle si l'on y conjugue les interactions du climat, du relief et de la lithologie, du sol et de ses affectations par les humains. Dès lors, les facteurs classiques de formation des sols et des paysages se retrouvent associés, leurs dynamiques respectives se chevauchant. Pour un site donné, ces facteurs sont rassemblés dans la formule "corp" rappelée par McBartney et al. (2003) selon les correspondances de chacune des lettres suivantes: "c", comme "climate", climat; "o", comme "organisms", affectation du sol, qualifiée ici de facteur anthrobiotique; "r", comme "relief", c'est-à-dire la topographie et les formes de relief; "p", comme "parent material", ou roche mère pédologique/géologique (origine lithologique et granulométrie).

Ces facteurs ne sont autres que ceux de la formule " $S = f(\text{corp}t)$ " de Jenny (1941) qui relie la différenciation du sol ou de l'une de ses propriétés (S) à l'interaction des cinq facteurs pédogénétiques où le temps (t) correspond à l'âge du sol. Il est théoriquement pratique de réduire "S" en 5 formules factorielles partielles si l'on peut supposer que les 4 autres facteurs sont constants. On distingue alors des climofonctions  $S=f(c)$ , des anthrobiofonctions  $S=f(o)$ , des topofonctions  $S=f(r)$ , des lithofonctions  $S=f(p)$  ou en encore des chronofonctions  $S=f(t)$ . Une attention toute particulière doit être réservée à l'anthrobiofonction " $f(o)$ " pour laquelle McBartney et al. (op. cit.) signalent qu'il n'est pas établi que la variable indépendante serait la flore naturelle ou domestiquée. Ce serait plus souvent le sol qui influence les attributs anthrobiotiques du paysage que l'inverse. En fait, la relation est réciproque. Il s'agit d'une véritable interaction qui fait du sol un facteur interactif du "paysage". D'autres interactions sont également connues entre les facteurs, de types climat-végétation, climat-relief, relief-végétation, relief-roche-mère. Seul le temps (t) est une véritable variable indépendante. Chaque facteur est un conglomerat inextricable de variables dynamiques. Du fait qu'elles demeurent inséparables, elles ne sont pas identifiables. Ces facteurs et leurs interactions ne

<sup>1</sup> Une telle idée s'inspire en quelque sorte de ce qu'une évolution déterministe peut caractériser un système complexe physique à une échelle microscopique, alors qu'à l'échelle macroscopique son évolution semble relever d'un processus stochastique (Lesne, 2008).

peuvent dès lors pas être étudiés de manière mathématico-analytique mais seulement systémico-analogique. Une modélisation spatiale et dynamique par algorithmes est une option élégante.

## Niveaux micro-, méso- et macropaysagers

Sayama (op. cit.) considère les systèmes complexes comme des intermédiaires entre systèmes aléatoires à composants complètement indépendants et systèmes déterministes à composants complètement couplés. Wu (op. cit.) fait une distinction similaire entre trois types de complexités: la "simplicité organisée" qui caractérise des systèmes à nombre faible de composants couplés (interdépendants), analytiquement mathématisables par des équations différentielles ou aux dérivées partielles et donc typiquement déterministes; la "complexité désorganisée" dont le nombre élevé de composants provoque un comportement aléatoire pouvant être traité par des méthodes statistiques; et enfin, la "complexité organisée" qui caractérise la plupart des systèmes écologiques dont le comportement est non aléatoire ou dont le nombre intermédiaire de composants est soit trop élevé pour être traité de manière mathématico-analytique, soit inadéquat pour faire l'objet d'un traitement statistique traditionnel. Les systèmes à complexité organisée sont ceux que Simon (1977) considère comme pseudo-décomposables. C'est pour cette complexité organisée que l'approche systémique a produit notamment la "théorie de l'organisation hiérarchique" formulée dans sa perspective de biologie et d'écologie évolutive par Allen et Starr (1982) cités par Wu (op. cit.). Angelier (2008) précise que deux mécanismes contribuent à la stabilité de ces systèmes, en particulier les systèmes vivants, à savoir: (1) l'existence de sous-systèmes, de modules intermédiaires, relativement autonomes et appelés holons (Koestler, op. cit.) et (2) des connexions entre holons par paliers ou niveaux hiérarchiques successifs. Deux perspectives peuvent dès lors se dégager dans les systèmes complexes hiérarchisés: une perspective verticale selon 3 niveaux d'échelle: entre holons "macro" (niveau supérieur), "méso" (niveau intermédiaire) et holons "micro" (niveau inférieur) et, d'autre part, une perspective horizontale selon les divers holons "frères". Dans les systèmes hiérarchiques, les niveaux les plus élevés ou les plus englobants sont caractérisés par les plus grandes entités (macro) mais aux dynamiques les plus lentes (faible fréquence d'événements comme des pulsations spatiales entre holons), tandis que les niveaux inférieurs (micro) sont composés des entités les plus petites mais aux dynamiques les plus rapides (fréquence élevée d'événements comme la production discrète d'extrants par les processus à l'œuvre). Enfin, l'axiome holistique est au cœur d'une telle organisation: *"tout holon possède au moins une propriété émergente"* (Blandin et Lamotte, 1989).

Ces éléments théoriques offrent à l'écogéographie une base rationnelle d'ordre systémique et holistique pour décomposer les paysages et lui ouvrir des voies de R&D par modélisation. Ce qui est appelé "holon micropaysager" correspond géographiquement bien au concept de "facette de terre" (land facet) de la FAO (2007). Cette facette est une partie de "l'unité de terre" (land unit) du niveau holonimique intermédiaire et focal. Quant au niveau supérieur, c'est celui de "système de terre" (land system). La facette paysagère ou "facette de terre" ou "terre" (tout court) est définie comme un espace géographique dont les propriétés ou attributs climatiques, géomorphologiques, pédologiques et anthrobiotiques (végétaux et animaux) sont similaires ou quasi identiques. Repris par Rossiter (1996), une terre se rapporte à une zone de la surface terrestre dont les caractéristiques comprennent les attributs de l'écosphère au-dessus et en dessous de cette surface, de type climatique dans le compartiment de l'atmosphère, pédologique et géologique dans celui de la lithosphère, hydrologique dans celui de l'hydrosphère, ou encore anthrobiotique dans celui de la biosphère. Ces divers types d'attributs sont intéressants dans la mesure où ils influencent l'affectation de cette terre. La facette paysagère (FP) en tant que holon micropaysager est une sous-unité paysagère au sens de Raymond et al. (op.cit.). Une "unité de terre" de la FAO (op. cit.) s'assimile assez bien également avec l'unité paysagère (UP) de Raymond et al. (op. cit.) ainsi que de Droeven et al. (2004), c'est-à-dire au mésoholon du modèle SMA/CAS. Enfin, le "système de terre" ("land system") de la FAO paraît également être en bonne concordance avec celui de "grand ensemble paysager" de Raymond et al. (op.cit.) ou de "territoire paysager" de Droeven et al. (op. cit.). On peut aussi bien désigner ce macroholon comme un "système paysager" (SP). Dans ce qui définit le facteur anthrobiotique au niveau "micro", le concept d'anthrobiote vise l'affectation d'un sol en un site particulier, telle que décidée par l'humain en tant qu'individu ou

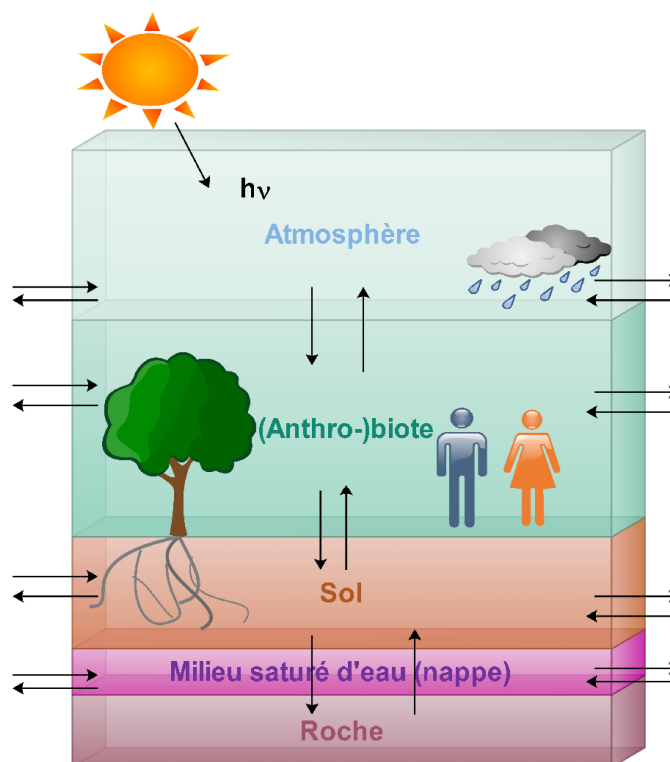
en tant que groupe social. L'anthrobiote est ainsi dérivé de celui de biote en écologie où il représente plus largement l'ensemble des organismes vivants d'un habitat particulier. L'anthrobiote comme facteur interactif micropaysager est à la fois objet et sujet. Comme objet, il est doté d'attributs relatifs au type d'affectation du sol et comme sujet il est un agent décideur humain de cette affectation. L'anthrobiote est ainsi dérivé de celui d'anthrome ou biome anthropogénique d'Ellis et Ramankutty (2008), repris au niveau "méso" et "macro". Il est postulé qu'un même type d'anthrome peut être partagé par plusieurs unités paysagères contiguës et se retrouve donc également au niveau supérieur de système ou grand ensemble paysager. Le modèle SMA/CAS admet d'ailleurs aussi au niveau inférieur micropaysager qu'un même type d'anthrobiote se retrouve dans plusieurs facettes paysagères aux combinaisons différentes d'attributs de fertilité à la fois physique, chimique et biologique du sol. Les concepts de base des trois niveaux hiérarchiques organisationnels sont repris dans le tableau 1 pour le modèle SMA/CAS envisagé.

