



HAL
open science

AOC, une ontologie formelle pour la modélisation de systèmes complexes en géographie

Eric Daudé, Patrice Langlois, Baptiste Blanpain, Emmanuel Sapin

► To cite this version:

Eric Daudé, Patrice Langlois, Baptiste Blanpain, Emmanuel Sapin. AOC, une ontologie formelle pour la modélisation de systèmes complexes en géographie. Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale, Nov 2010, Toulouse, France. http://sageo10.univ-toulouse.fr/IMG/pdf/SAGEO10_Toulouse_ACTES_MonteilPaegelowEds.pdf. hal-00547477

HAL Id: hal-00547477

<https://hal.science/hal-00547477>

Submitted on 16 Dec 2010

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

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

AOC, une ontologie formelle pour la modélisation de systèmes complexes en géographie

Patrice Langlois — Eric Daudé — Baptiste Blanpain — Emmanuel Sapin

UMR CNRS 6228 "IDEES", équipe MTG

Université de Rouen

1 rue Thomas Becket, bât. IRED, 76821 Mont-Saint-Aignan Cedex

Patrice.langlois@univ-rouen.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente un méta-modèle nommé AOC (Agents-Organisations-Comportements), qui s'exprime par une ontologie formelle et sert de cadre conceptuel à une plateforme de simulation de systèmes complexes spatialisés, compatible avec les problématiques de dynamiques géographiques les plus larges. Le modélisateur géographe doit pouvoir concevoir son modèle et le formaliser dans un langage cohérent relativement à son cadre de pensée. AOC offre ainsi la possibilité de structurer les relations entre agents via le concept d'organisation, qui permet de créer des modèles multi-niveaux. De plus, une formalisation générale de la notion de comportement permet de modéliser la dynamique d'une classe très large de systèmes.

MOTS-CLÉS : Système complexe, système multi-agents, ontologie géographique, méta-modèle, dynamique spatiale, plateforme de modélisation.

ABSTRACT. This paper presents a meta-model named AOC (Agents-Organisation-Behaviour) that is described by a formal ontology. This meta-model is the theoretical concept of a simulation platform of spatial complex systems that are compatible with the largest dynamic geographic problems. The geographer should be able to conceive his model and to formalise it in a coherent language according to his way of thinking. Thanks to the concept of 'organisation', AOC offers the possibilities to structure the relationships between agents and to create multi-level models. Moreover, a general formalisation of the notion of behaviour is used to simulate the dynamic of very large types of systems.

KEYWORDS: Complex system, multi-agent system, geographic ontology, meta-model, spatial dynamic, simulation platform.

1. Introduction

Une problématique fondamentale en informatique moderne est l'étude des systèmes dits complexes, dans lesquels des agents indépendants peuvent interagir pour s'influencer entre eux et faire évoluer le système. Parmi les systèmes complexes, les systèmes multi-agents, dans lesquels des agents artificiels opèrent collectivement et de façon décentralisée pour accomplir une tâche ou simuler un phénomène, sont étudiés dans de nombreuses disciplines (informatique, géographie, sociologie, économie, biologie, etc.), par des informaticiens comme par des non informaticiens (Phan et al., 2007)

La nécessité d'un cadre théorique dans lequel le modélisateur peut penser son modèle et le formaliser est grandissante. Dans cet article, nous présentons l'ontologie d'un paradigme, c'est-à-dire un cadre conceptuel associé à un moyen de produire une certaine classe de modèles (Ramat, 2006). Ce paradigme, résumé par l'acronyme AOC (Agents-Organisations-Comportements), sert de base à une plateforme intégrée permettant la conception, le codage et la simulation de systèmes complexes en géographie (programme ANR et FEDER « MAGEO »).

Notre approche s'est inspirée initialement de l'ontologie AGR (Agent-Groupe-Rôle) de Ferber (Ferber, 1995), (Ferber et al., 2005), en y ajoutant le concept d'organisation multi-échelles, qui s'applique aussi bien à la structuration spatiale que sociale. Par ailleurs, le concept d'agent, dans le contexte AOC, s'applique aussi bien à des individus sociaux qu'à des entités structurantes de l'environnement. En effet, l'environnement est, pour le géographe, souvent autant le sujet d'étude que les individus qui s'y meuvent, même si la temporalité de sa dynamique est différente de celles des individus qui s'y déplacent.

