

Conception holistique et multiscale de la complexité écosystémique des territoires

Holistic and Multiscale Conception of Land Ecosystems Complexity

Version du 20 mars 2015

Luc Opdecamp, "L'agronome philosophe" <<http://www.agrophil.org>>

Résumé

Une synthèse des concepts écologiques fondamentaux et de l'organisation spatio-temporelle des écosystèmes est proposée par une approche holistique de la complexité. Une attention particulière est accordée au concept central d'holon. Les espaces géographiques biophysiques et sociaux y sont irréductiblement incorporés. La théorie hiérarchique est passée en revue dans sa double perspective des interactions entre niveaux d'échelle et entre holons de même niveau scalaire. La stratégie de son application est basée sur l'agrégation des parties du bas vers le haut ou sur leur décomposition du haut vers le bas. La nécessité d'une démarche interdisciplinaire impose un choix commun de l'étendue et de la granularité du domaine focal et de ses niveaux adjacents pour minimiser les distorsions spatio-temporelles. Les principales propriétés émergentes se situent dans la spécificité des paysages, le développement socio-économique et la résilience propre aux systèmes complexes adaptatifs. L'un ou l'autre cas est évoqué et les perspectives discutées.

Mots clé: écologie, facteur anthropique, occupation et utilisation du sol, système complexe, agrégation, hiérarchisation, interaction, dynamique spatio-temporelle, dynamique non-linéaire, émergence

Abstract

Synthesis of basic ecological concepts and of ecosystems spatiotemporal organization is proposed by a holistic approach to complexity. Close attention is given to the core concept of holon. Biophysical and social geographic areas are irreducibly incorporated in it. The hierarchical theory is reviewed in its dual perspective of interactions between scale levels and between holons at the same scale. Strategy of its application is based on bottom-up patches aggregation or top-down decomposition. Need for an interdisciplinary approach imposes a common choice of domain extent and granularity of the focal and adjacent levels to minimize time-space distortions. The main emergent properties are remarkable landscapes, socio-economic development and resiliency of complex adaptive systems. One or other case is mentioned and prospects are discussed.

Keywords: ecology, anthropogenic influence, land use and land cover, complex system, aggregation, hierarchy, interaction, self-organizing system, space-time, non-linear dynamic, emergence

De l'écosystème à l'écocomplexe

Les systèmes complexes écologiques se caractérisent par un grand nombre de parties (éléments, composants, agents) en interaction dans le temps et en connexions proximales ou distales dans l'espace tant physique que social. Ces parties peuvent s'organiser sous l'action de forces de cohésion pour générer de nouvelles propriétés inattendues dites émergentes. Le caractère spatio-temporel de ces systèmes exige une approche à plusieurs échelles d'espace et de temps pour comprendre les fonctions assurées et les structures formées par les interactions de leurs objets actifs et évolutifs.

L'écosystème des écologues est un exemple connu et fécond du point de vue épistémique. Il est défini par Tansley (1935) comme constitué par son biome, les communautés végétales et animales, ainsi que par son environnement c'est-à-dire ses caractéristiques mésologiques. Il est ainsi caractérisé à la fois par son climat (complexe climatique régional), par son "complexe sol" (pédopaysage) et par le facteur biotique dont l'homme constitue l'agent le plus puissant. L'objet écosystémique est ainsi un objet holistique de l'écosphère, en 3 dimensions, à la fois processant et processé en permanence, via de multiples interactions telles qu'illustrées à la [figure 1](#). À côté d'écosystèmes autogéniques, différenciés par l'action prépondérante des plantes sur leur habitat, Tansley (op.cit.) distingue les écosystèmes allogéniques, où des facteurs externes d'évolution sont prépondérants et en particulier les écosystèmes anthropogéniques. Un autre courant de type "organiciste", assimile l'écosystème à un super-organisme. Il est d'ordre plus philosophique et critiqué par Tansley.

Larrère C. et R. (2009, p.137-138) attribuent à Odum (1953) la synthèse du concept d'écosystème selon ces deux courants. Il en a fait le paradigme de l'écologie écosystémique. Si elle s'affiche comme holiste en préconisant des modèles cybernétiques de réseaux trophiques de transferts de matière et d'énergie, c'est en fait une systémique analytique et réductionniste d'après Blandin et Dergandi (1997): les propriétés émergentes propres au holisme ne sont pas perçues par Odum qu'il confondrait avec des propriétés collectives purement additives. Le paradigme "odumien" pourrait dès lors se qualifier de "*pseudo-holiste*" ou de "*crypto-réductionniste*". Par ailleurs, Larrère C. et R. (p. 141-142) constatent que l'écologie écosystémique s'est révélée "*incapable d'intégrer l'homme dans ses recherches*", à contrario des intentions de ses promoteurs (Odum et Tansley). Cette lacune est également relevée par Blandin et Dergandi (op. cit.) qui en appellent à l'interdisciplinarité et relèvent à ce propos les perspectives intéressantes du développement de l'écologie des paysages (*landscape ecology*).