**Tableau 1.** Les trois niveaux organisationnels des paysages en correspondance avec les concepts de holon émergent, de facteur anthrobiotique et d'agent décideur dans le modèle SMA/CAS.

| Niveau | Holon émergent         | Facteur anthrobiotique | Agents décideurs               |
|--------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Macro  | Système Paysager (SP)  | anthrome élargi        | collectivités locales élargies |
| Méso   | Unité Paysagère (UP)   | anthrome               | collectivités locales          |
| Micro  | Facette Paysagère (FP) | anthrobiote            | acteurs urbains et ruraux      |

## Agents, attributs et types d'holons de niveau micropaysager

Conceptuellement, une biofonction "f(o)" évoquée précédemment peut être assimilée au facteur anthrobiotique interagissant avec le sol d'un site c'est-à-dire au niveau d'une FP. La force des interactions anthrobiotiques et pédologiques internes, c'est-à-dire de leur couplage, en provoque l'émergence et construit l'identité de cet holon micropaysager. C'est l'unité de base du modèle envisagé. La [figure 1](#) en reproduit le schéma des composants. Les interactions systémiques épigées et hypogées, tant internes et verticales qu'externes et latérales y sont également signalées par des flèches.

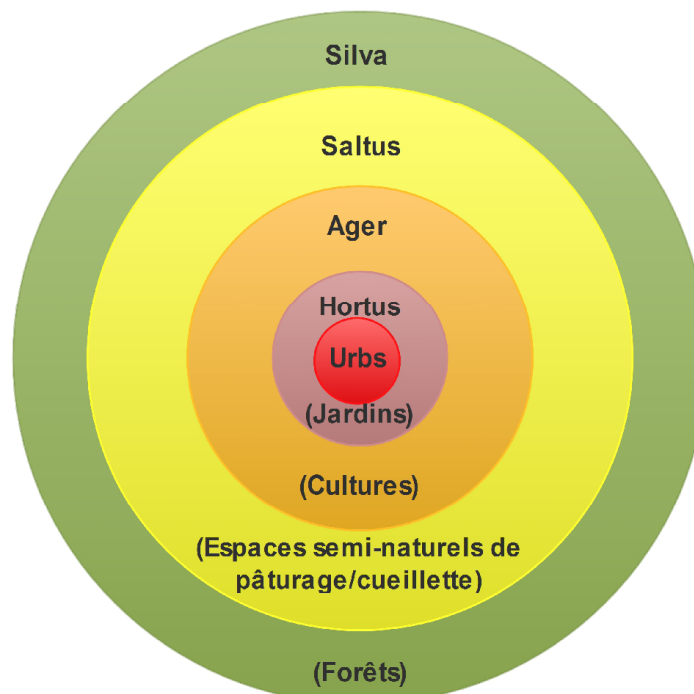


**Figure 1:** Schéma de l'holon micropaysager et de ses interactions internes et latérales

C'est sur le couplage de la fertilité du sol avec l'anthrobiote adapté par l'agent associé, que se conçoit le modèle SMA/CAS envisagé au niveau micropaysager. La fertilité d'un sol est en quelque sorte le phénomène issu de la fécondation de sa nature par la culture humaine. Il existe autant de microholons potentiels que de combinaisons possibles entre un type d'anthrobiote et un type de fertilité du sol. Plusieurs anthrobiotes peuvent donc se développer dans un même sol et un même anthrobiote peut se développer dans plusieurs sols.

### **Types d'agents et d'anthrobiotes**

Cinq grands types d'affectation classique du sol sont distingués depuis l'Antiquité, revisités et schématisés par Vidal (2011), suivant un gradient centrifuge décroissant d'anthropisation tel que représenté à la figure 2. Vidal part du constat que l'agriculture est une condition primordiale pour l'émergence des villes, en tant que ressource sédentarisée pour l'alimentation humaine. De manière réciproque l'implantation de l'habitat et du bâti est nécessaire à l'installation de silos de stockage et d'ateliers de fabrication d'outils agricoles. Les villes et les zones agricoles se sont dès lors développées de concert, notamment dans les plaines alluviales et bassins de grandes cultures céréalières (blé, riz, maïs).



**Figure 2:** Schéma d'une distribution concentrique idéalisée des anthrobiotes du modèle SMA/CAS

"Urbs" est une affectation essentiellement bâtie du sol, réservée à une concentration d'activités humaines de résidence, d'artisanat et d'industrie, de commerce, de transport et de services. Comme anthrobiote, son interaction avec la fertilité des sols est indirecte et réside, comme déjà évoqué, dans le fait d'assurer l'approvisionnement alimentaire et autres matières premières végétales ou animales. C'est une plaque tournante du développement économique. Collins et al. (2000) envisagent ce type d'affectation dans son holon paysager comme un écosystème urbain hétérotrophe, à métabolisme "industriel" du fait de sa forte consommation énergétique et de matières. Ces auteurs y décèlent aussi des "niches" dans des sous-anthrobiotes formés d'un noyau de béton et de verre, de parcs industriels, de rues résidentielles bordées d'arbres, de terrains de golf, etc. L'Urbs se développe selon une dynamique pilotée par la croissance économique et démographique ainsi que par des décisions institutionnelles. En tant qu'agent, Urbs représente aussi l'ensemble des décideurs urbains de l'affectation des sols: résidents, ouvriers et employés, commerçants, artisans, industriels, prestataires de services, etc.

"Hortus" était à l'origine une ceinture horticole de l'Urbs qui s'avérait nécessaire aux villes pour l'acheminement rapide des denrées périssables. Cette ceinture persiste encore parfois en bribes, notamment dans les pays en développement. Actuellement, le phénomène



d'urbanisation s'est amplifié et concentre plus de la moitié de la population mondiale. Cette concentration atteint même plus de 80% dans un pays comme la France d'après Janin (2015), où le phénomène goberait plus de 200 ha par jour. Parallèlement, Vidal (op. cit.) observe que des espaces verts de type Hortus reviennent en ville ainsi qu'une horticulture hors sol ou dans des friches urbaines, tantôt récréative dans les pays développés et tantôt plus fonctionnelle et alimentaire dans les pays en développement. Quant à l'agent "Hortus", il désigne les horticulteurs et jardiniers urbains et péri-urbains pratiquant à titre professionnel ou privé. Poux et al. (2009a, 2009b) explicitent la fameuse trilogie agraire de l'Ager, du Saltus et de la Silva. "Ager" constitue le domaine cultivé de manière quasi-permanente, planté ou semé, et surtout labouré au moins tous les 5 ans. Ce dernier critère qui est celui des terres arables ne nous paraît cependant pas pertinent surtout depuis la pratique du non-labour. L'Ager englobe les prairies temporaires (maximum 5 ans) qui sont semées et dites "artificielles", mais aussi les vignes et vergers intensifs non pâturés, et donc aussi plus généralement les plantations agricoles pérennes (palmiers, cacaoyers, caféiers, théiers, etc.), à l'exception des arbres destinés à la production de bois ou de grumes. Dans l'Ager, la fumure des parcelles cultivées est pratiquée plus ou moins régulièrement. Les prairies temporaires en rotation avec des cultures annuelles constituent l'Ager prairial. En tant qu'agent, Ager se compose donc essentiellement d'agriculteurs sédentarisés.

"Saltus" est un domaine semi-naturel non cultivé comme tel la plupart du temps. Cette affectation porte cependant la marque d'une gestion humaine dans une version extensive par le pâturage de troupeaux d'animaux domestiques et souvent par la pratique de feux périodiques pour limiter ou détruire l'embroussaillage. Saltus est un type d'anthrobiote développé dans tous les espaces ouverts non cultivés la plupart du temps. Il est exploité généralement pour l'élevage pastoral et la cueillette (prés-vergers). La reproduction de la fertilité des sols y est naturelle, assurée par le bouclage des cycles de nutriments sans apports d'engrais exogènes et pouvant être accéléré par la pratique de l'écobuage pour une brève mise en culture temporaire. Différents types de troupeaux et de formations herbacées plus ou moins arborées peuvent faire partie intégrante de ce type d'affectation du sol, y compris des prés-vergers pâturés. En tant qu'agent, Saltus se compose essentiellement d'éleveurs et de pasteurs, nomades ou sédentaires. Vanderpooten (2012, pages 256-257) rappelle que les physiocrates du XVIII<sup>e</sup> siècle opposaient le système de la "petite culture" à celui de la "grande culture". Le premier se caractérise par de vastes espaces de "Saltus", non cultivés (pâturages permanents), et une petite partie seulement de sols cultivés soumise à une rotation culturale. Tandis que dans le système de "grande culture" un vaste "Ager" domine le paysage, caractérisé par une alternance régulière de cultures et de prairies temporaires. Le territoire de l'Ager y est partagé régulièrement par l'agriculture et l'élevage sur les mêmes parcelles. "Silva", enfin, est un espace boisé et fermé, englobant des formations végétales perçues comme primaires et qualifiées de "sauvages" par Vidal (op. cit.). Cependant, les forêts tropicales soi-disant vierges sont en fait remaniées depuis longtemps par l'activité des essarteurs et la pratique itinérante de l'abattis-brûlis. Il s'agit là aussi de Silva en tant qu'agroforêts à rotation très lente, c'est à dire à jachère forestière de longue durée où l'homme s'est donc inséré (Rossi, 2000). De plus, il faut élargir la Silva aux anthrobiotes sylvicoles plantés ou semés pour la production de bois d'œuvre ou d'énergie et dont l'affectation est orientée parallèlement vers des activités de chasse et de pêche. Les agents "Silva" sont des propriétaires et des exploitants forestiers parmi lesquels peuvent se compter des essarteurs pratiquant une agriculture itinérante sur brûlis, des chasseurs et des cueilleurs.