AOC est une manière de représenter le monde à travers des modèles, par combinaison de quelques concepts simples à travers une certaine formalisation. Cet article présente le paradigme AOC sous forme d'une ontologie formelle orientée utilisateur, indépendante de toute application informatique.

On peut dire que l'ontologie présentée est formelle car ses entités sont abstraites (universelles) et permettent de générer des objets concrets (particuliers) dans un modèle. Le paradigme AOC fournit un cadre théorique au modélisateur qui est indépendant de l'informatique et dans lequel il peut penser son modèle, pour le décrire ensuite dans un langage utilisateur cohérent par rapport à ce cadre théorique. Ce cadre doit donc être facilement transposable à sa discipline, à ses thématiques, à ses méthodes et à son langage ; il est donc proche de sa manière de penser, à l'instar du langage à base de règles de SpaCelle (Dubos-Paillard et al., 2003). Ce paradigme offre un ensemble de concepts à la fois suffisamment abstraits pour que le modélisateur puisse y puiser une grande variété de réalisations, mais aussi suffisamment simples afin qu'il puisse les utiliser facilement. Enfin, le contexte théorique de la plateforme ne doit pas être alourdi et obscurci par des aspects

techniques purement informatiques n'ayant rien à voir avec la problématique du modélisateur. Dans cet article, nous ne décrivons donc pas une ontologie de la plateforme elle-même, mais l'ontologie de la classe des modèles qu'elle peut générer.

2. Définition des concepts de AOC

Après avoir exposé les concepts préalables d'espace et de temps, nous décrivons les concepts spécifiques à AOC que sont les agents, les organisations et les comportements.

2.1. *L'espace et le temps*

Toute modélisation géographique se situe à une certaine échelle d'espace et de temps. Cette échelle se caractérise par une extension (un domaine d'espace et de temps) et une granularité (discrétisation). L'espace géographique est constitué d'un référentiel géométrique paramétrable (nombre de dimensions, origine géographique, orientation des axes, unités, pas élémentaires, extension du domaine et métrique). De même le temps est représenté par un référentiel monodimensionnel qui définit une temporalité (par une origine, une unité de temps, un pas de temps élémentaire, une extension). A un référentiel d'espace on associe un référentiel de temps qui lui est compatible en termes de discrétisation et d'extension, aussi nous parlerons de référentiel d'espace-temps.

Les problématiques géographiques utilisent souvent plusieurs échelles de représentation des phénomènes. A chaque échelle est associé un référentiel d'espace-temps. Néanmoins il est nécessaire de définir une correspondance entre ces référentiels, en prenant le référentiel le plus fin (dit référentiel général) comme base de tous les autres.

Dans l'ontologie AOC, les objets du monde se localisent dans des référentiels d'espace-temps, associés à des organisations spatiales qui ont pour rôle de gérer les contraintes de déplacement et les interactions avec les autres objets. Ces organisations spatiales sont abordées dans la partie 2.3.

2.2. *Agent*

Dans le paradigme des systèmes multi-agents, un agent est une entité qui possède une certaine individualité, une indépendance, une certaine autonomie d'action, et une connaissance partielle de son environnement. Un agent possède une mémoire (dont la valeur à un instant donné représente son état) lui donnant la possibilité de conserver, à travers le temps, certaines de ses caractéristiques matérielles, énergétiques ou informationnelles. La dynamique d'un agent s'exprime par des changements internes de son état et des changements externes, par ses

actions qui modifient l'état des objets de son environnement. Elle est décrite dans la partie 2.4.

Un agent représente donc une entité du monde réel ayant un comportement. Cette entité peut être aussi bien une maison qu'un être humain, voire une entité abstraite.

A un instant donné, un agent peut être à la fois « positionné » socialement et localisé dans l'espace géographique.

Agent géographique

Un agent géographique est un agent localisé (pays, ville, individu) qui peut avoir une dynamique. Il appartient souvent à une couche d'information géographique, en général importée d'un SIG (Système d'Information Géographique). Il possède une emprise spatiale (ponctuelle, linéaire, ou surfacique), appelée aussi son support. Cette localisation peut être exprimée dans le repère de l'espace général ou être relative à un composant sur lequel il se localise (par exemple, un voyageur peut avoir des coordonnées terrestres absolues, ou avoir seulement une localisation relative dans le train dont il est passager). Un agent géographique possède donc des attributs spatiaux qui servent à décrire sa forme et sa localisation dans un référentiel donné.