Chouquer (2003) fournit un aperçu de ce nouveau type d'écologie dans sa recension de l'ouvrage de Françoise Burel et Jacques Baudry dédié à ses évolutions récentes. En réaction à l'écologie écosystémique sans humains, mais aussi sans espace, c'est une écologie qui se concentre sur le facteur anthropique comme principal agent organisateur de l'hétérogénéité spatiale des milieux et de son évolution temporelle. Chouquer remarque que le concept

de "niche écologique" n'était pas un espace géographique et matériel mais seulement un espace mathématique. La notion de paysage est dès lors empruntée à la géographie physique et la théorie des perturbations permet de "*faire une place aux hommes et aux sociétés*". Chouquer considère cependant qu'il y a lieu d'approfondir les bases épistémologiques et de dépasser le modernisme qui sépare l'objet et le sujet, car le paysage y est conçu comme séparé de ses représentations, ignorant ainsi le "*courant culturaliste qui l'a réfléchi, produit et pensé*" au cours de son histoire et qui font partie de sa mémoire. Une mémoire, précisent Larrère C. et R. (2009, p.149) qui contient, en citant Lepart (1997), les traces des perturbations passées et se traduit par les bancs de graines et diaspores enfouies, par la structure d'âge et la structure génétique des populations végétales, par les caractéristiques du milieu et de l'environnement. Pour Chouquer le paysage constitue aussi un niveau intermédiaire entre celui plus bas des individus et des groupements d'espèces et celui plus haut du biome qui l'englobe, tel que postulé par la théorie hiérarchique (voir plus loin).

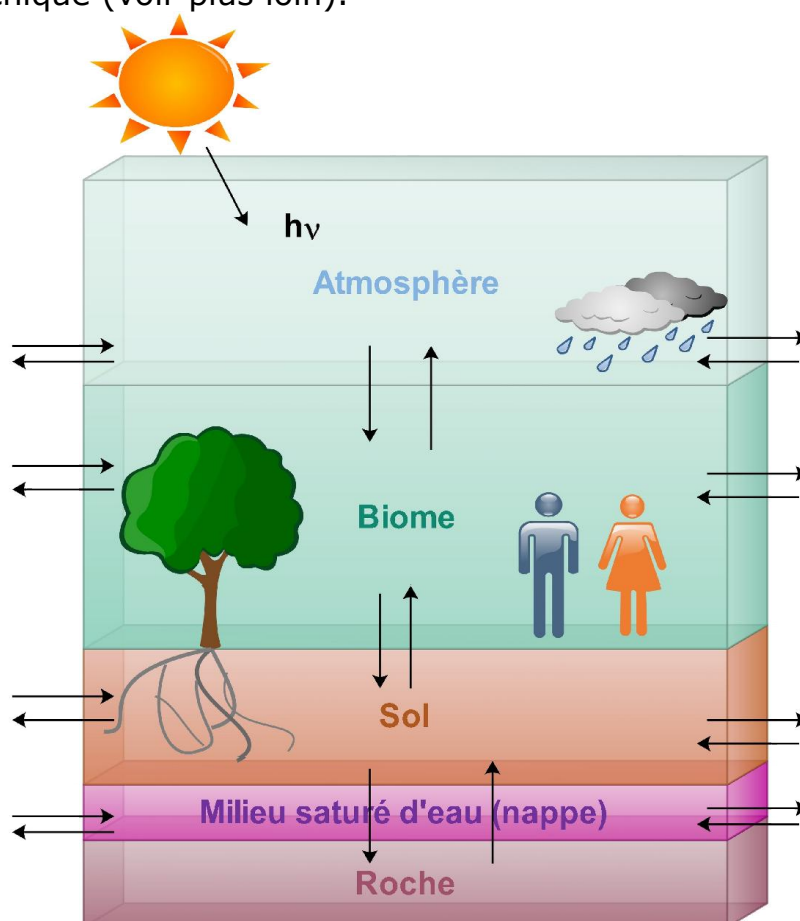


Figure 1: Interactions internes et externes de l'objet écosystémique

Dans la reconnaissance d'objets locaux, c'est à Bertrand (1982) que l'on doit par ailleurs le concept de géosystème. Blandin (1992) précise qu'il est directement inspiré de l'écosystème des écologues et s'applique à la géographie physique. Selon lui, il ne satisfait cependant pas unanimement au besoin de délimitation spatiale souhaitée parce que ses limites géomorphologiques sont parfois trop restrictives, lorsque que par exemple

l'histoire humaine joue un rôle prépondérant sur la physiographie. D'autre part, les géographes soviétiques l'appréhendent comme une entité "motif" certes tridimensionnelle mais abstraite à la manière de l'écosystème "odumien". Quant au concept de "paysage", il souffre, toujours selon Blandin, d'un "trop plein" de significations selon les disciplines qui l'utilisent. Aussi, propose-t-il le concept d'écocomplexe pour délimiter un système d'écosystèmes tenant compte du rôle façonneur d'une histoire humaine particulière et qui peut correspondre dans certains cas simples aux limites clairement inscrites dans l'espace d'une entité géomorphologique, comme un bassin versant et ses dépendances amont-aval d'écosystèmes. L'écocomplexe est donc un concept à la fois structurel et fonctionnel qui se situe de surcroît à un niveau hiérarchique englobant les divers écosystèmes spatialement concrets et partageant une histoire particulière de sociétés humaines. Mais il doit aussi être considéré comme transitoire, c'est-à-dire évolutif, ce dont témoigne déjà son passé.