### **Attributs de fertilité des sols**

Les propriétés et caractéristiques des sols sont étudiées par les pédologues. La plupart d'entre-elles sont renseignées sur les cartes de sols via les unités cartographiques, les unités de classification et les notices explicatives des cartes. Comme telles, elles sont plutôt stables car elles reflètent généralement les résultats d'une pédogenèse de durée multiséculaire à multimillénaire. Les propriétés des sols cartographiées par les pédologues ou retenues pour leur identification taxonomique n'informent pas directement sur la dynamique de leur fertilité dans la facette paysagère. Le phénomène de fertilité du sol est à la fois d'origine physique, chimique, biotique et anthropique. Il résulte de nombreuses interactions. Il est perçu au niveau micropaysager par les agents de l'Hortus, de l'Ager, du Saltus et de la Silva à une échelle de temps saisonnière ou pluriannuelle comme un quantité de biomasse végétale produite dans

une exploitation agricole, forestière ou d'élevage. Or la production de biomasse subit les aléas météo-climatiques: excès ou déficits pluviométriques, gels ou échaudages, tempêtes, grêles, etc. Elle peut aussi répondre diversement aux apports d'engrais organiques et minéraux épandus par les agents de l'Ager ou de l'Hortus. Elle dépend de surcroît de la pression parasitaire et des ravageurs, etc. Enfin, les capacités génétiques et physiologiques des espèces constitutives de l'anthrobiote interfèrent aussi très largement avec les propriétés et caractéristiques des sols et avec les apports d'engrais et amendements, qu'ils soient organiques ou minéraux. Exprimée par la production de biomasse, la fertilité d'un sol épouse une dynamique rapide, saisonnière ou annuelle, non linéaire. Cette dynamique est aussi marquée par une hétérogénéité spatiale. Les cartes de rendement en rendent compte dans l'agriculture de précision (Panneton et al., 2002). Des exemples de variabilité météo-climatique saisonnière en interaction avec le microrelief ou la profondeur d'un horizon particulier du sol sont rapportées dans la littérature (Timlin et al., 1998). Toutefois, Blackmore et al. (2003) détectent une tendance pluriannuelle à un estompage progressif de la variabilité spatiale saisonnière. Même si peu d'observations de longue durée sont disponibles, il semble assez évident qu'une durée de plusieurs années soit nécessaire pour évaluer les résultats de production en un site donné et pour décider d'une affectation particulière d'un sol en Hortus, Ager, Saltus ou Silva, c'est-à-dire pour qu'émerge un holon micropaysager "durable". C'est à la valeur économique suffisante de la production d'un anthrobiote que se juge sa bonne adéquation avec le sol par l'agent décideur et qu'émerge un microholon paysager. Les classifications naturelles des sols se basent sur leurs caractéristiques et propriétés inhérentes observées par les pédologues (Soil survey staff, 2014; FAO, 2014; Afes, 2009). La classification de fertilité des sols est par contre une classification d'ordre technique où les sols sont groupés selon les types de problèmes potentiels qu'ils peuvent poser pour leur gestion agronomique. Bien que dédiée aux régions tropicales, cette classification se focalise sur des propriétés pouvant affecter tous les sols de la planète. Sa quatrième et dernière version est proposée par Sanchez et al. (2003). Elle contient deux types d'attributs. Le premier est relatif aux matériaux constitutifs des parties superficielle et profonde du sol et selon leur caractère organique ou minéral tels que reproduits dans l'encadré 1. Ce type d'attribut est cité également comme premier critère de fertilité potentielle par Mueller et al. (2010) du fait de sa corrélation avec les fonctions d'économie en eau et en nutriments minéraux. Ces derniers auteurs remarquent que cet attribut fonctionnel et d'autres relatifs également à la nutrition minérale des plantes et à leur volume d'enracinement disponible ne sont pas toujours directement déductibles des systèmes de classification naturelle des sols utilisés dans leur description et cartographie. Ou alors, ils ne se révèlent qu'aux niveaux taxonomiques inférieurs. De plus, si plusieurs attributs techniques de fertilité du sol sont déterminants, les classifications naturelles ne peuvent en exprimer que l'un ou l'autre considéré comme "diagnostique". Le taxon cartographié ne rend alors pas compte des autres<sup>2</sup>.

**Encadré 1: Attributs de fertilité potentielle des sols selon leur matériaux constitutifs d'après Sanchez et al (2003)**

Le matériau du sol est considéré comme organique (symbole O) si la teneur en carbone organique reste supérieure à 12% entre 0 et 50 cm de profondeur. Pour un matériau non organique, la granulométrie en surface (0-20 cm) est prise en compte. Une distinction en 4 classes est adoptée, symbolisées par des lettres majuscules: "sableux" (symbole S), regroupe les classes de sable et de sable limoneux du Soil survey staff (op. cit.); "limoneux" (symbole L), argile < 35% sauf sable et sable limoneux; "argileux" (symbole C), argile > 35%. Si un changement de classe s'opère avant la profondeur de 50 cm, un deuxième symbole de granulométrie est accolé au premier: "sableux" (S), "limoneux" (L), "argileux" (C), roche ou autre matériau dur limitant le développement racinaire (R). Si cette couche indurée peut être démantelée mécaniquement, le symbole "R" est utilisé.

<sup>2</sup> Pour ne citer qu'un exemple, l'attribut de toxicité aluminique (a) dans l'encadré 2 n'est réservé par le Soil Survey Staff (op. cit.) que dans son ordre des "Oxisols" sous le qualificatif "allic". La FAO (2014, op.cit.) ne rend compte de cet attribut sous le qualificatif de "Alic" que si un horizon "argic" apparaît avant la profondeur de 100 cm et encore d'autres conditions. Par contre, le qualificatif de "Alumic" est utilisé pour cet attribut s'il répond aux critères entre 20 et 100 cm comme dans certains Retisols par exemple. Pour l'Afes (op. cit.) une clé existe pour orienter le pédologue vers la référence/chapitre des Alacrisols pour autant qu'un autre caractère ne l'en ait pas dévié auparavant. Le choix semble ainsi laissé alors à la discrétion du pédologue.

Le deuxième type d'attribut de fertilité potentielle des sols selon la dernière version de Sanchez et al. (op.cit.) se décline en 17 conditions modificatrices ("condition modifier") du matériau constitutif. Elles sont indiquées avec leur symbole entre parenthèses dans l'encadré 2. Le dernier attribut (m) est le seul qui se rapporte à la fertilité biologique des sols et il est nouvellement proposé par ces mêmes auteurs. Il exprime un déficit d'au moins 20% de la teneur en carbone organique dans la partie superficielle du sol sous l'anthrobiote courant par rapport à celle d'un sol sous biote "naturel". Certains attributs ne sont pas strictement inhérents au sol en lui-même mais s'appliquent bien à l'holon micropaysager et à la FP par interaction avec le climat comme l'aridité saisonnière (d) ou avec la topographie comme le risque érosif selon la pente (%). Mueller et al. (op. cit.) rapportent également l'importance de la topographie comme propriété externe du sol dans l'évaluation du risque érosif et de l'accessibilité aux engins agricoles. Enfin, les conditions modificatrices de la profondeur du sol meuble ou du caractère organique du matériau se confondent avec le premier attribut des matériaux constitutifs, à savoir respectivement (R) et (O).

**Encadré 2.** Attributs de fertilité potentielle des sols selon les conditions modificatrices du matériau constitutif d'après Sanchez et al. (2003).

aridité saisonnière (d), faible réserve en nutriments minéraux (k), risque élevé d'érosion (%), toxicité aluminique (a), forte fixation de phosphore (i), mauvais drainage (g), très lessivable (e), calcaire (b), argiles gonflantes (v), graveleux/caillouteux (r), faible profondeur meuble (1<sup>er</sup> symbole = R), salin (s), sodique (n), volcanique amorphe (x), organique (1<sup>er</sup> symbole = O), sulfidique (c), permafrost (t), déficit carbone organique (m).

### Types d'holons micropaysagers

Plusieurs symboles doivent être combinés les uns aux autres pour désigner un cumul d'attributs de fertilité potentielle du sol. Les combinaisons se présentent alors comme un enchaînement de lettres majuscules et minuscules dont voici deux exemples: "Caik" indique un matériau argileux à toxicité aluminique, à forte fixation de phosphore et à faible réserve en nutriments minéraux tandis que "LCgak" indique un matériau argileux recouvert d'un matériau limoneux en surface, mal drainé, très lessivable, à toxicité aluminique pour les anthrobiotes sensibles, et à faible réserve en nutriments minéraux. Chaque combinaison peut ensuite être représentée par un simple chiffre pour le type de fertilité du sol, accolé à une majuscule désignant l'anthrobiote auquel il est couplé dans l'UP, comme illustré dans la figure 3. En mode "raster" chaque cellule ou pixel du SIG associé au modèle SMA/CAS peut donc être affecté du symbole correspondant à un type d'holon micropaysager à un moment donné et tisser ainsi de pixel en pixel le mésoholon paysager.

| Microholons |    |    |    |    | Niveau mésoholon |    |    |    |    |
|-------------|----|----|----|----|------------------|----|----|----|----|
| Urbs        | U1 | U2 | U3 |    | U1               | S4 | L1 | S2 | S1 |
|             |    |    |    |    | U3               | A3 | L2 | L2 | L1 |
|             |    |    |    |    | H1               | H2 | A4 | S2 | S2 |
| Hortus      | H1 | H2 |    |    | U2               | H2 | A1 | L2 | S2 |
|             |    |    |    |    | U1               | A1 | A1 | A4 | L1 |
| Ager        | A1 | A2 | A3 | A4 | U1               | S4 | L1 | S1 | S1 |
|             |    |    |    |    | U3               | U3 | S3 | L2 | L1 |
| Saltus      | L1 | L2 |    |    | H1               | A3 | A4 | S3 | S3 |
|             |    |    |    |    | A1               | A1 | A4 | L2 | S2 |
| Silva       | S1 | S2 | S3 | S4 | A3               | A3 | A1 | L1 | L1 |
|             |    |    |    |    |                  |    |    |    |    |

**Figure 3.** Tissage en mode "raster" d'un mésoholon par les 5 types d'agents et anthrobiotes répartis selon 4 types de fertilité du sol des microholons identifiés

## Agents et attributs du niveau mésopaysager

Le niveau mésopaysager est celui de l'unité de terre (land unit) de la FAO (op. cit.) équivalente à l'UP de Raymond et al. (op.cit.) et de Droeven et al. (op.cit.). Cette dernière dénomination est dorénavant adoptée au niveau "méso" pour le modèle SMA/CAS, et celui de facette paysagère (FP) pour le niveau "micro".