2.3. Organisation

Si l'agent modélise ce qui est de l'ordre de l'individuel ou de l'élémentaire, dans AOC, une organisation modélise ce qui est de l'ordre du collectif. Mais ne nous trompons pas, une organisation n'est pas une collection d'objets ou un ensemble d'éléments ; une organisation est la structure qui permet à ces objets ou à ces éléments de se relier, de se séparer, de se combiner, de communiquer, d'interagir entre eux. En somme, l'organisation est ce qui fait la différence entre un ensemble d'objets et un système d'objets.

Définition : une organisation O définie sur un ensemble A d'agents, appelés ses composants, est une structure S munie d'un ensemble de règles d'évolution et de gestion des interactions avec les autres agents du système.

Cette définition, très générale, recouvre des façons très diverses de structurer des collectivités d'agents. Ces différentes approches peuvent néanmoins être classées en plusieurs catégories, comme nous allons le voir.

Si l'organisation structure les agents dans le référentiel spatial, on parle d'organisation spatiale, sinon on parle d'organisation sociale. L'adjectif social est pris ici dans un sens très large, qui va au-delà des exemples précédents.

Organisations spatiales

Les organisations spatiales disposent d'une position et d'un volume dans le référentiel spatial du modèle ; elles y organisent les agents les uns par rapport aux autres. Parmi les organisations spatiales, on peut distinguer :

- Les organisations formées de composants définissant un maillage de l'espace. Ces maillages peuvent être réguliers (rectangles, hexagones, triangles), ou irréguliers (découpages administratifs).
- Les organisations qui portent sur des composants matériels dissociés les uns des autres, donc ne représentant pas une partition de l'espace. Ces composants peuvent occuper des volumes nuls (semis de points), ou plus ou moins étendus dans une ou plusieurs dimensions (réseaux routiers faits de tronçons et de nœuds, ou les agglomérations dans un espace national).
- Les organisations qui portent sur des composants situés, mais non matériels, ce qui leur confère la propriété d'être interpénétrables. Les composants ne décrivent donc pas nécessairement une partition du volume, puisqu'ils peuvent couvrir des volumes d'intersection non nulle (zones d'influence religieuse, zones d'influence commerciale, etc.).

Organisations sociales

Les organisations dites sociales sont les organisations qui structurent leurs composants les uns par rapport aux autres sur d'autres critères que leur position spatiale. Les deux catégories remarquables sont :

- Les organisations qui structurent un ensemble d'agents abstraits (c'est-à-dire sans réalité matérielle) les uns par rapport aux autres. Un exemple peut être l'ensemble des catégories socioprofessionnelles (CSP), où chaque catégorie prend le statut d'agent ; un autre exemple est celui des différentes fonctions d'une entreprise, à savoir les fonctions d'administration, de production, de recherche, de direction, etc. Ces différents composants abstraits (qui, rappelons le, possèdent le statut d'agents), trouvent leur intérêt en permettant à d'autres agents de s'en déclarer membre (nous parlons de « passagers »), ce qui confère à ces derniers des compétences associées au composant qui les accueille. Ce point concerne également toutes les organisations qui agencent des composants les uns par rapport aux autres ; il sera développé dans la partie 3.1.
- Les organisations qui structurent socialement des agents (par exemple des individus sociaux), par des liens qui expriment des relations pouvant être de natures variées : liens mono ou bidirectionnels, liens étiquetés ou non (texte, pondération), etc.