Dans les systèmes complexes écologiques, certaines parties sont donc des objets spatiaux (portions d'espace géographique) et d'autres des sujets humains isolés ou des groupes sociaux locaux en interactions avec les objets spatiaux. Les sujets humains transforment ou maintiennent les objets dans divers états tels que des infrastructures (routes; immeubles; villages; divers espaces urbains, industriels, commerciaux, etc.) et des écosystèmes plus ou moins anthropisés (cultivés, pâturés, boisés), comme illustré à la figure 2. Il est important de relever que les objets sont ouverts sur leur environnement, leurs limites sont dès lors tracées en pointillé car elles sont métastables, temporaires. Les états des objets se réfèrent ainsi à des entités dynamiques ou "occurents" selon la terminologie de Camara et al. (2012). Le Moigne (2006, p. 63-64) rappelle cependant que le pôle ontologique (analytique, organique, structurel) n'est que l'une des 3 pôles à partir desquels on peut définir les objets, et qu'il existe aussi un pôle fonctionnel (physiologique, expérimental, praxéologique) et un pôle historique (morphogénétique, évolutif). La définition de l'objet est triangulaire: ce qu'il est (ontologique, structurel), ce qu'il fait (fonctionnel) et ce qu'il devient (génétique, historique).

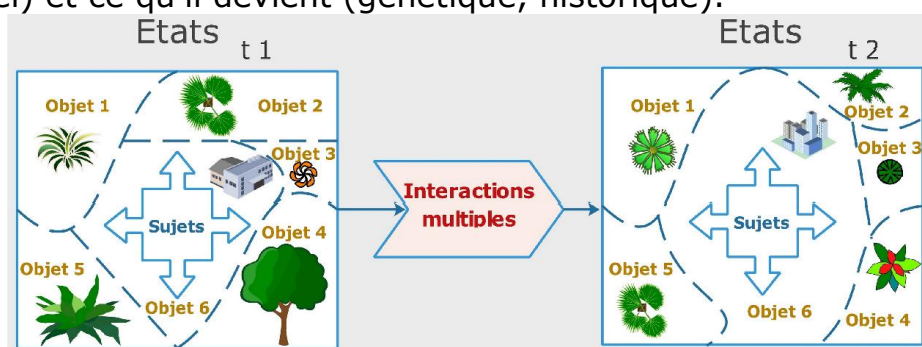


Figure 2: Changements d'états par interactions sujets-objets dans un écocomplexe

Pour Le Moigne (p. 90 et suivantes) les interactions sujets-objets et objets-environnement engendrent des processus par lesquels les objets sont processés par des processeurs (objets processants). Les processus peuvent être modélisés selon un référentiel triadique "TEF": Temps, Espace, Forme (ou

morphologie). La distinction entre processus (qui subissent) et processeurs (qui exercent) y est primordiale. Les objets animés peuvent être à la fois soumis à un processus et être actifs dans un autre processus.

Wu (1999) relève que si la difficulté d'appréhender de tels systèmes est due au nombre élevé de parties, elle réside surtout dans la complexité des interactions entre ces parties. Ces interactions peuvent en effet donner lieu à d'innombrables processus et à une forte hétérogénéité d'états et de configurations dans le temps et l'espace. Les géosystèmes complexes suivent une trajectoire résultante globale non linéaire dont l'allure passée leur confère une "histoire", une "mémoire" comme déjà évoqué précédemment.

Les interactions sujets-objets, objets-objets et sujets-sujets génèrent deux types de données: biophysiques d'une part et socio-économiques d'autre part, ce qui pose un défi méthodologique. Bal et al. (1999) signalent en effet qu'ils peuvent se traiter selon deux paradigmes différents, l'un positiviste pour les lois de la nature, l'autre constructiviste pour les phénomènes sociaux. Mais l'approche holistique ou le paradigme systémique constructiviste fournit un cadre méthodologique plus adapté à l'interdisciplinarité nécessaire lorsque le facteur humain est réintégré dans les lois de la nature.

La théorie hiérarchique ou multiscalaire

Wu (1999, op. cit.) distingue trois types de complexités pour les systèmes écologiques:

- la simplicité organisée qui caractérise des systèmes à nombre faible de parties significatives et dont les interactions sont déterministes, c'est-à-dire analytiquement mathématisables;
- la complexité désorganisée dont le nombre élevé de parties provoque un comportement aléatoire pouvant être traité par des méthodes statistiques;
- la complexité organisée qui caractérise la plupart des systèmes écologiques dont le comportement est non aléatoire ou dont le nombre intermédiaire de parties significatives est soit trop élevé pour être traité de manière mathématico-analytique, soit inadéquat pour faire l'objet d'un traitement statistique traditionnel.

