
Une ontologie orientée objet pour la modélisation des socio-écosystèmes

Éric Masson

Laboratoire TVES ULR 4477, Université de Lille, Cité Scientifique,
av. Paul Langevin, 59650 Villeneuve-d'Ascq, France
eric.masson@univ-lille.fr

RÉSUMÉ. Cet article de positionnement théorique est une contribution ontologique pour la modélisation des socio-écosystèmes (SES). C'est également une prise de position épistémique qui est ancrée sur la démarche orientée objet. Nous proposons ainsi un modèle d'organisation des connaissances qui permet d'intégrer plus de complexité dans la déconstruction pluridisciplinaire et l'analyse des SES. Cette proposition ontologique orientée objet s'appuie sur six concepts de haut niveau d'abstraction permettant une portabilité transdisciplinaire autour des structures, fonctions, connexions, phases, échelles et adaptations des SES. Après avoir défini notre positionnement sur la modélisation spatiotemporelle orientée objet, nous présentons les six concepts et nous explicitons l'intérêt d'une ontologie de haut niveau, orientée objet, pour les SES pour conclure sur les perspectives d'organisation des connaissances qui prolongent notre proposition.

ABSTRACT. This article is a positional paper and an ontological contribution to the modelling of socio-ecosystems (SES). It is also an epistemic position that is anchored on the object-oriented approach. We thus propose a model of knowledge organisation that allows more complexity to be integrated into the multidisciplinary deconstruction and analysis of SES. This object-oriented ontological proposal is based on six concepts of high abstraction level allowing a transdisciplinary portability around the structures, functions, connections, phases, scales and adaptations of SES. After defining our position on object-oriented spatiotemporal modelling, we present the six concepts and explain the interest of a top level, object-oriented, ontology for SES to conclude on the perspectives of knowledge organisation that extends our proposal.

MOTS-CLÉS : géomatique, ontologie, objet, système, environnement, société, structure, fonction, connexion, phase, échelle, adaptation.

KEYWORDS: Geomatic, Ontology, Object, System, Environment, Society, Structure, Fonction, Connection, Phase, Scale.

DOI:10.3166/RIG.31.199-230 © 2022 Lavoisier

1. Introduction

Les socio-écosystèmes (ou SES dans la suite de l'article) sont des systèmes réputés complexes (Gunderson et Holling, 2002 ; Allen et Holling, 2008 ; Jorgensen *et al.*, 2007 ; Fustec et Lefeuvre, 2000, Le Moigne 1999 ; Partelow, 2018 ; Baartman *et al.*, 2020 ; Hervé *et al.*, 2016 ; Liu *et al.*, 2007) car ils hybrident et métabolisent des processus et des relations entre les sociétés et leurs environnements écologiques (Loireau *et al.*, 2017 ; Barnaud, 2000). Depuis plusieurs décennies (Kuipers, 1978, 1994 ; Laurini, 1990 ; Saint-Gérard, 2002 ; Tissot et Cuq, 2004 ; Tran *et al.*, 2017), leur modélisation et leur analyse spatiale s'appuient sur des systèmes d'informations géographiques (SIG) à tel point que le développement même des outils et méthodes implémentés dans les SIG peut être considéré comme une réponse au besoin d'intégration de cette complexité (Burrough et Frank, 1996 ; Clementini et Di Felice, 1996 ; Clementini *et al.*, 2021). Cependant certains aspects de la complexité des SES constituent des verrous scientifiques (Le Moigne et Morin, 2007) qu'il est difficile de modéliser sans les simplifier par des approches plus ou moins compliquées. Parmi ceux-ci nous pouvons citer les phénomènes d'apprentissage (Ehresmann et Vanbremeersh, 2007 ; Daniels et Walker, 1996 ; Morin, 1986 ; Le Moigne, 1999), d'auto-organisation (Bak, 1996 ; Morin, 1986), d'émergence (Folke *et al.*, 2003 ; Folke, 2006 ; Jorgensen *et al.*, 2007), de résilience (Gunderson et Holling, 2002 ; Jorgensen *et al.*, 2007), d'évolution adaptative (Steneck, 1986 ; Gunderson et Holling, 2002 ; Jorgensen *et al.*, 2007, Walker *et al.*, 2004 ; Folke *et al.*, 2003), de directionnalité (Jorgensen *et al.*, 2007), d'intentionnalité (Brentano, 1976 ; Johansson, 1992, 2004 ; Smith *et al.*, 1994 ; Husserl, 1900), d'homéostasie (Ehresmann et Vanbremeersh, 2007 ; Meurnier *et al.*, 2014 ; Von Bertalanffy, 1968), de dyschronie (Alter, 2003), etc. Les dimensions spatiotemporelles des SES participent d'une complexité qui s'accommode très mal de modèles réductionnistes ou déterministes (Malczewski et Jankowski, 2020). Il ne suffit pas de positionner les éléments de connaissance d'un SES dans un modèle spatial 3D-temporel pour lever les incertitudes liées aux 1) conditions initiales, car il y a toujours un état de connaissances et de dépendances antérieures du SES qui n'est pas intégré, et 2) conditions aux limites, tels les phénomènes de forçage exercés par des externalités qui, par définition, sont externes donc exclues du modèle. Cette sensibilité aux conditions initiales/aux limites est source d'incertitude majeure dans les modèles systémiques en particulier pour les facteurs sociétaux des SES qui possèdent un comportement rarement déterministe (Allen et Holling, 2008 ; Le Moigne, 1999 ; Bak, 1996).

Un premier défi à relever pour modéliser les SES tient dans la capacité du/des modélisateur(s) à assembler une base de connaissances qui doit nécessairement s'appuyer sur plusieurs corpus disciplinaires des sciences sociales et de l'environnement. La première des complexités s'observe donc dans la formalisation des connaissances (Loireau *et al.*, 2017) où chaque partie prenante 1) projette son domaine de connaissances dans une démarche pluridisciplinaire, 2) intègre son domaine de connaissances dans une démarche interdisciplinaire ou 3) hybride son

domaine de connaissances dans une démarche commune de type transdisciplinaire. Cette première étape de la modélisation revient à compiler et à organiser les connaissances et leurs corpus sémantiques dans une démarche ontologique dont l'objectif est d'identifier les objets étudiés (les êtres) et d'en décrire leurs propriétés (leurs étant). Pour un SES, l'objectif ontologique consiste donc à modéliser les composants (systèmes et sous-systèmes), les propriétés (fonctions et processus) et les connexions (liens et interrelations). Les SES étant des systèmes spatiotemporels, les outils et les méthodes de la géomatique participent également à l'objectif ontologique de modélisation. Il devient alors incontournable d'intégrer les connaissances disponibles sur les objets étudiés dans un modèle systémique « prêt à l'emploi » construit et organisé en fonction de leurs dimensions spatiales, par des entités graphiques (points, lignes, surfaces et pixels, volumes et voxels), dans leur dimension temporelle, par une localisation dans le temps (dynamique temporelle), et dans leurs dimensions analytiques, par leurs propriétés (attributs et relations).

Cet article propose un modèle d'organisation des connaissances s'appuyant sur une démarche ontologique transdisciplinaire qui est généralisable à l'étude des SES. Cette proposition est le résultat d'une recherche théorique menée en parallèle de projets de recherches dont les enjeux de pluridisciplinarité (géologie, écologie, génie civil, informatique, géomatique, géographie, urbanisme, sociologie, économie, histoire, archéologie) concernent différents thèmes (risques naturels, gestion intégrée des ressources en eau, gestion intégrée des ressources environnementales, économie circulaire appliquée à la gestion des sédiments, systèmes participatifs d'aide à la décision, etc.) pour lesquels les outils de la géomatique (SIG et télédétection) étaient systématiquement mobilisés en lieu et place de système d'information (ou SI). L'objectif ontologique recherché ici est de mieux articuler les connaissances pluridisciplinaires afin de mieux intégrer la complexité des SES dans les outils de modélisation spatiotemporelle.

Cette démarche place notre proposition dans la catégorie des ontologies de haut niveau (Sowa, 1995 ; Vogt, 2011 ; Partridge et Stefanova, 2003 ; Garcia, 2020 ; Arp *et al.*, 2015) ou *Top Level Ontology* (TLO dans l'article). Plusieurs ontologies de très haut niveau sont reconnues telles que SUMO (Niles et Pease, 2001), DOLCE (Gangemi *et al.*, 2002), BORO (Partridge et Stefanova, 2003), UFO (Guizzardi, 2005), SWEET (Raskin et Pan, 2005 ; DiGiuseppe *et al.*, 2014), GFO (Herre, 2010) ou encore BFO (Arp *et al.*, 2015) et couramment utilisées comme fondation pour des ontologies de domaine permettant l'instanciation d'ontologies applicatives (Ye *et al.*, 2011 ; Arp *et al.*, 2015). Nous ne développons pas ici les différences entre chacune de ces TLO et nous ne faisons pas non plus de comparaisons entre notre proposition et une ou plusieurs de ces TLO car ce n'est pas l'objectif de cet article.

Notre proposition s'appuie sur le paradigme orienté objet (OO dans l'article) qui a révolutionné la programmation dès les années 1960 et constitue également le fondement de la modélisation des bases de données géographiques. Si l'application de celui-ci à l'analyse d'image à références spatiales (aériennes et satellitaires) semble récente (Blaschke, 2010 ; Blaschke *et al.*, 2014) sous la dénomination

GEOBIA (*GE*ographical *O*bject *B*ased *I*mage *A*nalysis), elle prolonge en fait des travaux plus anciens sur l'imagerie aérienne (Bausch, 1979 ; Fu et Mui, 1980), dans la poursuite de travaux sur l'extraction automatique d'objets dans les images numériques statiques (Prewit, 1971) ou dynamiques (Radig, 1978). Le concept d'objet, pris dans le sens de chose, d'item, d'entité réelle ou abstraite est lui-même consubstantiel de toute ontologie comme le rappelle Barry Smith : « *Ontology as a branch of philosophy is the science of what is, of the kinds and structures of the objects, properties and relations in every area of reality.* » (Smith, 1999). Il n'est donc pas surprenant qu'une école de pensée philosophique propose d'appliquer le paradigme OO à l'ontologie elle-même dans ce que Graham Harman définit comme l'« *Object Oriented Ontology* » ou OOO (ontologie orienté objet) (Harman, 2018) et que l'objet soit lui-même considéré comme l'un des rares concept théorique transdisciplinaire (Heller, 1984, 1990 ; Carnap, 1922 ; Casati et Varzi, 1999).

Cette contribution s'articule donc en trois parties. La première s'appuie sur réflexion sur le concept orienté objet comme abstraction élémentaire pour la modélisation spatiotemporelle appliquée aux SES.

La deuxième partie analytique propose de définir un ensemble de six concepts utiles à la modélisation du métabolisme des SES. Nous démontrons la « portabilité » pluridisciplinaire de ces six concepts en élicitant chacun d'entre eux avec des exemples pris dans les domaines géomorphologique, écologique, urbain et culturel qui participent au fonctionnement des SES.