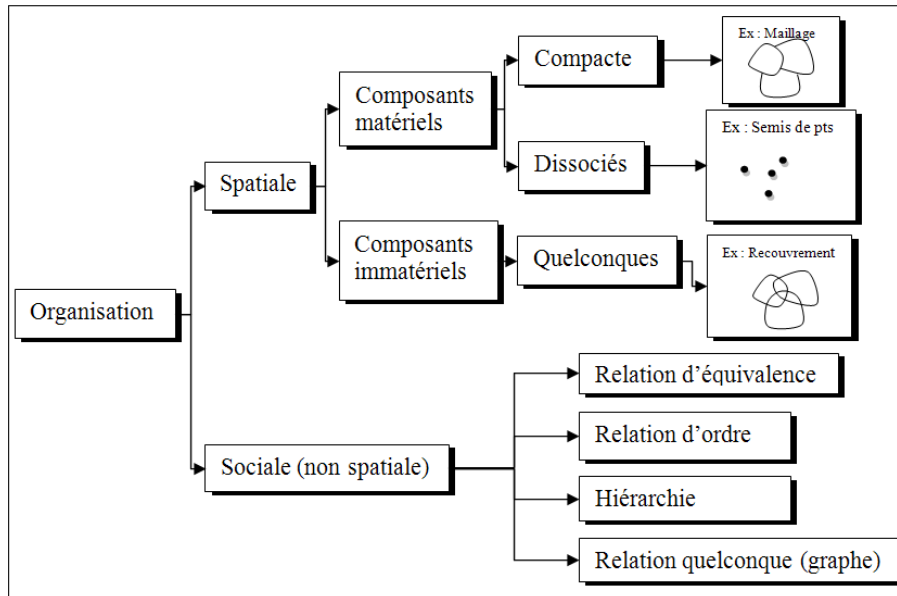


Figure 1. Hiérarchie des organisations

2.4. Compétence, comportement et dynamique

La dynamique du système résulte du comportement de ses agents qui agissent et interagissent entre eux et avec leur environnement.

La dynamique d'un agent est l'expression de ses compétences au cours du temps, (c'est-à-dire le processus d'exécution de ses compétences). Cette dynamique sera appelée comportement de l'agent.

Le comportement d'un agent peut se manifester de différentes manières (non exclusives entre elles) :

- Affecter son support spatial : si celui-ci subit une transformation isométrique qui, à chaque pas de temps, effectue une translation suivie d'une rotation, on dit que l'agent est mobile (son support reste invariant par rapport à un repère local attaché à l'agent). Si ses attributs spatiaux subissent un autre type de transformation géométrique, on dit que l'agent est déformable.
- Lorsque la transformation s'opère sur des attributs non spatiaux de l'agent (internes ou relationnels) on parle de dynamique évolutive (interne ou relationnelle) de l'agent.
- Lorsque des agents ou des objets (matière, flux, énergie, etc.) se transforment au cours du temps en d'autres agents ou d'autres objets,

comme des réactions chimiques, des dynamiques foncières (remembrement), ou des possibilités de reproduction ou de réplication, on parlera de dynamique transformationnelle.

Une compétence peut être innée (permanente), lorsqu'elle est constitutive de l'agent, mais peut également être acquise (temporaire), lorsqu'elle lui est offerte par une organisation (ou un de ses composants) dont il est passager à un instant donné ; l'agent peut ainsi adapter son comportement à son environnement social et spatial. Par exemple, dans une organisation qui décrit la « structure familiale d'un ménage », le composant « père » dispose de compétences spécifiques à ce rôle, ce qui permet à un agent passager de ce composant, d'acquérir, en plus de ses compétences innées, ces compétences temporaires. Mais ensuite, ce même agent humain partant travailler, endossera le rôle d'automobiliste et adoptera ainsi les compétences liées à la conduite automobile, afin de se déplacer sur l'organisation spatiale de type réseau routier.

Le comportement global d'un agent est en général la combinaison de processus plus simples, que l'on appelle comportements élémentaires, et qui sont l'expression (l'exécution en informatique) de compétences élémentaires, celles-ci étant des transformations de l'agent en fonction de son état présent et de celui de son environnement.

Formalisation de compétences simples

Notre modèle de compétence part du principe qu'à un instant donné, il peut, ou non, être pertinent d'exécuter une compétence donnée. Tout agent possède des compétences innées ou acquises, qu'il exécute ou pas en fonction du contexte. Selon le contexte social, spatial ou temporel, il sera pertinent ou non d'exécuter une *action* en particulier. Dans le modèle comportemental proposé, la pertinence liée à l'environnement présent sera exprimée par une clause *pertinence* associée à chaque compétence. Cette clause est une fonction qui renvoie une valeur réelle entre 0 et 1 à partir d'une évaluation de l'état de l'agent et de son environnement.

Les bases de cette approche ont été développées dans le modèle d'agents cellulaires décrit dans (Dubos-Paillard et al., 2003), (Langlois, 2010), basé sur le couple *compétence* = $\langle \textit{pertinence}, \textit{action} \rangle$. Nous y avons ajouté un troisième terme nommé *satisfaction*, pour obtenir une modélisation de compétence sous forme d'un triplet :

$$\textit{compétence} = \langle \textit{pertinence}, \textit{action}, \textit{satisfaction} \rangle.$$

La notion de pertinence d'une compétence permet de dépasser le simple conditionnement de l'exécution d'une action à une évaluation logique (de type SI pertinent ALORS action). En effet, la pertinence d'une compétence a pour but d'être évaluée et comparée à celles des autres compétences qu'un agent pourrait utiliser à un instant donné. Si plusieurs compétences sont en concurrence à un instant donné, seule la plus pertinente verra son action exécutée par l'agent.