Dans chaque UP fonctionne un anthrome selon un processus écosystémique formulé de manière générale par Ellis et Ramankutty (op. cit.). Dans ce processus la population humaine interagit avec les affectations des sols, les biotes, le climat, la configuration du terrain et la géologie. Une similitude apparaît à nouveau clairement avec la formulation "corpt" de Jenny (op. cit.) et permet de conserver une continuité conceptuelle des interactions entre les facteurs au travers des deux niveaux d'échelle considérés à ce stade, tout en accordant une importance particulière au facteur anthropique.

### **Types d'anthromes et d'agents**

Ellis et Ramankutty (op. cit.) définissent les anthromes au niveau global et mondial tandis que le modèle présenté ici les définit au niveau local, au sein d'un territoire précis et pré-délimité de l'UP, ce qui nécessite quelques adaptations. Le tableau 2 décrit brièvement les types d'anthromes retenus. Ils sont adaptés essentiellement par les proportions relatives des types d'anthrobiotes du niveau inférieur.

Une imprécision notable affecte les définitions des pâtures en Ager ou en Saltus, le critère distinctif étant le caractère temporaire de la prairie et son intégration ou non dans une rotation d'un système de culture. Il y a aussi le fait que la composition floristique de la prairie temporaire de l'Ager est contrôlée, tandis qu'en Saltus la flore évolue spontanément mais sous pression de la charge en bétail et des feux dans les savanes tropicales. Il arrive cependant qu'en milieu tempéré la flore prairiale du Saltus puisse être améliorée par une scarification et un semis de régénération lors de sécheresses exceptionnelles par exemple. Les pâturages de Saltus se situent dans des zones arides, ou pierreuses, ou inondées, ou montagneuses ou isolées et très peu peuplées (nomadisme), ou encore dans des sols à toxicité aluminique (attribut (a) comme condition modificatrice).

Les agents correspondants aux anthromes du tableau 2 sont les sociétés humaines locales qui y vivent et les représentants d'associations et cercles professionnels ou culturels ainsi que les autorités administratives locales ou régionales selon la superficie concernée et la densité de population.

### **Attributs géomorphopédologiques et altitudinaux dans les UP**

Les interactions fonctionnelles qui se déroulent dans une UP sont biophysiques et sociales (Raymond et al., op.cit.). Certaines d'entre-elles sont déjà prises en compte dans l'identification du type d'anthrome et d'agent. Les autres découlent d'attributs géomorphopédologiques tels que conçus par Tricart (1994), attributs qui sont proches de ceux d'un pédopaysage défini par Girard et Girard (2010). Cette même conception prévaut chez Zinck (2013) qui évoque le paysage géopédologique ("geopedologic landscape") en référence au pédopaysage ("soilscape") de Buol et al. (1997) tout à fait similaire à celui de Girard et Girard. Il s'agit d'un type de séquence de sols développés dans des matériaux parentaux dont l'origine lithologique peut être multiple, mais qui sont répartis dans un même modelé de relief formant ainsi une unité géomorphologique. Les éléments constitutifs des unités géomorphologiques peuvent être subtilement distinguées selon un certain nombre de formes de relief propres aux FP. Zinck (op. cit.) dénombre ainsi des formes structurales (dépression, crête, dôme, cuesta, combe, etc.), des formes d'érosion (pédiment, vallée, glaciaire, cirque, gorge, etc.), des formes de dépôt (delta, estuaire, terrasse, estran, barrière de corail, etc.), des formes de dissolution (dépression, colline, dôme, poljé, vallon, oued, etc.) et des formes résiduelles (pénéplaine, inselberg, etc.). Pour les FP contiguës d'une même UP, il est commode et souvent nécessaire de préciser leur séquence topographique en correspondance avec le motif du pédopaysage. Les UP sont en effet formées d'une juxtaposition latérale de FP cohérentes dans le plan géomorphopédologique. Cette cohérence relève aussi d'une homogénéité relative de conditions pluviométriques et thermiques, si bien que s'imposent des repères altitudinaux spécifiques. Les étages d'altitude varient selon les latitudes et longitudes, de l'équateur aux pôles et de l'Orient à l'Occident.

**Tableau 2.** Types d'anthromes adaptés de la typologie d'Ellis et Ramankutty (2008). Proposition de repères en superficies relatives des anthrobiotes des facettes paysagères du modèle SMA/CAS.

| Groupes                                                                                   | Classes                                       | Description sommaire                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Anthromes bâtis, très densément peuplés<br>> 1.000 H/km <sup>2</sup>                   | 01. Anthromes urbains                         | Urbs couvre plus de 65% de la superficie d'une UP urbaine                                                          |
|                                                                                           | 02. Anthromes suburbains                      | Urbs couvre plus de 50% d'une UP urbaine. Urbs est intriqué avec Hortus.                                           |
| II. Anthromes semi-urbains/ruraux, densément peuplés:<br>(100 à 1.000 H/km <sup>2</sup> ) | 03. Petites villes et villages rizicoles      | Ager à riziculture dominante dans plus de 50% d'une UP semi-urbaine/rurale                                         |
|                                                                                           | 04. Petites villes et villages irrigués       | Ager irrigué dans plus de 35% d'une UP semi-urbaine/rurale                                                         |
|                                                                                           | 05. Petites villes et villages agro-pastoraux | Ager partiellement pâturé dans plus de 35% d'une UP semi-urbaine/rurale                                            |
|                                                                                           | 06. Villages d'élevage                        | Ager temporairement pâturé ou Saltus dans plus de 35% d'une UP semi-urbaine/rurale                                 |
|                                                                                           | 07. Villages pluviaux                         | Ager en cultures pluviales ou Saltus dans plus de 35% d'une UP semi-urbaine/rurale                                 |
|                                                                                           | 08. Villages agro-forestiers                  | Mosaïque d'Ager/Saltus et de Silva dans plus de 35% d'une UP semi-urbaine/rurale                                   |
| III. Anthromes ruraux cultivés                                                            | 09. Anthromes ruraux irrigués                 | Ager dans plus de 50% d'une UP modérément peuplée (10 à 100 H/km <sup>2</sup> ) et pratique courante d'irrigation  |
|                                                                                           | 10. Anthromes ruraux agro-forestiers          | Mosaïque d'Ager et Silva dans plus de 50% d'une UP modérément peuplée (10 à 100 H/km <sup>2</sup> )                |
|                                                                                           | 11. Anthromes irrigués peu peuplés            | Ager dans plus de 65% d'une UP peu peuplée (1 à 10 H/km <sup>2</sup> ) et pratique d'irrigation à grande échelle   |
|                                                                                           | 12. Anthromes pluviaux peu peuplés            | Ager en cultures pluviales dans plus de 65% d'une UP peu peuplée (1 à 10 H/km <sup>2</sup> )                       |
|                                                                                           | 13. Anthromes très peu peuplés                | Ager dans plus de 65% d'une UP très peu peuplée (<1 H/km <sup>2</sup> )                                            |
| III. Anthromes ruraux pâturés                                                             | 14. Anthromes ruraux à pâtures                | Ager temporairement pâturé et/ou Saltus dans plus de 50% d'une UP modérément peuplée (10 à 100 H/km <sup>2</sup> ) |
|                                                                                           | 15. Anthromes pastoraux peu peuplés           | Ager temporairement pâturé et/ou Saltus dans plus de 65% d'une UP peu peuplée (1 à 10 H/km <sup>2</sup> )          |
|                                                                                           | 16. Anthromes pastoraux très peu peuplé       | Saltus dans plus de 65% d'une UP très peu peuplée (<1 H/km <sup>2</sup> )                                          |
| IV. Anthromes de Silva                                                                    | 17. Anthromes agroforestiers                  | Silva dans plus de 65% d'une UP peu peuplée (1 à 10 H/km <sup>2</sup> )                                            |
|                                                                                           | 18. Anthromes forestiers                      | Silva dans plus de 65% d'une UP très peu peuplée (<1 H/km <sup>2</sup> )                                           |
| VI. Biomes sauvages                                                                       | 19. Forêts naturelles                         | Forêts boréales et tropicales non peuplées                                                                         |
|                                                                                           | 20. Biomes arbustifs épars                    | Biomes faiblement arborés non peuplés des terres prédésertiques ou de toundra                                      |
|                                                                                           | 21. Déserts                                   | Terres polaires et des déserts                                                                                     |

L'UP émerge finalement comme holon de complexité grâce à la compatibilité des intérêts et aspirations socio-économiques de ses agents ainsi qu'à la pertinence et durabilité de l'aménagement du territoire qu'ils réalisent et partagent. Le tableau 3 propose les types d'attributs prépondérants et des repères pour identifier le pédopaysage d'une UP mésopaysagère et discerner ses FP constitutives de niveau micropaysager. La répartition spatiale des attributs de fertilité des sols et le motif formé par leurs taxons naturels constituent finalement des repères d'identification majeurs dans le modèle SMA/CAS.

**Tableau 3.** Types d'attributs prépondérants et repères descriptifs pour les UP et leurs FP constitutives.

| Type                                         | Repères                                                                                                                            |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Étage altitudinal                            | altitude basse, moyenne, haute                                                                                                     |
| Orographie générale (inclinaison des pentes) | quasi-plat (0 à 2%); ondulé (2 à 8%); vallonné (8 à 16%); accidenté (16 à 30%); abrupt (>30%)                                      |
| Unité géomorphologique                       | zone de: vallée; plaine; plateau; piedmont; colline; montagne                                                                      |
| Séquence topographique                       | sommet; partie haute, basse ou médiane de versant; bas-fond                                                                        |
| Lithologie                                   | sable; loess; grès; schiste; calcaire; granite; basalte, etc. ou complexe structural d'unités lithologiques (structure géologique) |
| Fertilités des sols                          | arrangement spatial des combinaisons d'attributs de fertilité potentielle                                                          |
| Taxons naturels des sols                     | motif ("pattern") de distribution spatiale                                                                                         |

### **Attributs de cadre de vie**

La dimension sociale et environnementale d'une UP tient non seulement dans les interactions des agents de ses anthromes mais également dans le cadre de vie qu'elle représente. Celui-ci est l'expression à la fois du patrimoine naturel et du patrimoine culturel qui fondent tous deux l'identité des populations, en accord avec l'article 5 de la Convention européenne du paysage (CoE, 2000). Le cadre de vie est celui des liens sociaux et du paysage au quotidien. Il signifie aussi les "environs" ou "alentours" au niveau individuel (CoE, 2013). Il participe donc d'une représentation sociale du paysage au sens de Raymond et al (op. cit.). Cette représentation peut revêtir un aspect artistique ou touristique et rendre ainsi compte d'un archétype paysager comportant des éléments du relief, des cours d'eau, des formations végétales et des formes de l'activité agricole, du bâti et des infrastructures, y compris le patrimoine architectural. En tant que cadre de vie, l'unité paysagère est perçue comme *"une portion de territoire embrassée par la vue humaine au sol et délimitée par des horizons visuels"* tels qu'une ligne de crête, une lisière forestière, ou une ligne de rupture de pente (Droeve et al., op. cit.). Une telle perspective s'applique bien en milieu rural mais elle est inadaptée en milieu urbain. Les attributs du cadre de vie d'une UP peuvent se confondre partiellement avec les attributs géomorphopédologiques et altitudinaux mais ils peuvent surtout contribuer à préciser son identité et donc aussi ses limites géographiques. C'est le cas lorsque la ligne d'horizon est masquée par le bâti ou lorsque aucune ligne distincte n'apparaît dans de vastes étendues au relief plat. Des interactions entre le patrimoine naturel et culturel telles que l'esthétique paysagère, les liens et communs sociaux ou les services écosystémiques peuvent alors devenir prépondérantes dans l'émergence des UP.