Enfin, la troisième partie intègre les réflexions des deux précédentes dans une OOO qui s'appuie sur les six concepts appliqués aux SES pour construire un modèle à six dimensions. Cette proposition théorique ambitionne d'agréger plus de complexité, à défaut de toute la complexité, pour l'analyse des SES spatiotemporels en substituant un positionnement des connaissances dans un modèle spatiotemporel multidisciplinaire à un positionnement des connaissances dans une OOO 6.0 (ontologie orienté objet de dimension 6) transdisciplinaire. L'importance de la dimension adaptative et la question de la topologie de notre proposition pour la modélisation des SES seront également discutées.

2. Modélisation spatiotemporelle orientée objet pour les socio-écosystèmes

2.1. L'objet, une abstraction élémentaire

Dans notre proposition OOO 6.0, chaque entité, attribut ou relation du SI est un conceptuellement appelé un objet. Notre concept d'objet correspond donc simplement à une abstraction physique ou sémantique. Par abstraction physique nous considérons que notre objet représente toute chose constituée de matière dans l'espace physique du monde réel. Par abstraction sémantique nous considérons que notre objet représente toute chose immatérielle portée ou échangée par des objets physiques localisables dans l'espace du monde réel. L'objet est donc une abstraction

au sens le plus large. Ce concept possède aussi l'avantage d'inclure la notion de délimitation et il intègre également, conceptuellement, la notion d'assemblage. Un objet peut donc être composé des éléments qui le constituent définissant à la fois sa singularité et ses propriétés.

Un objet devient lui-même un élément s'il participe de l'assemblage d'un autre objet de rang supérieur, un système. Nous reconnaissons cependant deux objets d'exception à cette logique élément-assemblage : la particule élémentaire et l'univers. Elles constituent pour les limites infranchissables, internes (limite inférieure pour la particule) et externes (limite supérieure pour l'univers), de la connaissance donc de la modélisation. La première est à la fois élément et objet : l'internalité de l'objet particule élémentaire est donc exclue. La seconde est l'objet de tous les éléments : l'externalité de l'objet univers est aussi exclue. L'objet univers a donc pour dimension une étendue, un intervalle ou une enveloppe d'existence, dont la limite interne (limite inférieure, fondement) est la particule élémentaire et la limite externe (limite supérieure, totalité) est l'univers lui-même. De la particule à l'univers, il existe un ensemble d'assemblages ou de combinaisons possibles, donc d'objets, dont le nombre ou la complexité n'est pas défini ou déterminé, *a priori*. La première des décisions dans la modélisation d'un objet d'étude consiste donc à délimiter, à borner, la part de complexité et le système d'objets qui est lui-même l'assemblage d'éléments à étudier.

Les objets peuvent être matériels (Heller, 1984, 1990) ou immatériels (Arp *et al.*, 2015 ; Smith et Mark, 2003 ; Smith et Varzi, 2000 ; Harman, 2018). Cette distinction ontologique très ancienne remonte à Aristote (Hennig, 2008). S'ils sont matériels, ils disposent d'une réalité physique, qui est observable (perçue par un capteur) et que l'on peut localiser et dimensionner (grandeur physique) dans un segment du système physique espace-temps. L'objet matériel (physique), a pour dimensions une étendue, délimitée par une internalité (limite inférieure) et une externalité (limite supérieure), dans ses quatre dimensions, il existe donc dans un volume 3D-temporel (4D). Cette étendue 4D est une enveloppe qui possède deux surfaces : une surface interne et une surface externe. La différence entre ces deux surfaces est un intervalle qui exclut 1) un volume interne (l'internalité), qui peut alors être considéré comme une boîte noire interne, et 2) un volume externe (l'externalité) qui peut alors être considéré comme une boîte noire externe.

Les objets immatériels, quant à eux, ne disposent pas d'une réalité physique mais disposent d'une réalité cognitive et sémantique que l'on peut également localiser et dimensionner dans l'espace et le temps. Ce sont des abstractions que l'on ne peut pas observer ou dimensionner sans utiliser un modèle conceptuel. Ainsi une connaissance est un type d'objet immatériel qui peut être rattaché à la localisation matérielle d'un individu ou d'un groupe qui la partagent et l'utilisent. Les objets immatériels sont des objets intentionnels (Johansson, 1992 ; Smith et Woodruff-Smith, 1995 ; Smith, 1996) ou sensibles (Harman, 2018) qui sont plus complexes que les objets matériels car ils encapsulent une part plus ou moins grande de subjectivité de l'individu ou du groupe qui le porte.

L'objet immatériel, comme l'objet matériel (physique), a lui aussi pour dimension une étendue, un intervalle, délimitée par une internalité (limite inférieure) et une externalité (limite supérieure). La distinction entre délimitation construite (*fiat boundary*) qui correspond au modèle de la réalité et la délimitation véritable (*bona fide boundary*) qui correspond à l'objet du monde réel (Smith et Varzy, 2000) pose le problème du réductionnisme en modélisation (*fiat boundary*) et de la difficulté à délimiter certains objets (*bona fide boundary*) dans le monde réel (Smith et Mark, 2003). Dans notre approche, un objet est donc une enveloppe dont l'abstraction numérique est conçue pour modéliser un domaine de connaissances des SES. Nous appelons objet géographique un assemblage d'éléments, matériel, immatériel ou hybride, localisable dans un système de coordonnées terrestres. Nous appelons objet spatiotemporel un objet géographique qui est également localisable dans le temps.

2.2. L'objet spatiotemporel

Dans les bases de données construites pour l'analyse des SES la modélisation des informations s'articule sur l'association entité/attribut/relation. Dans les SI spatiotemporels, les entités sont identifiées et décrites géométriquement dans un espace respectant la métrique d'un système de coordonnées géographiques (Laurini, 1990). Les objets du « monde réel » sont modélisés selon des entités discrètes par des vecteurs (figure 1) ou selon des espaces continus échantillonnés par des pixels (Laurini, 1990). Les attributs sont donnés (valeurs initiales) ou construits (valeurs déduites ou observées) pour décrire la (les) valeur(s) sémantique(s) de chaque entité. Les relations entre entités à références spatiales (relations spatiales) et entre attributs (relations attributaires) sont, elles aussi, données ou construites afin de modéliser et d'organiser les traitements numériques qui sont implémentés dans le SI. Attributs et relations sont les propriétés des entités. L'association entre géométries, attributs et relations repose sur le modèle entité-association (Bouillé, 1975, 1977, 1978 ; Saint-Gérand, 2002 ; Pirot et Saint-Gérand, 2005) qui lie chaque entité à une description sémantique normalisée (attributs, relations et métadonnées) par un identifiant.

Les entités sont produites et contraintes par leurs modèles numériques, elles sont dimensionnées selon une résolution spatiale et temporelle définie par l'utilisateur. Elles sont pensées et construites pour résoudre une question thématique elle-même modélisée en fonction de connaissances comprises dans des cadres théoriques et méthodologiques choisis par l'utilisateur. Elles résultent donc d'un processus de réductionnisme nécessaire à tout exercice de modélisation qui dépend fortement de l'utilisateur.

Dans le « monde réel », les objets géographiques présentent une dynamique qui dépend des systèmes territoriaux, c'est-à-dire des contextes spatiotemporels, dans lesquels ils évoluent. L'objet est donc une interface entre ses relations internes (constitutives) et ses externalités (contextes). A certaines échelles d'analyse, l'objet géographique peut-être indéterminé ou non localisé en raison de paramètres

d'observation, de temps ou de métabolisme. Ses limites peuvent apparaître, disparaître, évoluer ou être floues comme dans le cas de la délimitation des zones humides (Barnaud, 2000 ; McMullen et Meacham, 1966) ou d'une montagne (Smith B. et Mark, 2003). L'objet géographique du monde réel peut aussi être actif, inactif, évolutif, latent (en veille) ou sous-jacent (encapsulé). Si les notions de résolutions spatiale (géométrie), temporelle (dynamique), sémantique (description) et de contexte (relations) jouent un rôle fondamental dans l'observation du « monde réel », s'y ajoute également un facteur de réduction (échelle de simplification) dans la modélisation systémique et dynamique des objets étudiés. Cependant, il existe un hiatus entre la complexité du « monde réel » et le réductionnisme nécessaire à tout exercice de modélisation (De Sède-Marceau et Moine, 2011). Ce problème n'est pas nouveau y compris en géomatique.

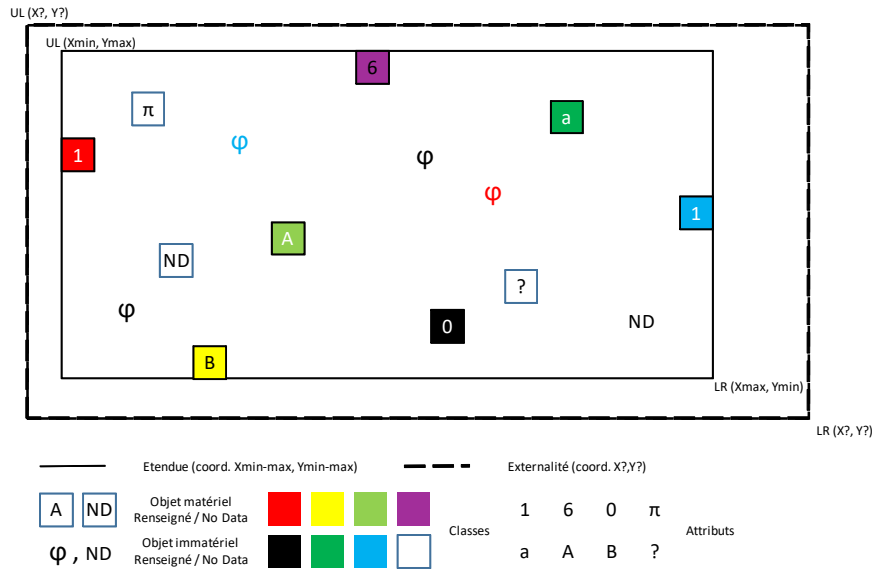


Figure 1. Exemple de représentation conceptuelle des objets vectoriels dans un SI à références spatiales (les objets matériels ou immatériels peuvent appartenir à des classes et possèdent – ou non – des attributs quantitatifs ou qualitatifs)

2.3. Socio-écosystèmes et ontologie orientée objet

Si la conceptualisation OO est largement recevable dans les disciplines relevant des sciences et technologies, elle n'est pas aussi largement acceptée dans celles relevant des sciences du vivant et plus particulièrement des sciences humaines et sociales. La finalité du concept d'objet pose un problème éthique lorsqu'il s'agit d'étudier les êtres vivants en général et les êtres humains en particulier. En effet, l'objet, dans sa définition la plus large, est une chose façonnée, un artefact construit

pour être manipulé en fonction d'un objectif, d'une intention ou d'une finalité (Gruenfeld *et al.*, 2008). Or, l'idée même qu'un être vivant, qu'un humain ou qu'une société soient considérés comme des objets, donc soient manipulables et manipulés par la science et pour la recherche, est une posture scientifique qui n'est pas tenable. Cette insoutenabilité alimente largement les débats sur l'éthique en santé (Halioua, 2017), en environnement (Hess, 2017) ou en sciences sociales (Marx, 1844 ; Nussbaum, 1995 ; Gervais *et al.*, 2013 ; Hess, 2017). Le terme d'objet est dérangeant et incite les sciences humaines et sociales et une bonne partie des sciences du vivant à lui préférer d'autres concepts plus respectueux de l'être tels qu'individu, sujet, famille, groupe, population, société, etc.