L'action décrit les opérations exécutées par l'agent, autant sur ses attributs que sur son environnement.

La satisfaction est un nombre réel entre 0 et 1 représentant l'évaluation de la bonne exécution de l'action associée. Elle vaut zéro si celle-ci n'a pas été exécutée. Elle peut servir de pertinence pour une action suivante, lors de l'enchaînement séquentiel de deux comportements ; elle peut également permettre de quantifier l'état d'avancement vers la réalisation d'un objectif.

Formalisation de compétences complexes

La clause pertinence offre donc la possibilité de choisir, parmi une liste de compétences, celle qu'il convient d'exécuter à un instant donné. Le choix le plus naturel consiste à choisir la plus pertinente en cet instant (on note cette opération $C_1 | C_2$), mais on peut également choisir une compétence tirée au hasard ($C_1 ? C_2$), avec éventuellement une pondération par la pertinence.

D'autres opérations permettent de faire se succéder l'exécution de plusieurs compétences dans le temps : la plus classique est l'exécution séquentielle d'une série de compétences élémentaires. Dans le cas de deux compétences C_1 et C_2 , leur séquence s'écrit « $C_1 ; C_2$ » et signifie simplement qu'à l'exécution de C_1 succèdera celle de C_2 .

D'autres possibilités sont l'exécution en parallèle de plusieurs compétences (la marche met en jeu de nombreux mouvements élémentaires simultanés), ou encore l'exécution séquentielle avec un *GO/NOGO* après l'exécution de chaque compétence : c'est la séquence conditionnelle « $C_1 ; > C_2$ », qui signifie qu'après l'exécution de C_1 , la compétence C_2 ne sera examinée que si la satisfaction de C_1 n'est pas nulle ; C_2 ne sera donc jamais exécutée si l'action de C_1 ne l'a pas été.

Il est possible d'ordonner les compétences de plusieurs autres façons, par exemple en séquence dans l'ordre décroissant des pertinences (exécution de plusieurs tâches avec un ordre de priorité), ou encore en exécutant une compétence autant de fois qu'il est nécessaire, soit jusqu'à ce qu'une autre compétence devienne pertinente (un agent se déplace jusqu'à ce qu'il ait trouvé un objet à ramasser), soit jusqu'à ce qu'un événement se produise (un agent se déplace jusqu'à ce qu'on lui dise « stop »).

3. Relations entre les concepts de AOC

3.1. La relation de positionnement / localisation

Pour modéliser le fait qu'un ensemble A d'agents qui sont les composants d'une organisation, se localisent et se déplacent dans un environnement lui-même formé d'un ensemble d'agents B composants d'une autre organisation, on utilise une fonction de positionnement de A vers B , qui associe à tout agent de A un agent au

plus dans B . Les liens de cette relation sont des couples (passager, hôte) de la forme $(a, b) \in A \times B$, qui s'expriment par une phrase du type « le passager a est sur l'hôte b ». Si de plus le composant b est un « conteneur spatial » le passager a est alors localisé relativement à ce composant (qu'on appelle alors son localisateur). Par exemple, si b est un tronçon de route (élément linéaire), a peut être localisé par son abscisse curviligne relative à b . Si b est un carreau (élément surfacique) a peut être localisé par deux coordonnées relativement à b .

Par exemple, un agent « wagon de voyageurs » peut être modélisé en lui adjoignant une organisation spatiale composée de sièges et d'un couloir qui sont les composants de l'organisation du wagon, par abus de langage on dira simplement que ce sont les composants du wagon. Les voyageurs sont positionnés dans le wagon, comme passagers, chacun étant localisé sur un siège ou sur le couloir, qui sont les hôtes. Les passagers peuvent éventuellement se déplacer dans le wagon, selon certaines règles. A une autre échelle, un wagon peut être composant d'un train, si l'on considère qu'il est fixe dans la composition de ce train, même si le train est mobile (avec ses wagons et ses voyageurs) sur la ligne qu'il emprunte (il est alors passager sur un tronçon de ligne du réseau ferré). La notion de composant et de passager est donc relative à une organisation.