### **Agents et attributs du niveau macropaysager**

Le niveau macropaysager est celui du "grand ensemble paysager" de Raymond et al. (op.cit.) ou du "territoire paysager" de Droeve et al. (op.cit.). Il s'agit d'un regroupement d'UP contiguës qui ont acquis et partagé les mêmes valeurs socio-économiques pour former en quelque sorte des "pays historiques". Le partage d'une histoire commune signifie d'avoir connu une différenciation et une évolution similaire sinon identique. Il en résulte un facteur anthropique commun représenté par un même type d'anthrome au-delà d'éventuelles limites administratives locales. C'est ainsi qu'émerge le système paysager (SP) dans le modèle SMA/CAS. Il équivaut aussi au "land system" de la FAO (2007, op. cit.), caractérisé par un motif récurrent d'UP (land units). Il est basé sur des adaptations similaires et peut-être en partie mimétique de chaque type d'agent à l'égard des conditions biophysiques des UP constitutives. Ce qui est important pour Raymond et al. c'est que le SP soit identifié et reconnu comme tel par les agents concernés de son périmètre, voire même en dehors à l'échelle régionale ou nationale.

La dynamique des SP passe par des mutations, reconversions et transformations. En Occident, l'avènement de l'agriculture industrielle lors de la deuxième révolution agricole moderne (mi-

XX<sup>e</sup> siècle) s'est traduit par une spécialisation émancipatrice de nouveaux systèmes régionaux tels que cités par Mazoyer et Roudart (2002): celui des grandes cultures (céréales, colza, betterave sucrière, pomme de terre, etc.), en zones relativement planes, aux sols fertiles, telles que les vallées alluviales, les plaines et plateaux limoneux; celui de l'élevage et des herbages, au relief parfois accidenté, à sols lourds, humides ou caillouteux, non ou peu "motomécanisables", tels que les bassins laitiers des plaines argileuses ou les massifs montagneux aux races bovines mixtes ou encore les élevages ovins et caprins des montagnes sèches et plateaux calcaires méditerranéens; celui des zones viticoles (aux multiples terroirs) et celui enfin des régions horticoles à sols légers, se réchauffant vite et faciles à travailler. Toutefois, la seule dimension économique dans un tel processus de spécialisation n'offre pas une résolution suffisante pour percevoir les spécificités culturelles et les traditions de terroirs d'un SP. Un certain nombre de sous-régions doivent d'abord être distinguées. A cet égard, Cholley (1939) cite au sein du Bassin parisien les Champagnes des plaines calcaires, les Gâtines des plaines argileuses, les plaines limoneuses, les plateaux de Bourgogne et de Lorraine et une série de collines comme les côtes de Moselle, les côtes de Meuse, la côte du vignoble champenois, les collines du Pays de Bray, etc. Cholley (op. cit.) évoque au niveau supérieur les régions naturelles plus complexes dont les attributs dérivent d'interactions entre le climat et la structure géologique. Plus récemment et à un niveau encore plus élevé, Sayre et al. (2014) ont délimité 3.960 unités écologiques terrestres par agrégation d'environ 50.000 sous-unités, selon une approche de géographie physique. Ces derniers auteurs visent à la compréhension de la diversité écologique de la planète au niveau global par combinaison du régime climatique, de la géologie, du relief et de l'affectation des sols. Ils reconnaissent de manière explicite l'influence anthropique dans le façonnage des unités et sous-unités écologiques notamment par le degré d'urbanisation et la présence de terres cultivées. Dans le modèle SMA/CAS les agents et attributs du niveau macropaysager sont finalement quasi-identiques à ceux du niveau de l'UP à un simple degré d'échelle près: démultiplication d'un arrangement pédopaysager spécifique et aménagé selon un même type d'anthrome dans un ensemble écotopographique continu. Cet ensemble peut alors inclure et partager un même pôle urbain dont le nom peut servir à nommer le SP.

## Repères dynamiques

La colonisation anthropique d'espaces naturels constitue la systémogénèse paysagère, les premières phases de la "motivation" d'un paysage. Les premières trajections dans des franges pionnières marquent "la naissance du paysage rural, la fondation de villes, la construction d'un réseau de communications, le brassage de races et l'élaboration d'une mentalité régionale" selon Pierre Monbeig, fondateur de l'Institut des Hautes Études de l'Amérique latine, cité par Théry (2006). Ces franges progressent en plusieurs étapes qui relèvent du jeu des éléments naturels ou de crises économiques. La question de l'échec ou de la réussite des "semences urbaines" implantées est rappelée par Théry (op. cit.). Une telle contingence n'est autre que la possibilité d'émergence d'anthromes plus ou moins peuplés qui vont alors amorcer une phase de consolidation (Raynaud, 2003). Cet article-ci défend l'idée qu'une clé du développement d'Urbs réside dans la fertilité de sols favorable à l'Ager<sup>3</sup>. L'émergence d'holons d'Ager précède celle d'Urbs qui est concomitante à celle d'Hortus. A défaut, c'est un enchaînement de trajections vers des anthromes modérément à très peu peuplés qui se produit dans le modèle SMA/CAS. Dans ce cas, ce sont le Saltus et la Silva dans des sols de moindre fertilité qui vont dominer dans les FP d'une UP. Par ailleurs, comme l'évoque aussi Théry (op. cit.), le progrès technique constitue également un facteur clé de "motivation". Des repères historiques de ce progrès sont dès lors utiles pour reconstituer d'autres phases de dynamique paysagère. Les révolutions industrielles et agricoles sont des périodes particulièrement indiquées avant et après une phase pionnière ou de consolidation. Ces révolutions et transitions peuvent donner lieu à une intensification agricole dans l'Ager ou à une phase pionnière secondaire dans le Saltus ou la Silva. Les crises économiques et réformes politiques peuvent engendrer des effets inverses de déprise agricole au profit du Saltus ou de la Silva ou d'extensification dans l'Ager. D'autres repères encore sont évidemment des événements politiques tels que les guerres, les changements de régime, etc. Dans ceux-ci figurent les vagues de colonisation espagnole, portugaise, britannique, française, néerlandaise, belge, etc. Les réformes agraires, les

3 Les villes peuvent émerger et se développer sans Ager proximal mais elles seraient alors dépendantes de voies de communication performantes par la terre ou les mers pour leur approvisionnement.

politiques post-coloniales de coopération au développement, les réformes de la politique agricole commune en Europe, etc. doivent également être citées. Enfin, des chutes ou avènements civilisationnels qui font les grandes subdivisions de l'Histoire sont des repères dynamiques majeurs: l'Antiquité, la chute de l'Empire Romain, le Moyen-Age, les civilisations précolombiennes des Mayas ou des Aztèques, les temps modernes, etc.

## *Repères méthodologiques*

Deux types de modèles sont distingués pour les systèmes en général: descriptif ou explicatif. Le modèle descriptif spécifie leurs états ou trajections actuels ou passés (Sayama, op. cit.). Il a pour vocation de mimer des systèmes existants et doit être soigneusement paramétré avec des données réelles, sur des cas concrets (Parker et al., 2003). Le modèle descriptif incorpore normalement un SIG-logiciel (Système d'Information Géographique) qui permet de relier spatialement les conditions biophysiques et socio-économiques c'est-à-dire d'établir des géoréférences communes aux deux types de données. Le SIG-logiciel permet de visualiser l'hétérogénéité spatiale des territoires et reproduire les trajections représentatives de l'histoire de leurs paysages d'après des chronoséquences de données cartographiques, de scènes satellitaires ou de photographies aériennes. Le SIG-logiciel peut également reproduire des coupes, schémas, blocs-diagrammes 3D.

Le second type de modèle pour un système est qualifié de "régulé" par Sayama (op. cit.). Il permet certes également l'observation de ses états actuels mais il assure en plus une fonction exploratoire d'hypothèses déterministes quant à leur évolution passée et future. Il peut extrapoler dans le futur grâce à un jeu de règles mathématiques (déterministes) ou algorithmiques (analogiques). Ce modèle est qualifié d'explicatif par Parker et al. (op.cit.) et sa vocation est de produire des résultats généralisables à une gamme variée de conditions ou circonstances. Il permet d'explorer une théorie, d'en tester les hypothèses ou d'en générer de nouvelles. Il cible un phénomène empirique et macroscopique comme l'évolution future d'une UP ou d'un SP. Lorsqu'il recourt à une simulation multi-agents (SMA), le modélisateur développe une série de règles, interactions et propriétés pour les agents dans un environnement hypothétique, selon un scénario préétabli. Si le phénomène macroscopique résultant s'apparente au phénomène empirique ciblé alors le modélisateur a découvert au moins un candidat explicatif pour ce phénomène. En somme, les modèles SMA explicatifs pour un phénomène méso- ou macropaysager permettent (1) de tester une théorie ou des hypothèses, (2) d'explorer d'autres causes ou interactions possibles à celles présumées et utilisées pour construire le modèle et (3) de découvrir de nouveaux effets non anticipés. Les repères proposés dans cet article le sont pour un modèle SMA/CAS de type explicatif. Il formule en effet quelques règles explicatives pour les agents qui ont déjà été évoquées et qui sont reprises dans une synthèse théorique.