C'est pour cette complexité organisée que l'approche systémique s'est aussi développée et 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. Angelier (2008, p. 85-97) précise ainsi que deux mécanismes contribuent à la stabilité des systèmes complexes, en particulier les systèmes vivants, à savoir: (1) l'existence de sous-systèmes, de modules intermédiaires, relativement autonomes et appelés tantôt holons, tantôt intégrons, et (2) des connexions entre holons par paliers ou niveaux hiérarchiques successifs. Le terme de "holon" vient de Koestler (1969) pour désigner selon Le Moigne (op. cit., p. 107) "*des agrégats insécables*", des "*processeurs irréductibles et polyfonctionnels tels que si on les fait intervenir pour assurer une fonction, on entraîne ipso facto l'activation potentielle de toutes leurs autres fonctions*". Les paliers hiérarchiques peuvent également

être considérés comme des niveaux d'échelle pour les géosystèmes. À tous ces niveaux les lois de la systémique sont d'application, c'est-à-dire à chaque holon ou à chaque ensemble d'holons "frères" d'un même palier ou d'une même échelle. Par comparaison avec les êtres vivants, les organites d'une cellule sont des sous-systèmes complexes des cellules et fonctionnent comme des unités autonomes selon leurs processus spécifiques opérant par interactions internes. De même pour les cellules (niveau supérieur aux organites) qui forment des tissus (systèmes musculaires, osseux, nerveux), des organes (cerveau, coeur, poumons) puis un organisme complet aux divers niveaux scalaires ou d'échelle correspondants. Toutefois, le type d'holon concerné dans la complexité écosystémique ne sépare jamais les sujets (humains) et les objets et les contiendra donc toujours ensemble à tous les niveaux hiérarchiques ou d'échelle envisagés.

Deux perspectives peuvent dès lors se dégager dans les systèmes complexes hiérarchisés: une perspective verticale selon d'une part des niveaux d'échelle entre holons "macro" (niveau supérieur) et holons "micro" (niveau inférieur) et, d'autre part, une perspective horizontale selon les divers holons "frères". Wu (op. cit.) explique alors que c'est au travers des surfaces entre holons frères ou entre holons de niveaux adjacents que s'exprime la plus grande variabilité des interactions du système et que ces interfaces en filtrent les flux de matière, d'énergie ou d'information. 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), tandis que les niveaux inférieurs (micro) sont composés des entités les plus petites mais aux dynamiques les plus rapides (fréquence élevée d'événements). Par ailleurs, la relation entre deux niveaux est asymétrique, à savoir que le niveau supérieur exerce des contraintes de limite ou de norme sur le niveau inférieur, tandis que ce dernier produit les conditions initiatrices des propriétés émergentes au niveau supérieur. Quant aux relations horizontales entre holons "frères" d'un même niveau, elles sont symétriques mais leurs interactions internes sont plus fortes ou plus rapides que les interactions externes. Wu illustre cet aspect par comparaison avec les interactions subatomiques qui sont plus fortes qu'entre les atomes d'une molécule qui sont à leur tour plus fortes qu'entre les molécules. C'est finalement la variabilité du degré de couplage des interactions entre les holons d'un système complexe qui permet de localiser les surfaces de séparation de parties pseudo-décomposables et de définir leur identité ou intégrité holonomique apparente. Le couplage lâche ou dense du tissage ou de l'interconnexion entre les parties structurales est à la base de la relative décomposabilité des systèmes complexes en holons. Les niveaux hiérarchiques ou de résolution de micro-échelle, méso-échelle et macro-échelle sont utilisés par Bal et al. (op. cit.) pour combiner et transférer des données agrogéographiques de la parcelle ou de l'exploitation agricole (échelle micro) jusqu'à celui de la province ou du bassin (échelle macro), en passant par le village ou le petit bassin versant (échelle méso). Les objets 1 à 8 représentés en 2 états (aux temps t_1 et t_2) à la figure 2 peuvent ainsi correspondre aux holons d'un niveau "méso" qui contraignent les holons d'un niveau "micro"

sous-jacent et participent à l'initiation d'holons "macro" d'un niveau supérieur. La figure 3 schématise cette théorie hiérarchique.