Les passagers sont, via une relation de localisation, les usagers de l'organisation. Ils interagissent avec elle et, éventuellement, la font évoluer. Un agent peut être l'hôte de plusieurs passagers, mais un agent ne peut être passager que d'un unique composant hôte d'une couche d'organisation. Un agent peut en revanche être passager de plusieurs organisations à la fois. Ainsi, un homme sera passager d'un service d'une entreprise, d'une CSP, et d'une maille spatiale. Un agent peut également être passager de plusieurs couches d'une même organisation, par exemple une maison est à la fois dans une commune, un département et une région de l'organisation administrative du territoire français.

3.2. Mobilité, processus d'interaction

L'organisation possède des méthodes et des données de gestion collective. Elle est capable d'autoriser ou refuser l'arrivée, le départ, la création ou la suppression d'un nouvel agent comme passager sur un hôte. Elle gère la mobilité des passagers sur ses composants-hôtes et d'une manière générale les interactions.

La dynamique de la relation de localisation définit le processus de mobilité des agents à travers les compétences offertes aux passagers par l'organisation-hôte. Ainsi, la mobilité apparaît comme un exemple simple (et fréquent) de processus d'interaction, dans lequel un agent a passé d'un lieu i à un lieu j au cours d'un pas de temps élémentaire. Il y a donc interaction entre les lieux i et j qui échangent simultanément leur contenu.

D'une manière générale un processus d'interaction est défini sur un ensemble d'agents A (appelés hôtes dans (Langlois et al., 2007) sous le contrôle d'un ensemble M de médiateurs. Par exemple la collision entre deux boules de billard, la

prédation d'un loup sur un mouton, la transmission d'une maladie d'une personne infectée à une personne saine, sont des interactions élémentaires qui entrent dans des processus d'interaction. Ainsi, un processus d'interaction est composé de trois entités, $P = \langle A, M, f \rangle$. A est l'ensemble des agents (A peut être hétérogène : les loups et les moutons, ou homogène : les boules de billard). M est l'ensemble des médiateurs de l'interaction à travers lesquels s'effectuent les interactions élémentaires (M est appelé parfois le vecteur). La fonction f représente ici de manière théorique le processus, c'est-à-dire le mécanisme d'évolution des états des agents, lorsque les médiateurs opèrent sur eux. Les médiateurs peuvent être représentés par les « particules » (vision discrète) qui sont échangées ou par le flux ou le champ (vision continue) qui s'applique lors d'une interaction élémentaire entre deux agents de A . Par exemple, dans l'interaction des boules de billard, le médiateur est la quantité de mouvement échangée sur le lieu de la collision. Dans la prédation, la proie disparaît au profit de l'énergie gagnée par le (ou les) prédateur(s). L'épidémie se propage entre les individus par transmission et multiplication du vecteur (bactérie ou virus). Comme pour la mobilité, c'est encore l'organisation des agents de A qui gère collectivement l'interaction.

3.3. Modèles multi-niveaux : Emboîtement agent – organisation – agents

L'organisation apparaît toujours comme un intermédiaire entre un agent global et ses agents internes. Un agent n'est jamais considéré comme contenant directement une collection d'agents, mais comme contenant une ou plusieurs organisations, qui gèrent des composants internes et des passagers.

Un agent est dit terminal (ou simple ou élémentaire), s'il ne contient pas d'organisation interne, et par conséquent pas de composant interne. Dans le cas contraire il est non-terminal (ou composé ou complexe). L'agent est alors un système composé d'organisations d'agents plus élémentaires en interaction. Il possède une double description, externe en tant qu'agent, et interne en tant que système formé de ses composants internes.

Cette approche permet une modélisation multi-échelles d'un modèle, par raffinements successifs à partir d'un agent qui englobe tous les autres. On peut ainsi envisager de modéliser des systèmes multicouches, tels que les maillages géographiques sur plusieurs échelles (par exemple, pays-région-département-canton).

L'agent qui englobe tous les autres peut être appelé agent-système. Son organisation interne décrit les entités et la dynamique du modèle. Ses entrées sont connectées à l'interface homme-machine, permettant à l'utilisateur de paramétrer le modèle et d'interagir en cours de simulation. Ses sorties permettent de visualiser et/ou de mémoriser les observations opérées sur le système au cours de la simulation.