Sans poursuivre plus avant sur ce débat éthique qui dépasse la finalité de cet article, il me semble utile de clarifier la place de l'objet dans la modélisation des SES qui est proposée. L'approche OO retenue considère l'objet comme une abstraction de la réalité, matérielle ou immatérielle, des éléments constitutifs d'un SES. Un être vivant n'est donc pas un objet au sens strict mais son abstraction, dans le système d'information, est considérée comme un objet renseigné, une représentation, un élément de connaissance participant à l'étude d'un SES.

Les objets, matériels ou immatériels, parce qu'ils sont construits intentionnellement, sont délimités, ils ont des formes, des longueurs des surfaces, des volumes (3D). Parce qu'ils sont délimités, ils partagent aussi une co-limite, une topologie, avec leur environnement, leur voisinage, d'autres objets qui en deviennent des externalités (cas de forçage) et des relations. Parce qu'ils sont créés ou observés à un instant *t*, ils sont également une temporalité (1D). Enfin, parce qu'ils existent, les objets sont aussi renseignés ou renseignables selon une sémantique qui participe d'une ontologie elle-même développée dans le cadre de la discipline scientifique de référence. Cette approche 4D disciplinaire n'est pas satisfaisante pour l'analyse de systèmes complexes tels que les SES car elle se rapporte à un modèle physique (au sens disciplinaire) de la réalité qui laisse peu de place à l'autodétermination et au métabolisme tels qu'on les rencontre dans les SES (Le Moigne, 1999 ; Holling *et al.*, 2002 ; Peterson, 2008). La proposition théorique ambitionne d'ajouter un niveau ontologique entre le référencement 4D et la description sémantique des éléments et relations des objets d'un SES.

3. Six concepts pour l'analyse des socio-écosystèmes

3.1. Des concepts pluridisciplinaires

L'extraction de connaissances disciplinaires multiples nécessite un effort d'abstraction dont la portée doit être a/trans-disciplinaire. L'objectif alors recherché consisterait à agréger/intégrer/hybrider les savoirs et les méthodes autour de l'objet scientifique commun. Les systèmes environnements-sociétés étant des objets scientifiques complexes et pluridisciplinaires, leur étude repose sur le

développement de modèles théoriques facilitant/autorisant des raisonnements et des résolutions de problèmes complexes.

Dans le foisonnement des possibles pour pallier cette contrainte théorique, nous proposons l'hypothèse d'un modèle d'abstraction combinant six dimensions (figure 2). La première, structurale, est indispensable à une approche OO. Elle implique une topologie discrète, consubstantielle à la notion de système et d'objet. Un système est par définition une organisation d'objets peuplant une structure. La deuxième, fonctionnelle, établie les actions, processus, rôles, etc. qui s'opèrent par et entre les objets. La troisième, relationnelle, caractérise la connexité des interactions, c'est-à-dire la topologie des transactions entre les objets. La quatrième, séquentielle, introduit une temporalité discrète, événementielle, une phase qui s'applique à l'activation des interactions entre les objets. La cinquième, scalaire, renvoie à une résolution, ou granularité, systémique. Elle définit les internalités et externalités qui délimitent, dans le sens des conditions aux limites d'un modèle, la résolution systémique des interactions. La sixième, adaptative, formalise les adaptations qui s'appliquent aux objets en réponse aux rétroactions du système. Elle est indispensable au bouclage des interactions entre les objets et elle permet la formalisation d'un état transitoire du système. Plasticité/rigidité, flou-vague/discret, déterministe/chaotique, prévisible/aléatoire, résilient/résistant, incertain/déterminé, stable/instable, etc. peuvent ainsi être dissociés des fonctions qui elles sont déterminées.

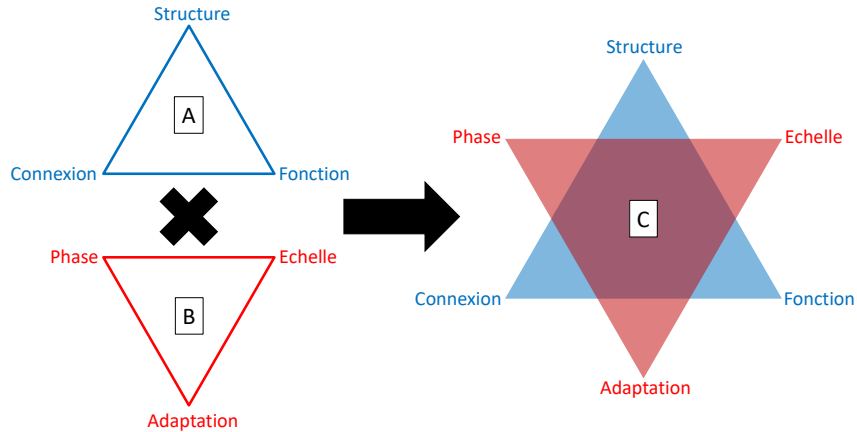


Figure 2. Ouvrir à plus de complexité dans la modélisation des SES avec (A) transposition du modèle Entité-Fonction-Relation à 3 classes et (B) intégration de 3 nouvelles classes pour un modèle de complexité (C) à 6 classes par objet

Dans la figure 2, 2A correspond à la transposition du modèle entité-fonction-relation, lui-même dérivé du modèle ontologique « entité-propriétés » (Armstrong, 1997 ; Johansson, 2004 ; Munn et Smith, 2008 ; Grenon, 2008). 2B correspond à

une transposition d'un modèle de contingence permettant d'inclure la temporalité, le réductionnisme (compris comme un facteur d'échelle) et la dimension évolutive d'un système complexe. Enfin, 2C correspond à un modèle d'objet systémique temporel qui, sans être « multistatique », intègre plus de complexité que le modèle 4D. Les six concepts retenus dans notre proposition sont donc structure, fonction, connexion, phase, échelle et adaptation (figure 2, tableaux 1 à 6). Ces six concepts sont des classes d'abstraction dont le choix sémantique obéit à un objectif de portabilité transdisciplinaire pour une application à la modélisation des SES dans un contexte scientifique pluridisciplinaire.

3.2. Elicitation des six concepts proposés

Notre proposition est élicitée à partir d'instances d'objets choisis (tableau 1 à 6) dans des SES relevant de quatre domaines 1) Géomorphologie, 2) Écologie, 3) Urbanisme et 4) Culture. Pour le premier domaine les objets étudiés sont principalement matériels et inertes (abiotique), pour le deuxième les objets sont matériels et mixtes (biotiques et abiotiques), pour le troisième les objets sont matériels - mixtes (biotiques et abiotiques) et immatériels (culturels), pour le quatrième domaine les objets sont mixtes matériels et immatériels (culturels).

3.2.1. Concept de structure

Une structure (tableau 1) est un assemblage, une organisation, une distribution, une hiérarchie ou une panarchie (Gunderson et Holling, 2002) entre les objets d'un système qui est considéré comme discret donc susceptible d'être segmenté ou réorganisé.

Tableau 1. Instances du concept de structure

Domaines	Structure
Géomorphologique	<p>Une forme de relief est une structure géomorphologique. C'est un assemblage d'objets inertes (abiotiques). Nous excluons volontairement la partie biologique qui contribue à la l'évolution d'une forme de relief.</p> <p>Ex. : une plage de dépôt : un assemblage d'éléments, des particules sédimentaires. C'est aussi un élément d'objet de rang supérieur tel qu'une plage est elle-même élément d'un objet cordon littoral, élément de l'objet littoral, élément de l'objet bordure continentale, élément de l'objet continent, lui-même élément de la planète Terre. Entre l'élément particule sédimentaire et l'objet terre, il existe un emboîtement de structures géomorphologiques.</p>
Écologique	<p>Une forêt est une structure biogéographique. C'est un assemblage d'objets inertes (abiotiques) et biologiques (faune et flore).</p> <p>Ex. : un sol forestier : un assemblage d'éléments minéraux (fraction minérale) et biologiques (fraction organique). C'est aussi un élément</p>

	(substrat) de l'objet sol-plante (incluant différentes classes d'objets plante herbacée, arbustive et arborée), élément de l'objet sol-plante-atmosphère incluant les éléments physiques (gazeux, liquides et solides), élément d'un objet peuplement arboré lui-même élément d'un objet forêt. Entre l'élément fraction organique du sol et l'objet forêt, il existe une structure forestière.
Urbain	<p>Une ville est une structure urbaine. C'est un assemblage d'objets matériels inertes (abiotiques, bâtis, etc.), biologiques (homme, faune et flore) et d'objets immatériels culturels (langue, histoire, arts, religions, etc.).</p> <p>Ex. : un sol urbain : un assemblage d'éléments « naturels » biotiques et abiotiques et artificiels (réseaux techniques). C'est un élément (fondation) pour des objets abiotiques (voiries, bâtiments), et biologiques (populations humaine, animale et végétale) eux-mêmes éléments d'un objet îlot urbain, élément d'un objet quartier urbain, lui-même élément d'un objet ville. Entre l'élément fraction organique du sol et l'objet ville, il existe une structure urbaine.</p>
Culturel	<p>Une mémoire est une structure culturelle. C'est un assemblage d'éléments immatériels (souvenirs) d'une temporalité passée. Nous excluons volontairement le support biologique (individuel) ou technologique (analogique ou numérique) de la mémoire.</p> <p>Ex. : un souvenir (lieu et temporalité donnés) : un assemblage d'éléments de perception humaine. C'est un élément de l'objet mémoire individuelle, elle-même élément de l'objet mémoire d'une population, élément d'un objet mémoire collective de l'Humanité, lui-même élément d'un objet mémoire collective de l'Histoire de l'Humanité. Entre l'élément souvenir et l'objet mémoire collective de l'Histoire de l'Humanité, il existe une structure de la mémoire.</p>

3.2.2. Concept de fonction

Une fonction (tableau 2) est un opérateur qui mobilise un ou plusieurs élément(s) en entrée, pour produire un ou plusieurs objet(s) du système en sortie qui est considéré comme multifonctionnel.