## **Synthèse théorique**

A ce stade, la série d'hypothèses et de concepts qui ont été énoncés, explicités, rassemblés et ordonnés ébauchent une théorie qui s'énonce comme suit. La systémogenèse paysagère et la motivation et consolidation subséquentes des paysages anthropisés sont des processus empiriques. Ils se déroulent et évoluent tout au long de l'histoire par l'expérience acquise des agents selon leurs aspirations, besoins et coutumes dans des environnements bio-physiques et des conditions socio-économiques changeant. L'expérience s'acquiert par des essais et erreurs. Les résultats se traduisent à la longue en des formes paysagères "formelles", des empreintes, au façonnage desquelles contribuent non seulement des facteurs naturels mais également culturels ou civilisationnels. C'est particulièrement le cas dans le concept de l'UP et du cadre de vie à laquelle il se rattache. Les facteurs naturels et anthropiques interagissent par l'intermédiaire d'un "moule", ce que Berque (op. cit.) appelle la forme "formante". Ce moule est un modèle explicatif en ce qu'il constitue un "code, supposant la conscience d'une règle", mais Berque ajoute qu'il est bien difficile de le discriminer de ce qui est "pratique inconsciente". C'est dans la recherche du code ou du moule qu'ont été choisis des types universels d'anthrobiotes et d'anthromes et qu'ils ont été mis en interaction holonimique avec des attributs de fertilité du sol et des pédopaysages génériques. Leur organisation est hiérarchique à trois niveaux d'holons paysagers en accord avec la théorie de la complexité. Cette organisation est la superstructure du moule du système complexe paysager. Mais des



systèmes urbains, horticoles, forestiers, de culture ou de pâturage de forme "formelle" très variée peuvent s'exprimer comme "empreintes" d'un même moule paysager selon les spécificités culturelles et socio-économiques des agents qui interviennent. De la même manière que des artistes peintres produiraient le portrait d'une personne à partir de son moule servant de modèle. Chaque artiste peindrait un portrait différent, en tant qu'empreinte spécifique à son style, à plusieurs moments de sa vie suivant l'évolution de ce style! Chaque série chronologique de portraits réalisés par un même artiste représenterait la dynamique d'un modèle descriptif en tant que suite d'empreintes du même moule facial. Une autre métaphore possible est celle du génotype et du phénotype d'un paysage, le premier se rapportant à son modèle explicatif, le second à son modèle descriptif. Le modèle explicatif paysager serait ainsi basé sur le couplage génotypique de la fertilité des sols avec des anthrobiotes pour produire les facettes paysagères (FP). Leurs phénotypes descriptifs varient en dimensions, en formes et en natures dans l'espace de chaque unité paysagère (UP) d'un système paysager (SP). Les phénotypes paysagers des FP varient aussi dans le temps selon l'évolution des conditions techniques, socio-économiques et biophysiques. Les génotypes des diverses FP constituent le génome de l'UP et du SP par couplage "génomique" d'un motif pédopaysager avec un type d'anthrome. L'expression "phénomique" des UP et SP varie dès lors aussi dans l'espace et le temps, d'une région à une autre et d'une époque à l'autre. Les ensembles écogéographiques constitués par les UP et SP évoluent en suivant une série de règles d'interactions micropaysagères. Les principales règles proposées sont synthétisées dans l'encadré 3.

#### Encadré 3. Règles de dynamique paysagère écogéographique.

- (1) la fertilité potentielle d'un sol s'exprime certes par une production variable de biomasse saisonnière ou annuelle mais une valeur tendancielle se dégage à moyen terme;
- (2) les anthrobiotes d'Ager sont adaptés et couplés à la longue avec les sols dont la fertilité potentielle génère une meilleure valeur tendancielle en production de biomasse;
- (3) les anthrobiotes d'Urbs se développent avec des anthrobiotes d'Hortus préférentiellement dans des FP d'Ager qui s'en trouvent ainsi transformées;
- (4) les anthrobiotes de Saltus et Silva sont relégués à la marge de ceux d'Urbs, Hortus et Ager;
- (5) les anthrobiotes d'Urbs peuvent également se développer à la marge de ceux d'Ager pour autant qu'ils soient en bonne communication distale;
- (6) la dynamique paysagère est marquée par des tournants historiques d'ordre civilisationnel, politique, économique ou technique;
- (7) la dynamique paysagère est dominée tantôt par des progressions ou régressions de fronts d'Ager par rapport à Silva et Saltus, tantôt par des intensifications ou extensifications d'Ager en rapport ou non avec Saltus ou Silva.

## Observatoires interdisciplinaires du paysage

Du fait de la transformation continue des paysages par les dynamiques rurales et urbaines, le Conseil de l'Europe (CoE, 2013) recommande la mise en place d'observatoires, de centres ou d'instituts dédiés au service de la politique paysagère. Leur missions seraient axées sur l'analyse et le suivi des *"évolutions des techniques de productions agricole, sylvicole, industrielle et minière et des pratiques en matière d'aménagement du territoire, d'urbanisme, de transport, de réseaux, de tourisme et de loisirs, et, plus généralement, les changements économiques"*. Pour l'aménagement du paysage, quatre systèmes de valeurs sont reconnus : économiques, sociales, particulières (attribuées par les populations) et patrimoniales. Dans les disciplines compétentes, le Conseil de l'Europe énumère explicitement l'architecture, la pédologie, l'hydrologie et l'écologie. Du fait des quatre types de valeurs précitées, cet éventail disciplinaire est forcément ouvert aux géographes, agronomes, sociologues, archéologues, anthropologues, etc.

## Échelles et données initiales

Les niveaux micro-, méso- et macropaysagers doivent pouvoir être distingués pour établir un modèle qui tienne compte de la complexité écogéographique des territoires. Les données et documents cartographiques préalables devraient être disponibles à une échelle minimale du

1/50.000<sup>ème</sup>. Des échelles plus grandes du 1/25.000<sup>ème</sup> voire du 1/10.000<sup>ème</sup> pourraient s'avérer nécessaires au niveau de plans ou de secteurs d'aménagement du territoire des UP (Droeven et al., op.cit.). L'échelle de connaissance des paysages préconisée en France pour les atlas est le 1/100.000<sup>ème</sup> et devrait se baser sur des analyses de terrain au 1/25.000<sup>ème</sup> sauf dans les parties urbaines où le 1/10.000<sup>ème</sup> voire le 1/5.000<sup>ème</sup> peuvent s'avérer nécessaires (Raymond et al., op. cit.). Dans le modèle SMA/CAS, les données cartographiques et de télédétection aérienne ou satellitaire préalables sont celles relatives à la topographie, l'hydrologie, la géologie, la pédologie et l'occupation des sols. Les données pédologiques doivent permettre de déduire directement ou indirectement les attributs micropaysagers de fertilité des sols repris dans les encadrés 1 et 2. De même pour les données d'occupation des sols en ce qui concerne l'identification des anthrobiotes micropaysagers d'Ager, Saltus, Silva, Urbs et Hortus. Si des lacunes ou des doutes transparaissent, des observations et enquêtes complémentaires de terrain sont réalisées et le cas échéant des échantillons de sols prélevés pour compléments d'analyses de laboratoire. Il faut aussi que soient clairement distingués l'Ager prairial du Saltus et que tous les attributs de fertilité du sol d'une même FP puissent être diagnostiqués. Du point de vue dynamique, l'échelle temporelle de l'évolution des paysages peut être très vaste et remonter au début de l'Holocène avec la céréaliculture et même une partie du Pléistocène si l'on se réfère à Tassin (2014). Cet auteur évoque en effet la végéticulture de l'igname et du taro dans les climats tropicaux humides par le seul bouturage depuis près de 70.000 ans. Ce temps long est suffisant pour modéliser en grande partie les pédopaysages et dater les artefacts archéologiques enfouis dans les sols. Une reconstitution historique en fonction des différents types de repères dynamiques énoncés plus haut dépend de la documentation disponible dont une recherche spécifique est une tâche à prendre en charge par l'observatoire du paysage.