4. Schéma ontologique

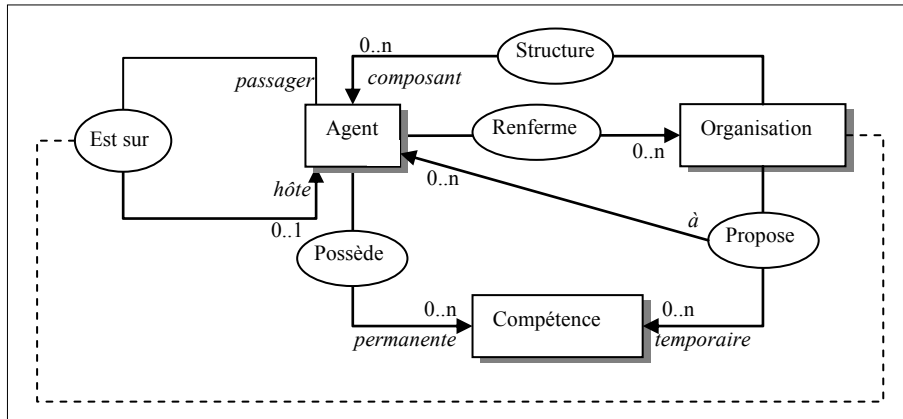


Figure 2. Schéma simplifié du paradigme AOC

Le schéma de la Figure 2 résume les principales relations entre les concepts d'agent, d'organisation et de comportement : une organisation structure un ensemble d'agents qui sont alors composants de l'organisation. Mais un agent complexe peut aussi renfermer en son sein des organisations qui structurent ses constituants internes. Une compétence peut être utilisée de manière permanente par un agent, ou bien être proposée par une organisation de manière temporaire aux passagers. Une relation de positionnement/localisation « est sur » est une fonction définie entre deux ensembles d'agents, les passagers et les hôtes. Les contraintes de localisation et de mobilité entre les passagers sont gérées par l'organisation des hôtes.

5. Application

Le modèle des termites (Wilensky, 1997) a été choisi pour être modélisé avec l'approche AOC. Ce modèle peut être décrit de la manière suivante : des termites se déplacent sur un espace discret formé d'un carroyage, une case ne pouvant contenir plus d'un termite à la fois. Des grains sont disposés dans les cases (un grain au plus par case). Les termites ramassent les grains qu'elles trouvent, les portent au cours de leur déplacement et les déposent à proximité d'autres grains. Un grain est donc, à un instant donné, soit dans une case, soit porté par un termite. A l'initialisation tous les grains sont dans des cases.

Montrons comment ce modèle peut être formalisé dans le paradigme AOC.

Agents

- Agent *Case* : possèdera un attribut booléen, *YaGrain*, indiquant s'il y a un grain dans la case ;
- Agent *Termite* : possèdera un attribut booléen, *PorteGrain*, indiquant si le termite porte un grain.

Ici les Termites, ainsi que les Cases, sont des agents terminaux.

Organisations

Terrain : Carroyage de *Cases* (par exemple un tore avec voisinage de Moore).

Relation de localisation des *Termites* vers les *Cases* : un termite est passager d'une case et une seule, et il ne peut y avoir plus d'un termite sur une case.

Compétences

Les seuls agents ayant une dynamique propre sont les termites. Cette dynamique se résume aux trois compétences suivantes :

- *SeDéplacer* : le termite se déplace vers une case voisine choisie au hasard ;
- *Prendre* : dans le cas où sa case contient un grain, le termite le ramasse ;
- *Déposer* : dans le cas où le termite porte un grain et se trouve sur une case vide, s'il y a au moins un grain dans son voisinage, alors il dépose le grain qu'il porte.

Traduisons ces compétences sous forme de triplets $\langle \textit{Pertinence}, \textit{Action}, \textit{Satisfaction} \rangle$:

$$\textit{SeDéplacer} = \langle P_1, A_1, S_1 \rangle$$

$P_1 = 1$ s'il y a au moins une case voisine sans termite, 0 sinon.

$A_1 =$ Se déplacer vers une case sans termite du voisinage choisie au hasard.

$S_1 = 1$ lorsque l'on s'est déplacé, 0 sinon.

$$\textit{Prendre} = \langle P_2, A_2, S_2 \rangle$$

$P_2 = 1$ si le termite ne porte aucun grain et que sa case en contient un, 0 sinon.

$A_2 =$ Le grain passe de la case au termite.