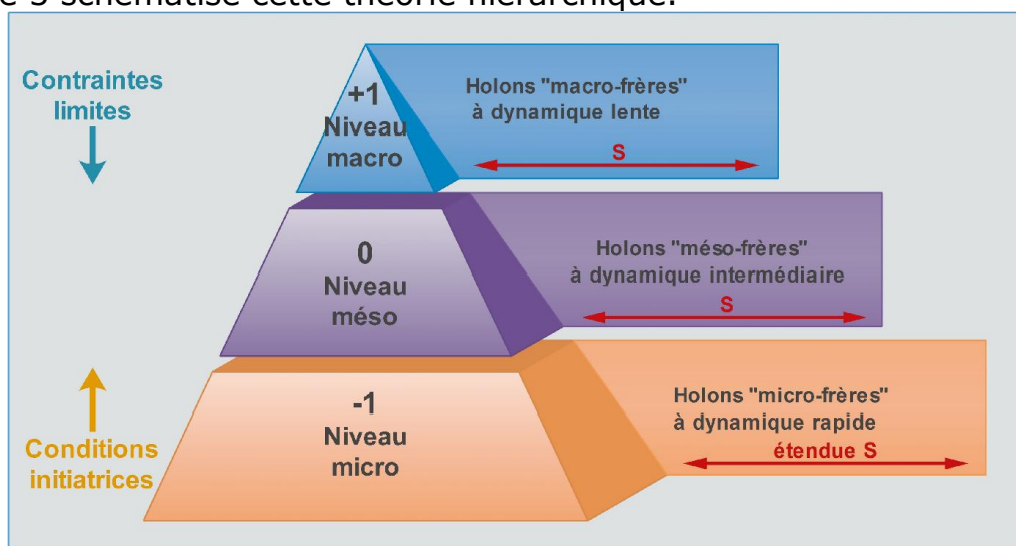


Figure 3: schéma de la théorie hiérarchique ou multiscalaire de la complexité organisée, à niveaux d'étendue S constante

L'étude en structure triadique d'une hiérarchie aux 3 niveaux d'échelle adjacents tels que représentés à la figure 3 est généralement considérée comme nécessaire à la compréhension des systèmes complexes écologiques d'après plusieurs auteurs cité par Wu. Le niveau micro "-1" est parfois qualifié de "réductionniste", le niveau méso "0" de "opérationnel" et le niveau macro "+1" de "macro". Wu distingue encore des contraintes holonomiques sous contrôle global du système et non holonomiques lorsque certaines parties présentent un comportement temporairement indépendant et spécifique du reste du système.

Enfin, pour se référer encore à la terminologie de Camara et al. (op. cit.), tous les holons peuvent être considérés comme des "occurents", c'est-à-dire des "états-objets".

Étendue et granularité

Wu (op. cit.) propose le paradigme de la dynamique hiérarchique des parties (DHP) pour comprendre l'hétérogénéité spatiale des systèmes complexes écologiques. Ils peuvent être conçus comme des espaces hiérarchisés en "nids" ou "nichés" (*nested hierarchies*) à chaque niveau scalaire: tous les holons frères d'un niveau hiérarchique supérieur contiennent ensemble tous les holons du niveau hiérarchique inférieur. La décomposition structurale en niveaux et holons peut varier selon les objectifs poursuivis. Le niveau focal (0, "méso") ne peut être étudié sérieusement qu'en tenant compte de ses deux niveaux adjacents. Le niveau immédiatement inférieur (-1, "micro") définit en effet les conditions initiatrices (ou les paramètres en tant que moyennes statistiques) et le niveau immédiatement supérieur (+1, "macro") fixe les contraintes de limites ou de frontière (constantes). Les processus tendent à devenir plus stochastiques et moins prévisibles à mesure que le niveau d'échelle descend. L'imprévisibilité et les irrégularités tendent à augmenter dans les zones de

transition entre les domaines d'échelles. Le processus d'incorporation au niveau supérieur se traduit par l'acquisition d'une métastabilité des processus qui sont de fait plus à l'écart de l'équilibre au niveau inférieur. Ces concepts de métastabilité et d'incorporation caractérisent les processus multiscalaires et les effets de l'hétérogénéité.

La stratégie multiscalaire par DHP est conçue par Wu en 3 étapes. La première est de décomposer ou partitionner le domaine considéré en holons hiérarchisés. On peut procéder par agrégation (du bas vers le haut) ou par partition (du haut vers le bas) de parties ou motifs structurels similaires. Les critères d'identification des holons se rapportent à la structure et aux processus pertinents pour le phénomène étudié. On recourt généralement à une prescription empirique ou à des méthodes quantitatives (variance d'échelle, analyse statistique multivariée, statistiques spatialisées), ce qui comporte un risque réductionniste. Les questions clé sont de définir quelles similarités des parties font un même holon et quels sont les holons distincts identifiables à chaque niveau qui incorporent les holons de niveau inférieur ou composent les holons de niveau supérieur. Il faut assurer par ailleurs une correspondance entre les échelles de temps et d'espace des holons d'un même niveau scalaire. La variabilité spatio-temporelle des processus étudiés augmente généralement de façon abrupte à l'approche de la transition entre 2 niveaux d'échelle. Ce peut être le cas par exemple de la variabilité des rendements d'une plante cultivée lorsqu'on passe du niveau parcellaire ou sous-parcellaire (agriculture de précision) d'une exploitation agricole donnée au niveau du système de culture de l'ensemble de toutes les parcelles composant le même "terroir" de la plante considérée. L'existence d'interactions externes non-linéaires ou rétro-actives est diagnostique d'hétérogénéités spatiales entre holons "frères". Par exemple, pour une même plante cultivée entre parcelles de terroirs différents durant une même saison ou encore entre sous-parcelles d'un même champ (agriculture de précision) ou entre champs à différentes saisons dans un même assolement.