Tableau 2. Instances du concept de fonction

Domaine	Concept de fonction
Géomorphologique	<p>L'assemblage des éléments érosion, transport et accumulation est un objet fonctionnel de la morphogenèse. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'érosion est une fonction géomorphologique qui consomme une énergie en entrée pour produire un objet altération de matière inerte en sortie (ex. un front d'altération d'un substrat). - Le transport est une fonction géomorphologique qui consomme une énergie en entrée pour produire un objet propagation de matière inerte en

	<p>sortie (exemple un flux solide dans un écoulement).</p> <ul style="list-style-type: none"> – L’accumulation est une fonction géomorphologique qui dissipe de l’énergie en entrée pour produire un objet stockage de matière inerte en sortie (ex. une plage de dépôt).
Écologique	<p>L’assemblage des éléments dégradation organique, anémogamie et cycle du carbone est un objet fonctionnel du métabolisme forestier. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – La dégradation organique est une fonction forestière qui consomme une énergie biochimique en entrée pour produire un objet sol forestier en sortie (ex. l’humification). – L’anémogamie est une fonction forestière qui consomme une énergie éolienne en entrée pour produire un objet transport des pollens entre les organes mâles et femelles d’espèces végétales (ex. reproduction de l’<i>épicéa</i>). – Le cycle du carbone est une fonction forestière qui consomme une énergie solaire en entrée pour produire un objet séquestration du carbone dans la biomasse en sortie (ex. le bois des arbres).
Urbain	<p>L’assemblage des éléments construction, mobilité pendulaire et valorisation est un objet fonctionnel qui participe du métabolisme urbain. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Construire est une fonction urbaine qui assemble des éléments de ressource minérale en entrée pour produire un objet bâti en sortie (ex. l’artificialisation des sols urbains). – La mobilité est une fonction urbaine qui consomme une énergie pour produire un objet transport des usagers entre différents lieux de la ville en sortie (ex. la mobilité pendulaire). – La valorisation d’un bien immobilier est une fonction urbaine qui utilise des éléments de consentement à payer en entrée pour produire un objet valeur en sortie (ex. le prix d’un appartement).
Culturel	<p>L’assemblage des éléments lire, apprendre et enseigner est un objet fonctionnel qui participe à la production de la mémoire culturelle. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Lire est une fonction culturelle qui assemble des éléments symboliques en entrée pour produire la restitution orale d’un objet sémantique en sortie (ex. lire une carte). – Apprendre est une fonction culturelle qui assemble des éléments de connaissance en entrée pour produire un objet savoir en sortie (ex. réviser un cours de géographie). – Enseigner est une fonction culturelle qui mobilise des éléments de savoirs en entrée pour produire un objet de diffusion des connaissances en sortie (ex. un cours de cartographie).

3.2.3. Concept de connexion

Une connexion (tableau 3) est une mise en relation, un connecteur qui relie un ou plusieurs éléments à un ou plusieurs objets du système. Un objet peut être connecté (déconnectable ou non), connectable (déconnecté) ou isolé (non connectable et non connecté), il dispose ainsi d’un domaine de connexions qui peut être mis en relation avec son voisinage systémique.

Tableau 3. Instances du concept de connexion

Domaine	Concept de connexion
Géomorphologique	<p>Le réseau hydrographique est un assemblage qui connecte des ruissellements de surface élémentaires à un ruissellement d'ordre supérieur. Il peut être connecté, connectable (déconnecté) ou isolé (non connectable). Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Un réseau exoréique connecte des ruissellements de surface à une mer ou un océan. – Un réseau endoréique connecte des ruissellements de surface à une cuvette topographique. – Un réseau hydrographique aréique déconnecte des ruissellements de surface par percolation/infiltration vers un écoulement et un stockage souterrains.
Écologique	<p>Un réseau écologique est un assemblage qui connecte différents substrats biophysiques qui peuvent être connectés, connectables (déconnectés) ou isolés (non connectables) à des organismes vivants. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Les corridors écologiques (trames vertes, bleues, brunes, etc.) correspondent à un réseau d'habitats pour une espèce ou un groupe d'espèces et constituent un support de la biodiversité et des interactions entre les écosystèmes. – Les réseaux trophiques sont des chaînes alimentaires reliant différentes ressources (composés organiques et inorganiques) à des producteurs primaires (autotrophes) à des espèces (hétérotrophes) d'herbivores ou de prédateurs. – Une forêt est un écosystème qui connecte différents corridors écologiques avec différentes chaînes trophiques.
Urbain	<p>Un réseau urbain est un assemblage qui connecte différents échanges ou flux urbains qui peuvent être connectés, connectables (déconnectés) ou isolés (non connectables) par des infrastructures urbaines. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Les réseaux de transport sont des supports de la mobilité entre des usagers et différents lieux et usages de la ville. – Les réseaux techniques sont des infrastructures permettant des échanges de flux d'énergie, de déchets et d'informations entre des producteurs et des consommateurs de la ville. – Les réseaux culturels sont des échanges et des mises en relations qui connectent différents acteurs culturels avec des usagers de la ville.
Domaine culturel	<p>Un réseau social est un assemblage qui connecte plusieurs individus. Exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Un réseau d'acteurs institutionnels est une mise en connexion de différents acteurs politiques ou administratifs qui ont un rôle dans un espace social de l'échelle locale à l'échelle globale. – Un réseau d'acteurs culturels est une mise en connexion de producteurs, médiateurs et consommateurs d'une offre culturelle dans un espace culturel de l'échelle locale à l'échelle globale. – Un réseau social numérique est une mise en connexion numérique d'individus ou de groupes d'individus dans un espace numérique privé ou public individuel (familiale, professionnelle, etc.) ou communautaire (communauté d'intérêt) du local au global.

3.2.4. Concept de phase

Une phase (tableau 4) est une étendue temporelle qui décrit une initialisation, une durée et une extinction pour un objet événement du système qui est considéré comme une phase d'états/un état de phases des temporalités pour des événements spatiotemporels (actifs, inactifs, en veille, ouverts, délimités). Une phase correspond donc à une enveloppe de temps durant laquelle le comportement de l'objet reste inchangé en structure, fonction, connexion, échelle et adaptation. Une phase n'est pas synonyme de stabilité du système, car l'instabilité peut relever d'un fonctionnement transitoire entre deux phases de stabilité.

Tableau 4. Instances du concept de phase

Domaine	Concept de phase
Géomorphologique	<p>Un événement géomorphologique est une enveloppe temporelle dans la chronologie (temps linéaire) d'une forme de relief. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Une plaine alluviale est une accumulation temporelle de phases de submersions/alluvionnements dans la chronologie des flux hydrosédimentaires d'un fond de vallée. – Un cycle morphologique est une succession d'états de phases, altération (érosion), exportation (transport) et accumulation (accrétion), qui participe à la morphogénèse (création/évolution) d'une forme de relief. – Une érosion est une phase temporelle durant laquelle un agent érosif exerce une force supérieure à la capacité de résistance d'une forme de relief.
Écologique	<p>Un événement forestier est une enveloppe temporelle dans la chronologie (temps linéaire) d'une forêt. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Dans la forêt méditerranéenne les incendies se produisent principalement pendant la phase temporelle saison sèche. – Dans la forêt des latitudes tempérées, le printemps est une phase d'état à forte croissance végétale. Sur le temps long plusieurs phases d'états se succèdent pour un arbre (pousse, maturité, senescence). – Une phase écologique forestière est un intervalle de temps observable correspondant à un écosystème stable (écotope).
Urbain	<p>Un événement urbain est une enveloppe temporelle dans la chronologie (temps linéaire) d'une ville. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Une inondation urbaine est une phase temporelle durant laquelle l'eau submerge des espaces urbains dont la vocation d'usage est incompatible avec la présence de l'eau. – Une panne sectorielle d'électricité est une phase temporelle durant laquelle plusieurs espaces urbains sont déconnectés du réseau d'approvisionnement électrique. – Une élection municipale est une phase temporelle durant laquelle l'état institutionnel de la ville est modifiable.

Culturel	<p>Un événement culturel est une enveloppe temporelle dans la chronologie (temps linéaire) culturelle. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Une création artistique est une phase temporelle qui associe un avant (maturation) un pendant (réalisation) et une révélation (exposition) pour une œuvre d’art. – La civilisation égyptienne est une phase temporelle durant laquelle la culture égyptienne existe et se diffuse en Afrique, en Méditerranée et en Asie mineure. – Un orchestre philharmonique est une phase temporelle durant laquelle un assemblage de musiciens classiques est regroupé en un lieu de concert pour réaliser une œuvre musicale.
----------	---

3.2.5. Concept d'échelle

Une échelle (tableau 5) est une enveloppe réductionniste qui définit un domaine de validité qui est borné par des limites exclusives internes (internalités) et externes (externalités) pour un objet du système. Les externalités (adjacences) et les internalités (sous-jacentes) sont des forçages potentiels, au-delà des conditions limites d’un modèle, que le réductionnisme a écarté pour réduire la complexité du système. Il s’agit ici de la valeur relative d’un objet par rapport à son contexte systémique, un ratio de complexité en quelque sorte, afin modéliser les connaissances en tenant plus ou moins compte des internalités et des externalités de l’objet dans le système étudié.

Tableau 5. Instances du concept d'échelle

Domaine	Concept d'échelle
Géomorphologique	<p>Un domaine géomorphologique est une enveloppe réductionniste qui borne un domaine de validité par des internalités et des externalités pour une forme de relief donnée. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Le littoral est un domaine géomorphologique qui exclut la plus grande part des espaces océaniques et continentaux. – Un effondrement karstique est le résultat d’une dynamique (internalité) qui modifie le fonctionnement interne d’un relief karstique. – Un cratère d’impact est le résultat d’une dynamique (externalité) qui modifie la morphologie de la surface de la croute terrestre.
Écologique	<p>Un domaine forestier est une enveloppe réductionniste qui borne un domaine de validité par des internalités et des externalités pour une forêt donnée. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – La lisière est un domaine de la forêt qui exclut la plus grande part des espaces forestiers et non forestiers. – Une clairière est le résultat d’une dynamique (internalité) où la strate arborée n’est plus le fonctionnement dominant dans un massif forestier. – Une zone agricole est un domaine non forestier (externalité) qui contribue à la mobilité et au renouvellement des espèces forestières.

Urbain	<p>Un domaine urbain est une enveloppe réductionniste qui borne un domaine de validité par des internalités et des externalités pour un espace urbain donné. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – La frange urbaine est un domaine de la ville qui exclut la plus grande part des espaces urbains et ruraux. – Les corridors écologiques urbains sont des trames (internalité) qui contribuent au maintien d'une biodiversité urbaine. – Une zone de champs captant est un domaine non urbain (externalité) qui participe à la recharge des nappes utilisées pour l'alimentation en eau potable de la ville.
Culturel	<p>Un domaine culturel est une enveloppe réductionniste qui borne un domaine de validité par des internalités et des externalités pour un espace culturel donné. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – La pratique du violon est un domaine musical qui exclut la plus grande part de l'art de la lutherie et de la pratique des autres instruments d'orchestre. – Le tuba est un instrument optionnel (internalité) qui contribue à la sonorité de la section cuivre d'un orchestre symphonique. – La maison de la radio est une institution (externalité) qui met à disposition de l'Orchestre philharmonique de France (OPF) un environnement culturel (infrastructure, organisation, diffusion, etc.) de l'OPF.

3.2.6. Concept d'adaptation

L'adaptation (tableau 6) est nécessaire (voir paragraphe 4.3) sinon tout objet serait donné *a priori* et présenterait une intégrité totale et intemporelle, donc infinie et insensible à toute forme d'évolution y compris la fin de son existence. Cela supposerait une reproduction à l'identique et à l'infini de cycles sans pertes ni gains car ceux-ci constitueraient en soit une adaptation du système existant. Notre proposition considère donc que les SES sont évolutifs et qu'ils s'adaptent/se réadaptent aux conditions/forçages issus de leur contexte systémique.

Tableau 6. Instances du concept d'adaptation

Domaine	Concept d'adaptation
Géomorphologique	<p>L'évolution d'un relief est une adaptation de son état initial en réponse à un assemblage de contraintes issues du métabolisme géomorphologique.</p> <p>Exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Le recul d'un cordon dunaire est une adaptation du trait de côte en réponse à un assemblage de contraintes d'érosion, de transport, d'accrétion, etc., exercées sur le matériel sédimentaire côtier. – La création d'une chaîne de montagne est une adaptation du relief en réponse à un assemblage de contraintes tectoniques, de géodynamique interne, de lithologie, etc., exercées sur la croûte terrestre. – La construction d'un barrage d'avalanche est une adaptation géomorphologique en réponse à un assemblage de contraintes techniques (ouvrage), anthropiques (populations riveraines), etc., exercées sur le couloir d'avalanche.