## Outil SIG-logiciel pour exploration et validation du modèle SMA/CAS

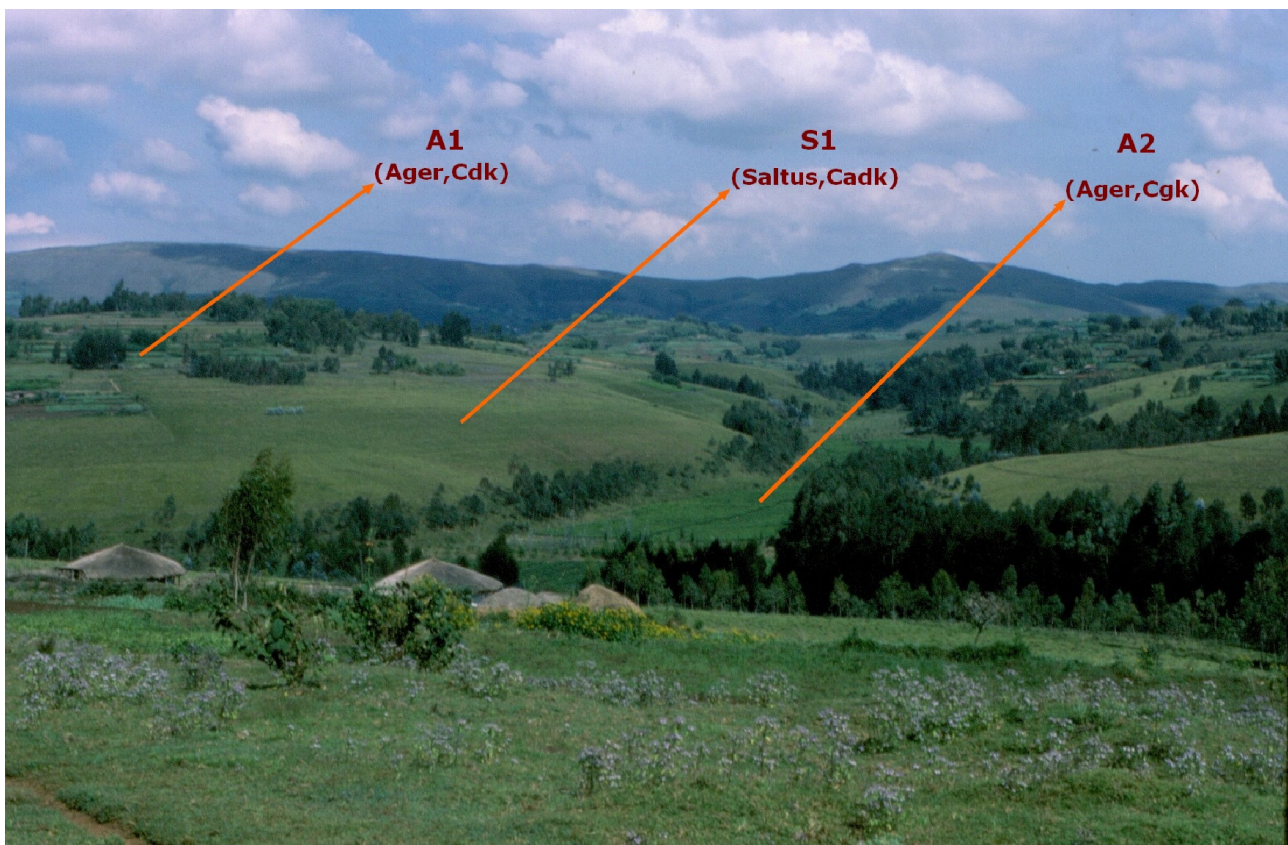
Les différents jeux de données écogéographiques et autres sont par définition multi-sources mais sont rassemblées et géoréférencées dans un système de gestion de bases de données (SGBD). Ce dernier peut également contenir des données de types archéologiques, patrimoniales, architecturales, urbanistiques, etc. Ces types multiples de données deviennent alors interopérables via des logiciels qui y donnent accès et en permettent aussi la mise à jour, la combinaison, le croisement et autres traitements nécessaires grâce à un outil SIG-logiciel. Un tel type d'outil est de plus en plus répandu et utilisé comme aide à la décision, notamment en matière de gestion de l'environnement (Engels et al., 2004) et dans des études écorégionales des systèmes agraires (Castella et al., 1999; Castella, 2005). Une infrastructure et architecture informatique adaptées devraient permettre par ailleurs de faciliter et d'améliorer les flux d'informations et messages entre les agents des trois niveaux hiérarchiques de l'organisation paysagère.

L'outil SIG-logiciel doit permettre d'identifier les SP et de procéder à leur délimitation préliminaire, de même que les UP et FP sous-jacentes. Il s'agit de disposer de programmes orientés objets selon les 3 types d'holons concernés et ce à partir des attributs spatialisés dans le SGBD. Le but est de produire le jeu de données nécessaires pour modéliser l'état actualisé c'est-à-dire les trajectoires actuelles dans le modèle SMA/CAS, correspondant à la date des données disponibles pour l'occupation des sols. Les 3 types de zonages micro-, méso- et macropaysagers définissent la trajectoire actualisée des SP dans le périmètre d'étude. Le SIG-logiciel permet aussi d'identifier les types d'agents correspondants à chaque niveau d'échelle, via les anthrobiotes et anthromes identifiés.

Un important traitement des données consiste à établir le degré de couplage actuel entre les anthrobiotes et les attributs de fertilité des sols dans tout SP pour tester l'hypothèse du déterminisme partiel de la fertilité des sols au niveau micropaysager des FP. Il s'agit de calculer les corrélations entre les superficies occupées par chaque type d'anthrobiote et celles des diverses combinaisons des attributs de fertilité des sols correspondantes pour chaque UP et SP du périmètre. Les résultats doivent être soumis à discussion et validation par les agents mis en réseau grâce au SIG. Enfin, le SGBD peut être complété par des données historiques, schémas, bloc-diagrammes 3D et les discussions élargies et enrichies avec les disciplines réunies dans un observatoire des paysages. Des programmes de simulation prospective pourraient alors être élaborés en tenant compte de facteurs autres que strictement écogéographiques tels que ceux de type architectural, culturel, etc.

## *FP de régions agropastorales d'altitude au Burundi*

L'écogéographie paysagère n'a pas encore acquis une quelconque reconnaissance pragmatique. Il est rare de trouver des références bibliographiques qui intègrent des données de fertilité du sol sur une épaisseur de plus de 20 cm et la description de leurs anthrobiotes en des sites géographiques typiques. Ni les expérimentations agronomiques, ni les études écologiques ou géographiques n'en rendent compte. Les observations et caractérisations réalisées dans les régions agro-pastorales d'altitude du Burundi par Opdecamp (1988) permettent cependant d'illustrer quelques FP représentatives selon les repères de modélisation proposés. Dans une région naturelle comme le Bututsi ou la moitié Sud du Mugamba, à des altitudes comprises entre 1.700 et 2.500 m, des anthromes ruraux à pâtures et des villages d'élevage à habitat dispersé composent la plupart des UP. Le climat est humide (Précipitations >1.000 mm/an) mais comporte une saison sèche de 3 à 4 mois. Trois facettes paysagères (FP) sont le plus souvent identifiées dans une orographie générale vallonnée formée de collines. La première FP est dominante. Elle se caractérise par un Saltus couplé à des sols à toxicité aluminique sur les parties médianes et basses des versants. Le Saltus est caractérisé par une formation graminéenne (poacéenne) à "Eragrostis olivacea" exploitée comme parcours pour des Zébus de race Ankole. Ce Saltus est systématiquement exploité dans des sols dont les attributs de fertilité (voir encadrés 1 et 2) sont diagnostiques d'un matériau argileux (C) à toxicité aluminique (a), soumis à une aridité saisonnière (d) et à faible réserve en nutriments minéraux (k). La deuxième FP représentative se situe dans la partie supérieure des versants et au sommet des collines. Elle se compose d'un Ager couplé à des sols similaires à la première FP mais un peu moins acides et ne présentant pas de toxicité aluminique (Cdk). L'Ager est axé sur des cultures vivrières d'auto-subsistance comme le bananier, le haricot ou le pois, le maïs, le sorgho, la patate douce, etc. Une troisième FP peut-être présente dans les bas-fonds mal drainés ou un Ager de vivres en saison sèche et de jachère en saison des pluies est couplé à des sols dont la formule de fertilité est "Cgk" (sans aridité saisonnière ni toxicité aluminique mais à mauvais drainage). De plus des bosquets d'arbres parsèment l'Ager sommital et se concentrent en bordure des bas-fonds. La photo 1 illustre ces trois FP représentatives des SP du Bututsi et du Sud du Mugamba.



**Photo 1.** Photographie reproduisant les trois FP représentatives des régions agropastorales d'altitude du Burundi, d'après des données de Opdecamp (1988).

L'intérêt d'un tel modèle écogéographique est de dévoiler la structure pédopaysagère sous-jacente et de comprendre que les agriculteurs-éleveurs de ces SP ont pu optimiser l'affectation des sols en tenant compte de leur tradition pastorale, de leur besoins vivriers et en bois énergie. Ce modèle est aussi explicatif en ce sens qu'il permet d'évaluer la pertinence d'aménagements alternatifs de tels territoires. Ainsi le recours à des chaulages récurrents serait-il incontournable si l'on souhaitait convertir le Saltus en Ager sauf si l'on utilise des espèces résistantes à l'aluminium comme le théier qui n'est ni fourrager ni vivrier. L'intensification de l'élevage par de l'Ager prairial ou fourrager sur le Saltus existant nécessiterait des débouchés importants car les coûts des amendements calcaires et de la fertilisation doivent être compensés. Les SP ne peuvent pas absorber la croissance démographique car l'Ager vivrier traditionnel y est limité en superficie. Les régions concernées sont d'ailleurs parmi les moins peuplées du Burundi et connaissent l'émigration.

## Conclusions

Les repères conceptuels et méthodologiques d'une modélisation des paysages sont rassemblés, adaptés et ordonnés. Ils permettent d'envisager une R&D interdisciplinaire avec une participation des agents ruraux ou urbains selon une simulation multi-agents (SMA) dans les changements d'affectation des sols (CAS). Un Système d'Information Géographique (SIG) est préconisé et ses données multi-sourcées nécessaires sont spécifiées. Ce SIG doit permettre un accès et un traitement aisé des informations et offrir simultanément un moyen de communication entre les agents. Le modèle est basé sur l'organisation hiérarchique de la complexité des paysages en niveaux d'holons "micro", "méso" et "macro". Ils correspondent à l'émergence respective de facettes paysagères (FP), d'unités paysagères (UP) et de systèmes paysagers (SP). C'est un modèle explicatif, c'est-à-dire régulé. Outre son caractère holistique, son originalité principale réside dans les couplages micropaysagers basés sur les phénomènes de fertilité à la fois physique, chimique et biologique des sols, perçus par l'interaction entre leurs attributs inhérents et les anthrobiotes antiques et génériques de Ager, Saltus et Silva. Le couplage est indirect avec Urbs et Hortus. Des repères de la dynamique historique des paysages sont évoqués, d'ordre civilisationnel, politique, économique et technique. Des phases pionnières et de consolidation se succèdent ainsi que d'intensification et d'extensification. Elles impliquent des interactions latérales entre les FP. Le modèle résulte ainsi d'une démarche continuée d'écogéographie dans laquelle les holons de complexité regroupent tous les compartiments de l'écosphère, tant épigés que hypogés. Le modèle comble certaines lacunes propres aux visions partielles adoptées par la plupart des approches paysagères existantes. Il peut s'intégrer aisément dans un observatoire des paysages et bénéficier des résultats obtenus dans les atlas. Illustré par quelques facettes paysagères dans les régions agropastorales d'altitude du Burundi, il laisse entrevoir sa puissance de lecture de l'affectation traditionnelle des sols et son pouvoir d'aide à l'évaluation des scénarios d'aménagement alternatifs dans une perspective de développement durable.