Une deuxième étape consiste à réaliser les observations et développer les modèles des arrangements et processus autour du niveau focal. La détermination du "grain", c'est-à-dire du degré de résolution, et de l'étendue, c'est-à-dire la distance entre les frontières du domaine du niveau scalaire focal est un choix particulièrement critique et difficile dans une étude interdisciplinaire. La notion d'étendue du domaine est aussi illustrée à la figure 1 et doit être comprise comme étant le côté du périmètre géographique du domaine focal, assimilé conventionnellement ici à un carré. Les 3 types de variation possible de grain et d'étendue sont illustrés dans la figure 4.

Enfin, une troisième étape concerne les extrapolations au travers des niveaux scalaires. En montant dans l'échelle, le grain et l'étendue de chaque holon augmente et inversement en descendant dans les niveaux scalaires. Le changement d'échelle exige des séries multiples d'observations. Le changement de grain (degré de résolution) et d'étendue (périmètre) est généralement simultané, à la manière dont un observateur s'éloigne ou se rapproche d'un objet (zoom négatif ou positif). Parmi les méthodes

d'extrapolation, Wu privilégie l'agrégation du bas vers le haut car elle est particulièrement appropriée à la stratégie DHP. Elle tient compte d'interactions entre les parties par des boucles rétroactives et des interactions hiérarchiques entre les niveaux d'échelle par la possibilité d'émergence de nouvelles propriétés.

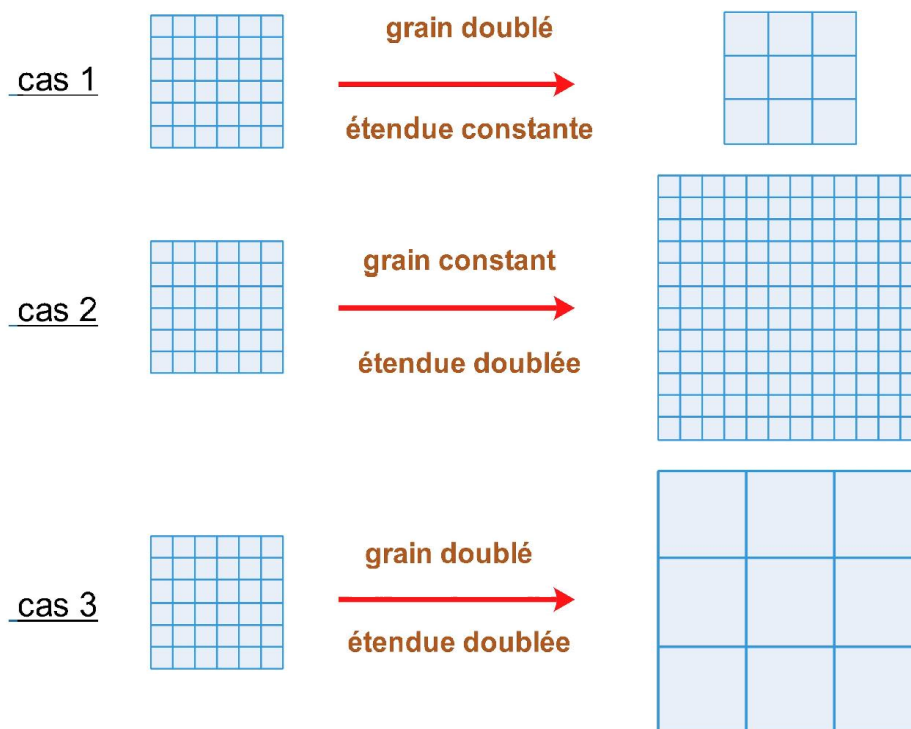


Figure 4: Variations de grain et d'étendue du domaine

Dynamique organisationnelle

Dès lors que le système complexe écologique inclut le facteur anthropique et qu'il est ouvert sur son environnement, sa propriété fondamentale est son auto-organisation. Angelier (op. cit., p.57-58) explique que cette organisation est pérenne et entretenue par les flux de matière, d'énergie et d'information qui relient ses parties et, peut-on ajouter, coordonnent ses holons. Il y a mémorisation et récursion (boucle récursive) c'est-à-dire que l'organisation "*s'organise elle-même*". Ce processus récursif produit ainsi les effets nécessaires à sa propre génération ou régénération si bien qu'il y a auto-organisation continue et que la structure fait la fonction et réciproquement. Le pôle ontologique et le pôle fonctionnel des objets ou des holons distingués par Le Moigne (op. cit., p. 63-64) ne sont plus en opposition. Par contre, le pôle temporel (historique, dynamique, évolutif, morphogénétique) devient primordial dans l'environnement correspondant.