Écologique	<p>L'évolution d'une forêt est une adaptation de son état initial en réponse à un assemblage de contraintes issues du métabolisme forestier. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – L'évolution d'un sol forestier est une adaptation d'un complexe édaphique en réponse à un assemblage de contraintes biologiques, chimiques, minérales, climatiques, etc., exercées sur l'interface biosphère-lithosphère. – L'évolution de la biodiversité forestière est une adaptation de la présence d'espèces en réponse à un assemblage de contraintes climatologiques, écologiques, anthropiques, etc., exercées sur l'écosystème forêt. – L'évolution des services écosystémiques forestiers est une adaptation des fonctions et supports écologiques en réponse à un assemblage de contraintes écologiques, économiques, culturelles, etc., exercées sur l'écosystème forêt.
Urbain	<p>L'évolution d'une ville est une adaptation de son état initial en réponse à un assemblage de contraintes issues du métabolisme urbain. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – L'étalement urbain est une adaptation de l'espace périurbain en réponse à un besoin de croissance de la population et des activités urbaines. – La requalification urbaine est une adaptation de la vocation de certains espaces urbains en réponse à une réorganisation et à une optimisation des activités et des usages de la ville. – L'attractivité urbaine est une adaptation des rapports ville-périphérie en réponse à la concentration des pouvoirs et des valeurs culturelles et économiques.
Culturel	<p>L'évolution d'une œuvre d'art est une adaptation de sa création initiale en réponse à un assemblage de ses multiples réceptions issues du contexte culturel. Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> – La création d'une œuvre d'art est un phénomène créatif, émergeant en réponse à un assemblage de sensibilités, d'expressions, de techniques, etc., exercées sur un support matériel ou immatériel. – L'acceptation d'une œuvre d'art est un phénomène de réception en réponse à un assemblage de sensibilités, de valeurs, de cultures, etc., exercées sur une proposition artistique. – La relégation d'une œuvre est un phénomène de rejet ou d'oubli culturels en réponse à l'évolution d'un assemblage de sensibilités, de valeurs, de contextes culturels, etc., exercés sur une proposition artistique.

4. Proposition d'ontologie orientée objet à six dimensions pour les socio-écosystèmes

Il est possible d'extraire (segmenter) des objets dans des jeux de données spatiotemporels tout en les renseignant avec des valeurs attributaires et des relations de hiérarchie (*supra* 2.3). Il est aussi possible de définir des concepts qui transcendent les disciplines (*supra* 3.1 et 3.2). Nous proposons maintenant de combiner le paradigme OO avec les six concepts proposés.

4.1. Problèmes de modélisation

Plusieurs problèmes sont posés par la modélisation quand il s'agit d'analyser un SES spatiotemporel (Armstrong, 1988 ; Arenas *et al.*, 2018 ; Bittner *et al.*, 2009). Ils résultent principalement du réductionnisme nécessaire pour transposer la complexité du monde réel dans un modèle numérique spatiotemporel. Il faut également tenir compte du fonctionnement déterministe d'un SI qui applique rigoureusement le modèle et seulement les règles du modèle aussi intelligent soit-il (Gruber, 1995). Dans l'étape réductionniste de la création d'un modèle, le choix d'une ontologie préexistante, la création d'une ontologie *ad hoc* et la délimitation (internalités et externalités) du SES étudié renvoient aux disciplines des parties prenantes aux dépens de la transversalité. Or, pour aborder les SES comme des objets complexes, il est nécessaire de dépasser ces limites disciplinaires (Hervé *et al.*, 2016). Dès qu'une partie d'un système dispose de fonctions de cognition-mémorisation (apprentissage) ou d'une capacité d'autodétermination (libre arbitre), alors le comportement prédictif déterministe s'efface au profit d'un comportement auto-adaptatif (Le Moine, 1999). S'attaquer à la modélisation de la complexité des SES dans un environnement numérique 3D temporel revient à considérer que les SES sont des systèmes modélisables avec les outils de la physique. L'argumentation qui consisterait à dire que les SES sont observables dans le « monde réel » qui a une « existence physique réelle » est un raccourci scientifique qui n'est pas acceptable. Il est du même ordre que celui qui postulerait qu'il serait possible de réaliser l'analyse scientifique d'une peinture de maître en se basant sur son cadre en bois comme conditions aux limites et sur la seule position (4D) relative des éléments de matières utilisés par le peintre comme conditions initiales. Dans le meilleur des cas, ce modèle de connaissances et d'analyse basé sur un tel réductionnisme physique ne pourrait que décrire un état de phase physique de la peinture, en imaginant que l'on puisse déconstruire la succession des gestes du peintre à partir de l'assemblage des traces laissées par la technique employée. Mais, en aucun cas, il ne pourrait expliquer ce que le peintre a souhaité représenter ni dans quel contexte culturel le résultat final obtenu aurait atteint les objectifs recherchés par l'artiste. Il ne pourrait pas plus expliquer comment l'œuvre est reçue, cognitivement, par un individu inconnu et portant un regard sur le tableau. Dans cet exemple, qui associe des éléments matériels physiques et des éléments immatériels culturels dans un objet peinture, il est évident qu'un modèle de connaissance uniquement basé sur un modèle physique 4D est inadapté. De même sans ces connaissances physiques, il serait difficile de décrire et de reconstruire à posteriori l'usage des pigments sur une surface de fibre qui a offert à l'artiste un vecteur d'expression sensible et culturelle.

Ce qui est recherché dans notre proposition, ce n'est pas de résoudre le problème de la modélisation de la complexité des SES mais de doter le modélisateur d'une TLO (Guarino, 1997 ; Arp *et al.*, 2015) permettant de construire un modèle systémique sur base de connaissances pluridisciplinaires. A partir des six concepts proposés (structure, fonction, connexion, phase, échelle et adaptation) nous proposons donc, en théorie, de modéliser les SES en dehors de l'espace 4D en les

projetant dans un espace de phases dont les dimensions numériques ne sont plus physiques mais OO et systémiques. Ce basculement de référentiel nous semble ouvrir des perspectives de modélisation dans lesquelles notre proposition de concepts peut être utilisée pour dimensionner et renseigner les objets des SES.

4.2. Une ontologie pour les socio-écosystèmes

Dans notre proposition OOO 6.0, l’objectif recherché est le positionnement des connaissances dans une ontologie qui décrit un modèle d’interactions complexes au sein d’un SES. Passer d’un modèle physique du monde réel (4D) à un espace de phases dimensionné sur la base théorique des six concepts proposés revient à créer un modèle de connaissances qui n’est plus basé sur la position des objets dans le domaine spatiotemporel (le monde réel) mais sur la position relative des objets de connaissance dans l’espace des phases (tableau 7) d’un système de connaissances étudié. Là où un modèle 4D découpe et dimensionne les objets en volumes (surfaces et distance) temporels par leurs positions spatiotemporelles, notre proposition lui substitue des objets dimensionnés par leur position relative dans un espace renseigné par les six concepts proposés (tableau 7). Or, pour dimensionner, il faut pouvoir mesurer en utilisant une métrique adaptée car une dimension est avant tout une étendue mesurable (les distances en mètres, le temps en secondes, etc.). Qu’en est-il dans notre modèle ?

Tableau 7. Matrice conceptuelle intégrant les 6 concepts proposés

Dimen- sions	Structure	Fonction	Connexion	Phase	Échelle	Adaptation
Structure	Meta structure	Fonct. structurale	Connex. structurale	Phase structurale	Échel. structurale	Adapt. structurale
Fonction	Struct. fonctionnelle	Meta fonction	Connex. fonctionnelle	Phase fonctionnelle	Échel. fonctionnelle	Adapt. fonctionnelle
Connexion	Struct. connective	Fonct. connective	Meta connexion	Phase connective	Échel. connective	Adapt. connective
Phase	Struct. phasée	Fonct. phasée	Connex. phasée	Meta phase	Échel. phasée	Adapt. phasée
Échelle	Struct. scalaire	Fonct. scalaire	Connex. scalaire	Phase scalaire	Meta échelle	Adapt. scalaire
Adapta- tion	Struct. adaptative	Fonct. adaptative	Connex. adaptative	Phase adaptative	Échel. adaptative	Meta adaptation

Pour comprendre ce passage de la 4D aux six dimensions de l’espace de phases nous prenons l’exemple du croisement de la structure des deux objets A et B dont la méta structure (structure de structure) correspond à l’une des six dimensions de notre proposition OOO. Soit une structure A, administrative, « département » qui est un assemblage d’objets « cantons », eux même assemblages d’éléments/objets

« communes ». Un département est une structure, de structures cantonales, de structures communales... Il est possible de dimensionner cet objet administratif en fonction de la quantification (mesure) du nombre d'éléments qui s'agrègent dans la méta structure administrative d'un département. Soit une autre structure B, arborée, « boisement » qui est un assemblage d'objets « arborés » (forêts, bois, bosquets, etc.), eux même assemblages d'éléments/objets « arbres ». Il est également possible de dimensionner cet objet boisement en fonction de la quantification (mesure) du nombre d'éléments qui s'agrègent dans leurs structures (ici arborée). Un boisement est une structure, de structures arborées, de structures arbres.

Si nous croisons la structure de l'objet administratif « département » avec l'objet arboré « boisement ». Nous pouvons extraire une nouvelle structure d'objets « département.boisement » qui segmente par intersection OO les deux structures. Nous obtenons ainsi une nouvelle structure, de structures « cantons.boisement », de structures « comunes.boisement ». Nous appelons « métastructure » (tableau 7) cette structure de structures et nous postulons que celle-ci est une dimension de la structure du SES département.boisement. Par transposition aux 5 autres concepts, nous postulons également que les méta fonction, connexion, phase, échelle et adaptation sont elles aussi des dimensions systémiques qui sont donc applicables, à partir des connaissances disponibles, au SES « département.boisement » (pour l'exemple simple utilisé ici). Nous postulons également qu'un modèle relationnel basé sur le dimensionnement des objets d'un SES à partir de ces six dimensions « méta » relève d'un domaine théorique de connaissances s'appuyant sur une OOO 6.0. Enfin, nous postulons que ces six dimensions ne sont pas disciplinaires et qu'elles peuvent donc servir comme outils de dialogue pour la modélisation plurivoire transdisciplinaire.

Les cinq premières dimensions ont une proximité sémantique indéniable avec les concepts couramment utilisés dans la modélisation spatiotemporelle des SES : structure pour entité, fonction pour fonction, connexion pour relation, phase pour temporalité, échelle pour réduction (de la complexité étudiée). Il y a cependant un décalage sémantique volontaire :

- 1) pour limiter les confusions avec le modèle entité-attribut-relation-temps qui est couramment utilisé en géomatique et en modélisation de base de données ;
- 2) parce que notre proposition OOO 6.0 accepte des attributs (propriétés) sémantiques, sur les six dimensions des objets ;
- 3) parce que les objets 6.0 de l'espace de phases incluent des attributs (propriétés) de positionnement spatiotemporel pour leur visualisation-représentation-mise à jour dans l'espace physique 4D.