## Bibliographie

Afes (Association française pour l'étude du sol), 2009, *Référentiel pédologique 2008*, Versailles, Quæ.

Allen T.F.H., Starr T.B., 1982, *Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity*, Chicago, University of Chicago Press.

Angelier E., 2008, *Les sciences de la complexité et le vivant*, Paris, Tec & Doc (Lavoisier).

Bardinet, C., 1983, "L'éco-géographie, J. Tricart et J. Kilian", *Annales de Géographie*, tome 92, n°510, 218-220. <[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo\\_0003-4010\\_1983\\_num\\_92\\_510\\_20179\\_t1\\_0218\\_0000\\_2](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1983_num_92_510_20179_t1_0218_0000_2)>

Berque A., 1987, "Milieu et motivation paysagère", *Espace géographique*, tome 16, n°4, 241-250. <[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/spgeo\\_0046-2497\\_1987\\_num\\_16\\_4\\_4266](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/spgeo_0046-2497_1987_num_16_4_4266)>



Blackmore S., Godwin R.J. and Fountas S., 2003, "The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years", *Biosystems Engineering*, 84(4), 455–466.

Blandin P., Lamotte M., 1989, "L'organisation hiérarchique des systèmes écologiques", in: Montalenti G., Renzoni A., Anelli A. (Ed.), *Ecologia, Atti VII, Alti dei terzo congresso nazionale della Società italiana di Ecologia (Siena, 21-24 ottobre 1987)*: 35-48.

Blandin P., 1992, "De l'écosystème à l'écocomplexe", in: M. Jollivet (dir.), *Sciences de la nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontière*, Paris, CNRS éditions, 267-279.

Buol S. W., Hole F. D., McCracken R. J., Southard R. J., 1997, *Soil genesis and classification*, 4th ed. Ames, IA: Iowa State University Press.

Castella J-C., 2005, "Une méthode d'analyse multi-échelle des transitions agraires. Application aux zones de montagne dans le Nord du Viêt-nam", *L'Espace géographique*, 4, 34, 351-366, <<http://www.cairn.info/revue-espace-geographique-2005-4-page-351.htm>>.

Castella J-C., Husson O., Doanh L.Q., Tuan H.D., 1999, "Mise en œuvre de l'approche écorégionale dans les montagnes du bassin du fleuve Rouge au Vietnam. Le projet Systèmes agraires de montagne", *Les Cahiers de la Recherche Développement*, 45, 114-134, <<http://agritrop.cirad.fr/264368/>>

Cholley A., 1939, "Régions naturelles et régions humaines", *L'information géographique*, Volume 4 n°2: 40-42 <[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ingeo\\_0020-0093\\_1939\\_num\\_4\\_2\\_5013](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ingeo_0020-0093_1939_num_4_2_5013)>

Collins J.P., Kinzig A., Grimm N.B., Fagan W.F., Hope D., Wu J. and Borer E.T., 2000, "A new urban ecology. Modeling human communities as integral parts of ecosystems poses special problems for the development and testing of ecological theory", *American Scientist*, 88: 416-425.

CoE - Conseil de l'Europe, 2000, *Convention européenne du paysage*, <<http://conventions.coe.int/Treaty/fr/Treaties/Html/176.htm>>

CoE - Conseil de l'Europe, 2013, Glossaire du système d'information du Conseil de l'Europe de la convention européenne du paysage, L6, <<http://www.coe.int/fr/web/landscape/landscape-observatory>>

CAU 65 (Conseil en Architecture, Urbanisme et Environnement des Hautes-Pyrénées), 2015, *Clefs de lecture des paysages Hauts-Pyrénéens*, <<http://www.caue-mp.fr/espace-ressources/atlas-des-paysages-des-hautes-pyrenees/itemid.html>>

Droeven E., Feltz C. et Kummert M., 2004, *Les territoires paysagers de Wallonie*, Ministère de la région wallonne, Namur, Études et Documents, CPDT, 4.

Ellis E.C., Ramankutty N., 2008, "Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world", *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6, 439–447: <http://dx.doi.org/10.1890/070062>

Engels P., Bock L., Hecq P et Opdecamp L., 2004, "Développement de systèmes spatiaux d'aide à la décision en environnement : applications de l'Outil GéoEnvironnemental d'Aide à la Décision (OGEAD) valorisant les données sols", *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 8 (2), 95–100, <<http://www.pressesagro.be/ojs/index.php/base/article/view/216>>

FAO, 2007. *Land evaluation. Towards a revised framework*, Land and water discussion paper 6, Rome, FAO.

FAO; 2014. *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World soil resources report 106. Rome, FAO.

Koestler A., 1969. "Beyond atomism and holism: the concept of the holon", in Koestler A. et Smities J.R. (eds), *Beyond reductionism: new perspectives in the life sciences*, London, Hutchinson, 192-216.

Janin R., 2015, "Agriculture, la révolution urbaine", *Openfield*, numéro 4: <<http://www.revue-openfield.net/2014/11/26/agriculture-la-revolution-urbaine/>>

Lesne A., 2008, "Déterminisme et aléatoire dans les systèmes complexes: un faux débat ?" in Bourguin P., Chavalarias D., Cohen-Boulakia C. (Dir.), *Déterminismes et complexités: du physique à l'éthique, autour d'Henri Atlan*, Paris, La Découverte, 45-56, <<https://www.cairn.info/determinismes-et-complexites--9782707150905.htm>>.

Mazoyer M. et L. Roudart, 2002, *Histoire des agricultures du monde*, Paris, Seuil.

McBratney A.B., Mendoça Santos M.L and Minasny B., 2003, "On digital soil mapping", *Geoderma*, 117, 3-52.

Melnik A., 2008, "Ecological analysis of landscapes", in Commission of Cultural Landscape of Polish Geographical Society, Sosnowiec, *Methodology of landscape research, Dissertations Commission of Cultural Landscape*, 9: 151-169.

Mueller L., Schindler U., Mirschel W., Shepherd T.G. , Ball B.C. , Helming K., Rogasik J., Eulenstein F. and Wiggering H., 2010, "Assessing the productivity function of soils. A review", *Agron. Sustain. Dev.*, 30, 601-614.

Opdecamp L., 1988. *Mécanismes de pédogenèse acide dans les régions agro-pastorales d'altitude du Burundi*, Note technique ISABU, Bujumbura, publication n° 127.

Panneton B., Brouillard M. et T. Piekutowski T., 2002, "Gestion de séries pluriannuelles de cartes de rendement", *Canadian Biosystems Engineering / Le génie des biosystèmes au Canada*, 44, 7.23-7.29.

Parker D.C., Manson S.M., Janssen M.A., Hoffmann M.J. and Deadman P., 2003, "Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review", *Annals of the association of american geographers*, 93(2): 314-337.

Poux X., Narcy J.-B. et Ramain B.; 2009a, "Le saltus: un concept historique pour mieux penser aujourd'hui les relations entre agriculture et diversité", *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n° 57, 23-34.

Poux X., Narcy J.-B. et Ramain B.; 2009b, "Réinvestir le saltus dans la pensée agronomique moderne: vers un nouveau front éco-politique?", *L'Espace Politique*, Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique, 9,3, <<https://espacepolitique.revues.org/1495>>

Raymond R., Luginbühl Y., Seguin J-F et H. Grare, 2015, *Les atlas du paysage. Méthode pour l'identification, la caractérisation et la qualification des paysages*, République française, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie: <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-methode-des-Atlas-de-paysages.html>>

Raynaud C., 2003, "Les systèmes agraires antiques: quelle approche archéologique?", in *Revue archéologique de Picardie*, 1, 1, 281-298, <[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/pica\\_0752-5656\\_2003\\_num\\_1\\_1\\_2373](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/pica_0752-5656_2003_num_1_1_2373)>

- Rossi G., 2000, *L'ingérence écologique. Environnement et développement rural du Nord et du Sud*, Paris, CNRS éditions.
- Rossiter D.G., 1996, "A theoretical framework for land evaluation", *Geoderma*, 72, 165-202.
- Sanchez P.A., Palm C.A. and Buol S.W., 2003, "Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics", *Geoderma*, 114, 157-185.
- Sayama H., 2015, *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*, OpenSUNY textbook, <<http://textbooks.opensuny.org/introduction-to-the-modeling-and-analysis-of-complex-systems/>>
- Sayre R., Dangermond J., Frye C., Vaughan R., Aniello P., Breyer S. et al.; 2014, *A new map of global ecological land units — An ecophysiographic stratification approach*, Washington, DC, Association of American Geographers: <[http://www.aag.org/cs/global\\_ecosystems](http://www.aag.org/cs/global_ecosystems)>
- Simon H.A., 1977, "How complex are complex systems", in Suppe F. and Asquith P.D. (eds.), *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, vol. 2, 507-522.
- Soil survey staff, 2014, *Keys to soil taxonomy*, Twelfth edition, United States Department of Agriculture, National Resources Conservation Service.
- Tassin J., 2014, *Qui a peur des espèces invasives?*, Paris, Odile Jacob.
- Théry H., 2006, "Brésil: Franges pionnières d'hier et d'aujourd'hui", in Zagefka P. (dir.), *Amérique Latine 2006 n 5233-34*, Paris, Documentation Française, 113-129, <<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00150592>>
- Timlin D.J., Pachepsky Y., Snyder V.A. and Bryant R.B., 1998, "Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62, 764-773.
- Tricart J., 1965, *Principes et méthodes de la géomorphologie*, Paris, Masson.
- Tricart J., 1994. *Écogéographie des espaces ruraux*, Paris, Nathan.
- Vanderpooten M., 2012, *3000 ans de révolution agricole. Techniques et pratiques agricoles de l'Antiquité à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle*, Paris, L'Harmattan.
- Vidal R., 2011, "Construire des territoires partagés entre la ville et l'agriculture", in: Conseil Régional de Bretagne (Rennes), *Entre ville et campagne, un paysage à inventer*, Coll. "Ateliers techniques du paysage", 13-36.
- Wu J., 1999, "Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder", *Can. J. Remote Sens.*, 25, 4, 367-380.
- Zinck J.A., 2013, *Geopedology. Elements of geomorphology for soil and geohazard studies*, ITC special lecture notes series, Enschede, The Netherlands.
-