L'auto-organisation évolue vers des équilibres métastables à seuils critiques où de petites perturbations peuvent entraîner de brutales transformations. Bak (1996), cité par Wu et David (2002), la désigne sous le sigle "SOC" (Self-Organized Critically). Angelier (p. 135 +) l'évoque également par les phénomènes critiques auto-organisés qui caractérisent les structures

dissipatives de Prigogine. Il cite l'exemple classique d'un tas de sable alimenté par un apport lent et continu et qui grossit par connections entre ses grains via leur forces de friction. Il existe alors une pente critique indépendante de la taille auto-organisée du tas au-delà de laquelle l'ajout d'un seul grain supplémentaire peut provoquer une rupture d'équilibre, une avalanche. Ensuite, le tas se réorganise et revient en-dessous d'un seuil critique. C'est le comportement non linéaire typique d'un système complexe auto-organisé. Lorsque le système atteint son seuil critique, l'ampleur et la fréquence des événements suivent en effet une loi de puissance. Mais Wu et David (op. cit.) considèrent que ces phénomènes à seuil critique (SOC) ne conviennent pas pour expliquer tous les comportements de la complexité écosystémique et ils estiment même que les SOC dévient ou ignorent les contraintes multiscalaires associées à l'organisation hiérarchique holistique et les rôles clé qu'ils jouent dans sa dynamique. Les SOC représentent à cet égard une vision très réductionniste. En d'autres mots, les écosystèmes ne se comportent généralement pas comme des tas de sable. Ce sont plutôt des systèmes adaptatifs complexes (CAS - Complex Adaptive Systems) dont les facteurs clés sont l'hétérogénéité, la nonlinéarité, l'organisation hiérarchique et les flux d'énergie, de matière et d'information. Wu et David (op. cit.) en tirent le concept de type d'écosystème fonctionnel (EFT - Ecosystem Functional Type) à 3 niveaux hiérarchiques selon la stratégie DHP: régional, local et de l'unité écosystémique proprement-dite, basé sur les caractéristiques de climat, de géomorphologie, d'hydrologie, de sols, et de végétation.

Propriétés émergentes

La non-linéarité dans l'espace et le temps est l'aspect le plus saillant des systèmes complexes écologiques et constitue pour Wu et David (op. cit.) la source fondamentale des propriétés émergentes. Blandin et Lamotte (1989) énoncent comme suit l'axiome holistique: "*tout holon possède au moins une propriété émergente*" et le situe au coeur du débat entre réductionnisme et holisme. Dans les systèmes complexes, le défi holistique et systémique est d'éviter de casser les interactions entre les parties, comme le ferait un réductionnisme cartésien, afin de relever et d'exploiter les propriétés émergentes générées par ces interactions. La difficulté revient alors, comme le remarquent Muxart et al. (1992), à surmonter le caractère interdisciplinaire de l'objet complexe. Dans les systèmes complexes de type "écologique" doivent s'accorder les champs disciplinaires relatifs aux écosystèmes et aux systèmes sociaux (humains) "*pour aborder simultanément l'étude de la structure, du fonctionnement et de la dynamique d'évolution du «tout»*". Les propriétés émergentes résultent alors selon Blandin et Lamotte (op. cit.) d'une coévolution et d'une cosélection des unités structurales et fonctionnelles que sont les holons. Ces auteurs insistent sur les interactions trophiques entre espèces et la coadaptation spécifique des lignées selon les conditions mésologiques qui président à la persistance d'un écosystème ou à son remplacement par un autre. L'introduction et la disparition d'espèces sont également des événements perturbateurs de la résilience acquise par coadaptation progressive des héritages génétiques. Le même type

d'interactions existe entre écosystèmes interdépendants au niveau de l'éco-complexe avec des échanges de matières (eau, sels dissous, sédiments, matière organique) ou d'organismes vivants (propagules végétales, animaux). En agronomie, on pense à des propriétés comme la résilience, la productivité "durable" des (agro)écosystèmes forestiers, de pâturage ou de culture ou à celle des (agro)éco-complexes de niveau supérieur, pour autant qu'ils aient été contextualisés géographiquement. L'unité de lieu, c'est-à-dire d'un espace terrestre concret et délimité, est en effet une condition minimaliste selon Muxart et al. (1992, op. cit.) pour conduire une étude interdisciplinaire sur les systèmes écologiques complexes et leurs propriétés émergentes.

Outre l'émergence du paysage spécifique proprement-dit, les résiliences, et/ou les mémoires des holons sont aussi des propriétés émergentes développées par leur évolution tantôt anthropogénique (allogénique) dans le cas des systèmes agraires tantôt autogénique dans le cas d'écosystèmes de peuplements forestiers "pseudo-primaires" plus ou moins secondarisés. Enfin, d'un point de vue socio-économique émergent de nouvelles valeurs ajoutées et de nouveaux emplois dans le commerce et/ou de la fabrication et transformation artisanale/industrielle des productions en aval (filères), et de la fourniture d'équipements et d'intrants en amont.