En revanche, lors des échanges scientifiques autour de cette proposition OOO 6.0 dans les séminaires de l'AP Ontologies et Dynamiques spatiales du GDR MAGIS entre 2017 et 2020, la question de la sixième dimension « adaptation » a fait débat justifiant un effort de clarification.

4.3. Discussion sur l'adaptation

Pourquoi une sixième dimension plutôt que d'en rester à cinq ? Pourquoi ne pas ajouter plus de dimensions ? Pour répondre à ces deux questions il est d'abord nécessaire de différencier la dimension adaptation de la dimension fonction dans notre proposition.

La dimension fonction modélise l'assemblage des processus, opérations, actions, rôles... d'un système tels qu'ils sont connus et décrits par l'utilisateur. Dans une approche purement déterministe, une ou plusieurs entrées connues d'une fonction produisent une ou plusieurs sorties déterminées, anticipées, prévisibles... Une fonction est donc strictement délimitée dans ses interactions avec le système. Dans un système purement physique une fonction obéit donc à des lois déterminées et connues par le modélisateur. Or, dans le monde réel, ce déterminisme « fonctionnel » ne permet pas de prédire, de modéliser précisément, le comportement d'un SES car les capacités d'autodétermination, d'apprentissage, d'évolution des éléments du système sont précisément des capacités d'adaptation relatives à leur niveau de cognition. Certains éléments d'un SES sont très adaptatifs et autodéterminés quand d'autres peuvent au contraire répondre à des lois de comportement parfaitement prédictives. Certains éléments des SES sont sensibles aux forçages, d'autres moins... Il y a donc, de notre point de vue, nécessité d'une autre dimension, une sixième, qui modélise un intervalle/une variété de comportements possibles, non linéaires, pour une fonction, mais aussi pour les quatre autres dimensions de notre proposition. Les dimensions structure, fonction, connexion, phase et échelle sont toutes adaptatives (figure 3 et tableau 7), relativement aux interactions entre et à l'intérieur des objets d'un SES qui, par rétroactions peuvent être indéterminées voire indéterminables.

Ainsi dans la figure 3, nous considérons les relations entre les six dimensions comme des interactions de type 6.0 et nous considérons que l'adaptation exerce également une rétroaction (positive, négative ou neutre) sur l'ensemble des dimensions y compris elle-même (voir tableau 7). L'adaptation d'une structure (un assemblage parmi tous les assemblages) d'un SES aura donc, par rétroaction un effet de redimensionnement sur une ou plusieurs des six dimensions du modèle. Les six dimensions étant interactives, chaque objet est lui-même un assemblage structurel-fonctionnel-relationnel-phasé-scalaire-adaptatif en interaction avec les autres objets qui l'environnent (externalités comme internalités). La complexité croît très rapidement dans ce modèle d'abstraction à six dimensions. En contrepartie, elle propose une « portabilité transdisciplinaire » pour la modélisation des connaissances utiles dans l'analyse d'un SES. Elle ne répond cependant pas à la question : est-il nécessaire d'utiliser un modèle complexe pour résoudre l'analyse d'un système complexe ?

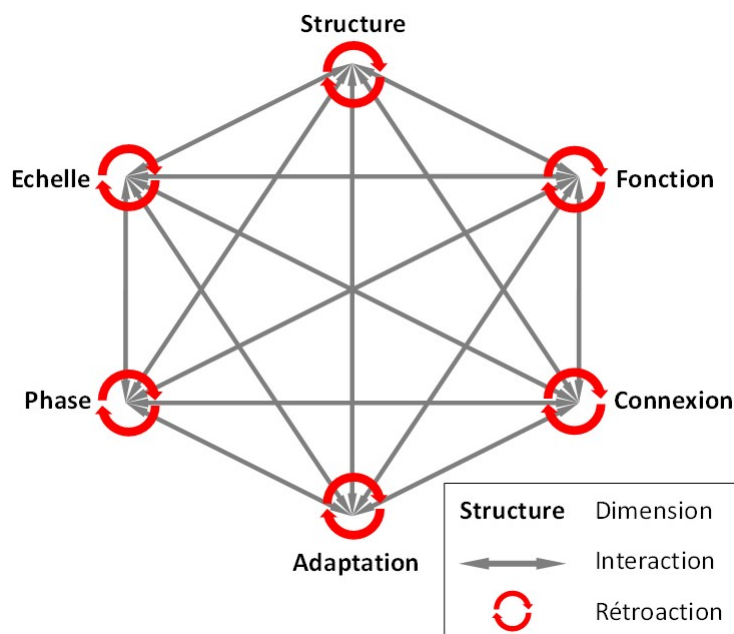


Figure 3. Schéma relationnel en 6D

Sans une dimension adaptation, un SES serait nécessairement déterministe. L'ensemble des objets répondraient aux lois de comportement définies par l'utilisateur sans laisser de place à des phénomènes tels que l'émergence, ou l'autodétermination. Si certains systèmes physiques peuvent être considérés comme strictement déterministes, les SES sont quant à eux extrêmement auto-adaptatifs donc incertains. Ces derniers procèdent à leurs propres phénomènes d'émergence, d'autorégulation, d'évolution, d'intentionnalité et d'intelligence. Pour le dire plus simplement ils s'adaptent selon des modalités systémiques plus ou moins complexes auxquelles ils sont en interrelations (internalités et externalités). Avec cette sixième dimension notre proposition OOO 6.0 ressemble à un modèle systémique chimérique. Il n'est pas possible de représenter physiquement, graphiquement ou numériquement ses six dimensions. Raisonner avec un tel modèle de connaissances n'est pas aisé. Il est donc nécessaire d'accompagner cette proposition ontologique par une analyse des relations qui existent entre ces six dimensions afin de comprendre comment l'utiliser pour agréger les connaissances utiles à la modélisation d'un SES.

4.4. Une topologie à six dimensions

Dans une ontologie basée sur un modèle de réalité 4D, les objets sont des volumes temporels que l'on peut représenter par une animation temporelle associée à une géométrie 3D. Par exemple un volume d'eau envahi, puis libère une zone inondable en fonction de la temporalité d'une crue. Si le système étudié n'est pas seulement l'écoulement de crue mais le risque inondation, alors la question des vulnérabilités qui y est associée implique une plus grande complexité dans la modélisation du système étudié. Cette complexité est fortement dépendante des décisions individuelles prises par les populations concernées qui n'obéissent pas à des lois comportementales aussi déterministes que celles de l'hydraulique fluviale. En fonction de critères multiples tels que la mémoire du risque, l'anticipation (préparation à la crue), la mitigation du risque, la mobilité journalière (travail) ou saisonnière (vacances)... les habitants des zones inondables sont non seulement des « agents autodéterminés » qui développent des stratégies de réponses complexes mais aussi des éléments du système risque. Une modélisation réaliste des différentes actions réelles est très complexe à modéliser au niveau de l'individu ou d'une communauté locale. Notre proposition ne s'appuyant pas sur une modélisation 3D temporelle, elle permet d'intégrer plus de complexité que l'interaction spatiotemporelle d'entités physiques ou abstraites décrites par leurs propriétés dans un modèle de connaissances sous SIG.

Nous postulons que les objets d'un SES utilisant notre modèle de connaissances peuvent être extraits par segmentation OO à partir d'une base de connaissance construite sur le modèle d'OOO 6.0 proposé. Nous postulons également qu'une topologie OO à 6 dimensions peut aussi être implémentée pour réaliser une analyse des connaissances d'un SES qui intègre plus de complexité que la relation spatiotemporelle 3D (surface-temps) ou 4D (volume-temps). Mener à bien une telle analyse impose de réinterpréter en dimension 6.0 les modèles de relations topologiques DE-9IM (Clementini et Di Felice, 1996 ; Proteau, 2011 ; Strobl, 2008), RCC-8 (Randell *et al.*, 1992), temporels (Allen, 1983) et booléens (Egenhofer, 1989 ; Egenhofer *et al.*, 1989). Les treize relations de bases de James Allen (Allen, 1983) pour la modélisation des relations entre deux segments temporels (figure 4) en est un autre très bon exemple. En effet, ce modèle relationnel par J. Allen pour la dimension temporelle, donc en 1D, peut directement s'appliquer à chacune des six dimensions de notre modèle de connaissances OO. Là où Allen figure des durées par un segment de droite de dimension variable, nous pouvons figurer une étendue entre la limite interne et externe des objets sur chacune de leurs six dimensions. Chaque étendue correspond donc à un segment sur chacune des six dimensions du volume 6.0 de la même façon que les segments de longueur, largeur et profondeur sont les trois dimensions d'un objet physiques dans l'espace 3D. En d'autres termes, dans notre proposition OOO 6.0, un objet est un hypervolume de dimension 6 qui est l'assemblage de ses six étendues dimensionnelles.

Relation	Interprétation	Réciproque	Visualisation de la relation de temporalité
$X < Y$	X est avant Y	Y est après X ($Y > X$)	
$X m Y$	X rejoint Y	Y rejoint X ($Y mi X$)	
$X o Y$	X recouvre partiellement Y	Y recouvre partiellement X ($Y oi X$)	
$X s Y$	X débute avec Y	Y débute avec X ($Y si X$)	
$X d Y$	X pendant Y	Y enveloppe X ($Y di X$)	
$X f Y$	X fini avec Y	Y fini avec X ($Y fi X$)	
$X = Y$	X égale Y	Y égale X ($Y = X$)	

Figure 4. Modèle de relations entre deux segments temporels X et Y (modifié de Allen, 1983)

Comme pour le modèle topologique 1D de Allen, il est possible de décliner des modèles de dimensions supérieures 2D, 2D temporels et 3D temporels... Une topologie 6.0, orientée objet n'est donc pas une chimère mais bien un modèle relationnel, méréotopologique (Smith, 1996), qui peut s'appuyer sur des bases théoriques disponibles et qui permet d'intégrer plus de complexité tout en dépassant le carcan de la modélisation 3D temporelle qui s'accommode très mal des interactions complexes et anthropocentrées présentes dans les SES.

5. Perspectives ontologiques

Cette proposition OOO 6.0 est singulière à plus d'un titre par la position épistémique qu'elle propose d'occuper. Il s'agit en effet de changer de paradigme pour la modélisation et l'analyse des SES en proposant une alternative aux ontologies contemporaines qui sont principalement basées sur des entités temporelles, physiques (3D) ou intentionnelles (formes), associées à leurs propriétés, relations et attributs. Cette alternative, une OOO 6.0, ambitionne de répondre aux prédicats suivants :

- l'interopérabilité conceptuelle entre plusieurs domaines de connaissances issues des disciplines de l'environnement et de la société sur la base des six concepts non disciplinaires proposés ;

- transcender la dichotomie ontologique entre entité (l'être) et propriétés (l'étant) qui sont ici considérées comme des assemblages, des construits, des représentations,

etc. à partir d'éléments de connaissances réorganisés dans une ontologie orientée objet s'appuyant sur les six concepts proposés ;

– la modélisation orientée objet dans un espace de phases de dimension 6 où la construction/déconstruction ontologique des SES s'appuie sur une logique booléenne (figure 5) appliquée à la théorie des ensembles qui sont ici des assemblages d'éléments de connaissance ;

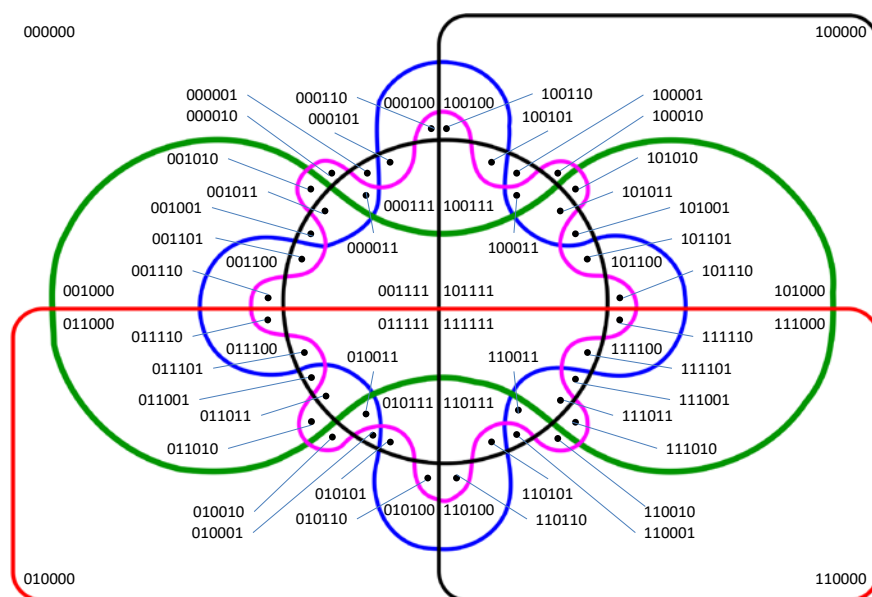


Figure 5. Diagramme de Venn à 6 classes (modifié de Edwards, 2004 ; figure sous licence CC BY-SA 3.0). Un objet de dimension 6.0 peut présenter 2^6 éléments logiques (table de vérité) pour instancier un assemblage de connaissances

– de compatibilité avec la logique des ensembles flous par le jeu d'interaction et d'assemblage des éléments connaissances par intégration de leurs dimensions de phase, d'échelle et d'adaptabilité ;

– l'analyse systémique associant des parties, des objets éléments de connaissance, pour construire un tout, l'objet système étudié, en réinterrogeant la dynamique spatiotemporelle des SES avec une matrice de six concepts de premier ordre (structure fonction, connexion, phase, échelle, adaptation), de trente concepts de second ordre (tableau 7) et de six « méta concepts » (tableau 7), ces derniers étant considérés comme les six dimensions de notre proposition d'OOO ;

– d'alternative théorique à l'organisation des connaissances basée sur un modèle disciplinaire descendant et arborescent, tel que celui proposé par Melvil Dewey (Dewey, 1876) qui s'appuie exclusivement sur une segmentation par discipline-

sujets/généralités-singularité, ou celui proposé par le modèle RDF, bien plus récent car lié au web sémantique et à l'indexation des connaissances sur la base d'un multigraphe-orienté-annoté, s'appuyant sur le triplet sujet-prédicat-objet,

– d'extraction des lacunes de connaissances d'un SES étudié à partir de l'empreinte inverse du volume de connaissances explicitées, ces dernières correspondant aux conditions limites de l'ontologie déployée.

L'OOO 6.0 propose donc des concepts généraux, applicables dans toutes les disciplines, permettant de modéliser les entités et leurs propriétés comme des objets de second ordre. Notre proposition ontologique est encore à l'état conceptuel tout en se positionnant dans le registre des ontologies fondationnelles, de haut niveau, selon les critères définis par Guarino (1997) ou Arp *et al.* (2015). Plusieurs défis apparaissent encore comme autant d'étapes à franchir pour envisager son opérationnalité :

- passer d'une ontologie conceptuelle à une ontologie formelle ;
- compléter son axiomatisation en s'appuyant sur les travaux déjà réalisés dans le cadre d'autres ontologies formelles de haut niveau ;
- assembler une base de données susceptible de tester/valider son opérationnalité pour un modèle de SES suffisamment complexe et documenté pour alimenter une OOO 6.0.

Remerciements

L'auteur tient à remercier les nombreux collègues qui ont contribué par leur écoute, leurs critiques constructives et leurs encouragements à la réalisation de ce travail théorique : Pr P. Meire (University of Antwerp), Dr D. Amatya (USDA-FS, Santee Experimental Forest), Pr L. Lavkulich (University of British Columbia), Pr C. De Jong (université de Strasbourg), Pr A. Vadineanu (universitatea din Bucuresti), Pr M. Keiler (universität Bern), Pr Y. Guermond (université de Rouen), Pr O. Blanpain et Pr A. Leprêtre (université de Lille). Cet article doit également beaucoup aux membres de l'Action Prospective « Ontologies et dynamiques spatiales » du GDR 2340 MAGIS du CNRS dont les nombreux échanges scientifiques ont été déterminants. Enfin, nous remercions sincèrement les relecteurs pour leurs suggestions constructives qui ont permis la finalisation de cet article.

Bibliographie

- Allen C.R., Holling C.S. (Eds) (2008). *Discontinuities in Ecosystems and Other Complex Systems*, Columbia University Press.
- Allen J.F. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communication to the ACM*, vol. 26, n° 11, p. 832-843.
- Alter N. (2003). Movement and dyschrony in organizations. *L'année sociologique*, vol. 53, n° 2, p. 489-514.

- Arenas H., Trojahn C., Comparot C., Aussenac-Gilles C. (2018). Un modèle pour l'intégration spatiale et temporelle de données géolocalisées. *Revue internationale de géomatique*, vol. 28, n° 2/2018, p. 243-266.
- Armstrong D.M. (1997). *A World of States of Affairs*, Cambridge University Press.
- Arp A., Smith B., Spear A.-D. (2015). *Building Ontologies with Basic Formal Ontology*. The MIT Press
- Arvor D., Durieux L., André S., Laporte M-A. (2013). Advances in geographic object-based image analysis with ontologies: A review of main contributions and limitations from a remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, vol. 82, p. 125-137.
- Baartman J.E.M., Melsen L.A., Morre D., van der Ploeg M.J. (2020). *On the Complexity Of Model Complexity: Viewpoints Across the Geosciences*, Catena, 186.
- Bak P. (1996). *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*, Springer Verlag.
- Barnaud G. (2000). Identifier et caractériser les zones humides une diversité de points de vue. *Fonctions et valeurs des zones humides*, Fustec E., Lefeuvre J.C. et al., Éditions Dunod Paris, coll. « Environnement », p. 39-59.
- Bausch U. (1979). Extraktion von Objekten aus Luftbildern durch objektspezifische Verfahren mit stufenweiser Verbesserung der örtlichen Genauigkeit. *Angewandte Szenenanalyse, DAGM-Symposium, Karlsruhe, 10-12 Okt.*, p. 50-62.
- Blaschke T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, n° 1, p. 2-16.
- Blaschke T., Hay G.-J., Kelly M., Lang S., Hofmann P., Addink E., Quieroz Feitosa R., van der Meer F., van der Werff H., van Coillie F., Tiede D. (2014). Geographic object-based image analysis – Towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 87, January, p. 180-191.
- Bouillé F. (1975). Structuration et saisie des données cartographiques. *Journée d'étude : Acquisition et structuration de l'information graphique*, Comité français de Cartographie (CFC), Paris.
- Bouillé F. (1977). Un modèle universel de banque de données simultanément portable, répartie, Thèse d'État ès sciences (spécialité : mathématiques, mention : informatique) Paris, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Bouillé F. (1978). Structuring cartographic data and spatial processes with the hypergraph-based data structure. *First International Symposium on Topological Data Structures for GIS. Cambridge*, G. Dutton (Ed.), Mass.: Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Harvard University.
- Brentano F. (1976). *Philosophische Untersuchungen zu Raum, Zeit und Kontinuum*, hrsg. von S. Körner and R. M. Chisholm, Hamburg: Meiner (cited according to the English translation by B. Smith, *Philosophical Investigations on Space, Time and the Continuum*, London: Croom Helm, 1988).

- Burrough P.A., Frank A.U. (eds.) (1996). *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*, London and Bristol, PA: Taylor and Francis.
- Carnap R. (1922). *L'espace. Une contribution à la théorie de la science*. Trad. Wagner P., Editions Gallimard, coll. "NRF".
- Casati R., Varzi A.C. (1999). *Parts and Places. The Structures of Spatial Representation*. The MIT Press.
- Clementini E., Di Felice P. (1996). A model for representing topological relationships between complex geometric features in spatial databases. *Information Sciences*, 90, p. 121-136.
- Clementini E., Lejdel B., Mazzagufu S., Laurini R. (2021). Homological relations: A methodology for the certification of irregular tessellations. *Transactions in GIS*, 25, p. 491-515.
- Daniels S.E., Walker G.B. (1996). Collaborative learning: Improving public deliberation in ecosystem-based management. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 16, n° 2, p. 71-102.
- De Sède-Marceau M.-H., Moine A.T.S. (2011). Développement d'observatoires territoriaux, entre complexité et pragmatisme. *L'Espace Géographique*, vol. 2, p. 117-126.
- Dewey M. (1876). *A Classification And Subject Index For Cataloguing And Arranging: The Books And Pamphlets Of A Library*. Amherst, Mass.
- DiGiuseppe N., Pouchard L., Noy N. (2014). SWEET ontology coverage for earth system sciences. *Earth Science Informatics*, December, vol. 7, n° 4, p. 249-264.
- Edwards A.W.F. (2004). *Cogwheels of the Mind - The Story of Venn Diagrams*. Johns Hopkins University Press.
- Egenhofer M.J. (1989). A formal definition of binary topological relationships. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 367, p. 457-472.
- Egenhofer M.J., Frank A.U., Jackson J.P. (1989). A topological data model for spatial databases. Design and implementation of large spatial databases. SSD 1989. *Lecture Notes in Computer Science*, Buchmann A.P., Günther O., Smith T.R., Wang Y.F. (Eds) vol. 409, Springer, p. 271-286.
- Ehresmann A.C., Vanbremeersch J.-P. (2007). Memory evolutive systems: Hierarchy, emergence, cognition. *Studies in Multidisciplinarity*, Elseviers, vol. 4.
- Esch T., Thiel M., Bock M., Roth A., Dech S. (2008). Improvement of image segmentation accuracy based on multiscale optimization procedure. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 5, p. 463-467.
- Folke C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, vol. 16, n° 3, p. 253-267.
- Folke C., Colding J., Berkes F. (2003). Synthesis: Building resilience and adaptive capacity in social-ecological systems. *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*, Berkes F., Colding J., Folke C. (Eds), Cambridge University Press, p. 352-387.