Limites et perspectives

Wu et David (op. cit.) illustrent la stratégie DHP notamment par un modèle de dynamique territoriale pour la croissance urbaine de la ville de Phoenix (Arizona, USA). Le modèle est initié sur l'année 1975 et tourne sur 55 ans jusqu'en 2030. La comparaison de la carte empirique de 1995 et de la carte simulée pour la même année offre une bonne correspondance qu'ils attribuent à l'incorporation des contraintes DHP top-down. Mais ils concluent que pour les phénomènes émergents et l'auto-organisation, il faut intégrer une approche à la fois réductionniste et holistique et transférer les données au travers des différents niveaux hiérarchiques, car ni l'une, ni l'autre séparément ne s'avère suffisante comme telle.

Turner et al. (2007) confirment que les relations empiriques en cause des dynamiques territoriales (land change) varient considérablement en fonction de l'échelle spatio-temporelle considérée. Elles sont aussi compliquées par des distorsions d'échelle entre les données socio-économiques, environnementales et de télédétection.

On remarquera que les disciplines comme la télédétection, l'écologie politique, la biogéographie, l'économie des ressources naturelles, l'écologie du paysage, la gouvernance institutionnelle, etc. induisent un saucissonnage réductionniste de l'holon systémique schématisé à la figure 1.

Verburg et al (2002) soulignent l'incidence des structures sociales, économiques et institutionnelles sur la résilience des systèmes territoriaux. On remarquera que ces structures sont sociopolitiques et entrent dans l'organisation hiérarchique au niveau supérieur. L'opportunité et l'adéquation des contraintes ou normes prescrites exige logiquement une reconnaissance de leur légitimité aux niveaux inférieurs. Cette dernière est loin d'être toujours

acquise, en particulier sous un régime non démocratique ou non coutumier. Finalement on peut conclure que de véritables approches holistiques sur la durabilité ou la résilience de systèmes écologiques complexes restent encore rares et immatures. Toutefois, les concepts exposés pourraient se révéler particulièrement féconds s'ils pouvaient se partager dans de véritables démarches interdisciplinaires de recherche-action.

Bibliographie

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).

Bak P., 1996, *How nature works: The science of self-organized criticality*, New York, Copernicus Press.

Bal P., Castella J.C., Husson O., Doanh L.Q., Long T.D, Quang D.D. et al., 1999, "Diagnostic systémique, recherche agronomique et appui au développement: exemple d'une intervention concertée dans la province de Bac Kan", in: *Appui à l'organisation de la production agricole dans le nord du Vietnam, actes du séminaire de lancement du projet financé par le FAC. s.l.*, Hanoï, Maison d'édition de l'agriculture, INSA, 57-92.

Bertrand G., 1982, "Construire la géographie physique", *Hérodote*, 26, 90-116.

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.

Blandin P, Bergandi R., 1997. "Entre la tentation du réductionnisme et le risque d'évanescence dans l'interdisciplinarité: l'écologie à la recherche d'un nouveau paradigme", in: Larrère C., Larrère R. (éd.), *La crise environnementale*, Paris, INRA, coll. Les colloques, 113-129.

Camara G., Despres S., Djedidi R., Lo M., 2012, "Modélisation ontologique des systèmes complexes: cas de la propagation de la bilharziose au Sénégal", 4e Colloque National sur la Recherche en Informatique et ses applications (CNRIA'12), Thiès-Bambey, Sénégal.

Chouquer G., 2003,. "Françoise Burel et Jacques Baudry, Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications", *Études rurales*: <http://etudesrurales.revues.org/2968>, 2003, 167-168.

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.

Larrère C., Larrère R., 2009, *Du bon usage de la nature. Pour une philosophie de l'environnement*, Paris, Flammarion (coll. Champs, essais).

Le Moigne J-L., 2006. *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*, Coll. Les classiques du réseau intelligence de la complexité, Publication de l'édition de 1994, Nouvelle présentation 2006, <http://jean-louislemoigne.developpez.com/>, 338 p.

Lepart J., 1997. "La crise environnementale et les théories de l'équilibre en écologie", in: Larrère C., Larrère R. (éd.), *La crise environnementale*, Paris, INRA, coll. Les colloques, 131-144.

Muxart T, Blandin P., Friedberg C., 1992, Hétérogénéité du temps et de l'espace: niveaux d'organisation et échelles spatio-temporelles. in: M. Jollivet (dir.), *Sciences de la nature, Sciences de la société. Les passeurs de frontière*, Paris, CNRS éditions, 403-425

Odum E.P., 1953, *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia, W.B. Saunders Company.

Tansley A.G., 1935, "The use and abuse of vegetational concepts and terms", *Ecology*, 16, 3, 284-307.

Turner B., Lambin E., Reenberg A., 2007, "The emergence of land change science for global environmental change and sustainability", *Proceedings of the National Academy of Science of the USA (PNAS)*, 104, 52, 20666-20671.

Verburg P.H., Veldkamp W.S.A, Espaldon RLV., S.S.A. MASTURA S.S.A., 2002, "Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model", *Environmental Management*, 30, 3: 391- 405.

Wu J., 1999. "Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder", *Can. J. Remote Sens.*, 25, 4, 367-380.

Wu J., David J.L.; 2002. "A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications" *Ecological Modelling*, 153: 7-26.