- Fu K.S., Mui J.K. (1980). A survey on image segmentation. *Pattern Recognition*, vol. 13, p. 3-16.
- Fustec E., Lefeuvre J.C. (ed.), (2000). *Fonctions et valeurs des zones humides*, Dunod, coll. « Environnement ».
- Gangemi A., Guarino N., Masolo C., Oltramari A., Schneider L. (2002). Sweetening ontologies with DOLCE. Proceedings of the 13th *International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management. Ontologies and the Semantic Web. EKAW'02*, Springer-Verlag, London, UK, p. 166-181.
- Garcia L. F., Abel M., Perrin M., Alvarenga R. S. (2020). The GeoCore ontology: A core ontology for general use in Geology. *Computers & Geosciences*, 135 (2020), 104387.
- Gervais S.J., Bernard P., Klein O., Allen J. (2013). Toward a unified theory of objectification and dehumanization. *Objectification and (De)Humanization, Nebraska Symposium on Motivation*, Gervais S.J. (Ed.), vol. 60, p. 1-23.
- Girel M. (2006). Relations internes et relations spatiales : James, Bradley et Green. *Archives de la Philosophie*, 69, p. 396-414.
- Grenon P. (2008). A primer on knowledge management and ontological engineering. *Applied Ontology. An introduction*, Munn K., Smith B. (Dir.), Ontos Verlag, p. 57-81.
- Gruber T.R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, vol. 5, n° 2, p. 199-220.
- Gruber T.R. (1995). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal of Human-Computer Studies*, 43, p. 907-928.
- Gruenfeld D.H., Inesi M.E., Magee J.C., Galinsky A.D. (2008). Power and the objectification of social targets. *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 95, n° 1, p. 111-127.
- Guarino N. (1997). Some organizing principles for a unified top-level ontology. *AAAI Technical Report*, SS-97-06.
- Guizzardi, G., 2005. Ontological foundations for structural conceptual models. *CTIT Ph.D. Thesis Series*, vol. 05-74, Universal Press, Enschede, The Netherlands.
- Gunderson L.H., Holling C.S. (eds) (2002). *Panarchy. Understanding Transformation in Human and Natural Systems*. Island Press.
- Halioua B. (2017). *Le procès des médecins de Nuremberg*, Erès, coll. « Espace éthique ».
- Harman G. (2018). *Object Oriented Ontology. A New Theory of Everything*. Pelican Book.
- Heller M. (1984). *Temporal Parts of Four-Dimensional Objects. Philosophical Studies*, 46, p. 323-334.
- Heller M. (1990). *The Ontology of Physical Objects: Four-Dimensional Hunks of Matter*, coll. "Cambridge Studies in Philosophy", Cambridge University Press.
- Hennig B. (2008). What is formal ontology? *Applied Ontology. An introduction*, Munn K., Smith B. (Dir.), Ontos Verlag, p. 39-56.

- Herre H. (2010). General formal ontology (GFO): A foundational ontology for conceptual modelling. *Theory and Applications of Ontology: Computer Applications*, Springer, p. 297-345.
- Hervé D., Guermond Y., Frieberg C., Masson E., Laloë F. (2016). Modélisation des systèmes complexes et interdisciplinarité. *Interdisciplinarités entre Nature et Sociétés*, Actes du colloque de Cerisy, Hubert B. et Mathieu N. (dir.), coll. « EcoPolis », Peter Lang, p. 167-178.
- Hess G. (2017). Réconcilier l'éthique environnementale et l'écologie politique : une analyse méta-éthique. *La pensée Écologique*, n° 1.
- Holling C.S., Carpenter S.C., Brock W.A., Gunderson L.H. (2002). Chapter 15 – Discoveries for sustainable futures. *Panarchy-Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Gunderson L.H., Holling C.S. (Ed.), p. 395-417.
- Husserl E. (1900). Logische Untersuchungen. *Prolégomènes à la logique pure*, trad. Elie H. et al. (1969), PUF.
- Johansson I. (1992). Intentionality and tendency: How to make Aristotle up to date. *Language, Truth and Ontology*, K. Mulligan (Ed.), Kluwer, p. 180-192.
- Johansson I. (2004). *Ontological Investigations. An Inquiry Into Categories of Nature, Man and Society*. Ontos Verlag, 2nd ed.
- Jorgensen S.E., Fath B.D., Bastianoni S., Marques J.C., Muller F., Nielsen S.N., Patten B.C., Tiezzi E., Ulanowicz R.E. (2007). *A New Ecology. System Perspective*, Elsevier.
- Kuipers B.J. (1978). *Modeling Spatial Knowledge. Cognitive Science*, 2, p. 129-153.
- Kuipers B.J. (1994). An ontological hierarchy for spatial knowledge. *AAAI Technical Report FS-94-03*, p. 93-97.
- Laurini R. (1990). Ingénierie des connaissances spatiales : le cas de la géomatique. *Espace Géographique*, tome 19-20, 1, p. 24-40. doi: <https://doi.org/10.3406/spgeo.1990.2941>.
- Le Moigne J.-L. (1999). *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod.
- Le Moigne J.-L., Morin E. (dir.) (2007). *Intelligence de la complexité. Epistémologie et pragmatique*, L'Aube, essai.
- Liu J., Dietz T., Carpenter S.R., Alberti M., Folke C., Moran E., Pell A.N., Deaman P., Kratz T., Lubchenko J., Ostrom E., Ouyang Z., Provencher W., Redman C.L. Schneider S.H., Taylor W.W. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, n° 317-5844, p. 1513-1516.
- Loireau M., Fargette M., Desconnets J.-C., Khiari H. (2017). Observatoire scientifique en appui aux gestionnaires de territoire, entre abstraction OSAGE et réalité ROSELT/OSS. *Revue internationale de géomatique*, vol. 27, n° 3, p. 303-333.
- Malczewski J., Jankowski P. (2020). Emerging trends and research frontiers in spatial multicriteria analysis. *International Journal of Geographical Information Science*.
- Marx K. (1992 [1844]). Economic and philosophical manuscripts. *Early Writings*, Trad. Livingstone R., Benton G., Peguin Books p. 279-400.

- Mc Mullen J.M., Meacham P.A. (1996). A comparison of wetland boundaries delineated in the field to those boundaries on existing state and federal wetlands maps in central new york state. *Wetlands: Environmental Gradients, Boundaries, and Buffers*, Mulamootil G., Warner B.G., McBean E.A. (Eds), CRC, Lewis Publishers, Proceedings of an international symposium, April 22-23, 1994, p. 193-205.
- Meunier C.L., Malzahn A.M., Boersma M. (2014). A new approach to homeostatic regulation: Towards a unified view of physiological and ecological concepts. *PLoS ONE*, vol. 9, n° 9.
- Morin E. (2008 [1986]). La méthode. Tome 3. La connaissance de la connaissance. *La méthode*, E. Morin, vol 1, coll. « Opus », Seuil, p. 1169-1466.
- Munn K., Smith B. (dZir.) (2008). *Applied Ontology. An introduction*. Ontos Verlag.
- Niles I., Pease A. (2001). Towards a standard upper ontology. *Proceedings of the International Conference on Formal Ontology in Information Systems*, vol. 2001, ACM, p. 2-9.
- Nussbaum M. (1995). Objectification. *Philosophy & Public Affairs*, vol. 24, n° 4, p. 249-291.
- Partelow S. (2018). A review of the social-ecological system (SES) framework: Applications, methods, modifications and challenges. *Ecology and Society*, vol. 23, n° 4.
- Partridge C., Stefanova M. (2003). Building a foundation for ontologies of organisation. *The Ontology and Modelling of Real Estate Transactions: European Jurisdictions* ("International Land Management" Series), p. 141-149.
- Peterson G.D. (2008). Self-organization and discontinuities in ecosystems. *Discontinuities in Ecosystems and Other Complex Systems*, Allen C.R., Holling C.S. (Ed.), Columbia University Press, p. 20-30.
- Pirot F., Saint-Gérand T. (2005). La Géodatabase sous ArcGIS, des fondements conceptuels à l'implémentation logicielle, *Géomatique Expert*, n° 41/42, février-mars, p. 62-66.
- Prewitt J.M.S. (1971). Object enhancement and extraction, *Picture Processing and Psychopictorics: Pictorial Pattern Perception*, Lipkin B.S., Rosenfeld A. (eds), 1st edition, Academic Press Inc, p. 75-149.
- Proteau J.C. (2011). Matrices de Clementini et Prédicats spatiaux de l'OGC. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, SG/SPSSI/PSII.
- Radig B. (1978). Description of moving objects based on parametrized region extraction. *Proceedings of the 4th International Conference on Pattern Recognition*, Kyoto Japan; 7-10 Nov., p. 719-721.
- Randell D.A., Cui Z., Cohn A.G. (1992). A spatial logic based on regions and connection. *KR* 92, p. 165-176.
- Raskin R. G. and Pan M. J. (2005). Knowledge representation in the semantic web for Earth and environmental terminology (SWEET). *Computers & Geosciences*, vol 31, n° 9, Nov., p. 1119-1125.
- Saint-Gérand T. (2002). SIG: Structures conceptuelles pour l'analyse spatiale. HDR Université de Rouen.

- Servigne S. (2010). Conception, architecture et urbanisation des systèmes d'information. *Encyclopædia Universalis*, p. 1-15.
- Smith B. (1994). *Austrian Philosophy: The Legacy of Franz Brentano*. Open Court.
- Smith B. (1996). Mereotopology: A theory of parts and boundaries. *Data and Knowledge Engineering*, 20, p. 287-303.
- Smith B. (1999). *Ontology: Philosophical and Computational*, non publié, <http://wings.buffalo.edu/philosophy/faculty/smith/articles/ontologies.htm>
- Smith B., Mark D.M. (2003). Do mountains exist? Towards an ontology of landforms. *Environment and Planning B: Planning and design*, vol. 30, p. 411-427.
- Smith B., Varzi A.C. (2000). Fiat and bona fide boundaries. *Philosophy and Phenomenological Research*, vol. 60, n° 2, p. 401-420.
- Smith B., Woodruff Smith D. (dir.) (1995). *The Cambridge Companion to Husserl*. Cambridge University Press.
- Sowa J-F. (1995). Top-level ontological categories. *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 43, n° 5-6, Nov., p. 669-685.
- Steneck R.S. (1986). The ecology of coralline algal crusts: convergent patterns and adaptative strategies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 17, p. 273-303.
- Strobl C. (2008). Dimensionally extended nine-intersection model (DE-9IM). *Encyclopedia of GIS*, Shekhar S., Xiong H. (Eds), Springer, Boston, MA.
- Tissot C., Cuq F. (2004). Apport des SIG pour la modélisation spatio-temporelle d'activités humaines. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 14, n° 1, p. 83-96.
- Tran B.H., Plumejeaud-Perreau C., Bouju A., Bretagnolle V. (2017). Système d'information spatiotemporel pour l'intégration et l'exploitation de données environnementales. *Revue internationale de géomatique*, vol. 27, n° 3, p. 423-443.
- Vogt L., Grobe P., Quast B., Bartolomaeus T. (2011), Top-level categories of constitutively organized material entities. Suggestions for a formal top-level ontology. *PLoS ONE* vol. 6, n° 4, e18794.
- Von Bertalanffy L. (1993 [1968]). *General System Theory*. Trad. Chabrol J.-B. (1973), Dunod.
- Walker B., Holling C.S., Carpenter S.R., Kinzig A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, vol. 9, n 2.
- Ye J., Stevenson G., Dobson S. (2011). A top-level ontology for smart environments. *Pervasive and Mobile Computing*, 7, p. 359-378.