$S_2 = 1$ lorsque un grain est passé au termite, 0 sinon.

$Déposer = \langle P_3, A_3, S_3 \rangle$

P_3 = Le termite porte un grain, il n'y en a pas dans sa case, et il y en a au moins un dans une de ses cases voisines.

A_3 = Le grain passe du termite à la case.

S_3 = 1 lorsque le grain est déposé, 0 sinon.

Ces compétences doivent maintenant être ordonnancées dans le temps, à l'aide des opérations décrites dans la partie 2.4. Nous proposons deux façons de procéder, mais d'autres approches sont évidemment possibles.

Première approche

Lors d'un pas de temps, un termite peut soit prendre, soit déposer (s'il le peut). Cette première action est nécessairement suivie d'un déplacement (si celui-ci est possible). Le comportement d'un termite peut donc être formulé de la façon suivante :

(Prendre | Déposer) ; SeDéplacer

Il se peut qu'un termite ne puisse ni prendre ni déposer, dans ce cas le termite va juste se déplacer, si son environnement le permet. S'il ne peut pas se déplacer, il restera bloqué tant que les termites de son voisinage ne lui auront pas laissé de place.

On vérifie facilement que la succession de plusieurs pas de temps va permettre à un termite de réaliser l'ensemble d'un cycle (*SeDéplacer, Prendre, SeDéplacer, Déposer*).

Seconde approche

Une autre façon de formaliser ce processus consiste à réaliser l'ensemble du cycle (*SeDéplacer, Prendre, SeDéplacer, Déposer*) au cours d'un unique pas de temps : le termite (à vide) commence par se déplacer jusqu'à arriver sur une case où il pourra ramasser un grain, puis il se déplace jusqu'à arriver sur une case où il pourra déposer son grain :

JUSQUA *Prendre* REPETER *SeDéplacer* ;

JUSQUA *Déposer* REPETER *SeDéplacer* ;

La compétence *SeDéplacer* va ainsi, par exemple dans la première ligne, être exécutée plusieurs fois, jusqu'à ce que la compétence *Prendre* devienne pertinente, et soit exécutée.

Lorsqu'il vient de déposer, à la fin d'un cycle, le termite recommence le cycle suivant en se déplaçant au moins une fois avec de prendre. Il ne peut donc pas ramasser à nouveau le grain qu'il vient de déposer, à moins que son environnement l'ait empêché de se déplacer.

6. Conclusion

La vision systémique et complexe du monde conduit les chercheurs à investir l'univers des méthodologies individus-centrées, tels que les automates cellulaires et les systèmes multi-agents. Dans ces univers complexes, une grande variété de facteurs sociaux, économiques, naturels et géographiques interagissent et affectent la dynamique des objets étudiés. Que ce soit en biologie, en économie ou en géographie, cette prise en compte de la complexité des relations entre des entités d'un même niveau et de niveaux différents sert de levier au besoin de modèles de simulation informatique, afin de comprendre et prévoir les évolutions possibles de tels systèmes.

Le paradigme AOC permet au chercheur de penser et construire des modèles multi-niveaux et dynamiques. Cette possibilité est offerte grâce à la récursivité de la notion d'agent qui autorise l'emboîtement des échelles sociales et géographiques. Les dynamiques qui s'exercent au sein de ces modèles peuvent être aussi bien pensées au travers d'une modélisation de compétences propres aux organisations et à leurs composants qu'au niveau des agents eux-mêmes. A l'emboîtement des échelles géographiques et des niveaux d'organisation répond l'emboîtement des compétences. Ainsi des compétences complexes, évolutives, peuvent être construites à partir de compétences élémentaires.

Le paradigme AOC est formalisé dans un schéma XML qui permet d'écrire des modèles sous forme de documents XML, indépendamment de toute plateforme de simulation. Cette méthode permet ainsi la communication et le partage de modèles au sein d'une communauté de modélisateurs. La plateforme MAGéo, qui intègre ce schéma XML, permet une modélisation relativement simple basée sur de l'interaction graphique et des règles non algorithmiques, adaptée à des utilisateurs non informaticiens.

7. Références bibliographiques

Dubos-Paillard E., Guermond Y., Langlois P., 2003. Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SpaCelle. *L'espace géographique*, vol 4, p. 357-378.

- Ferber J., 1995. *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris.
- Ferber J., Michel F., Baez J., 2005. AGRE: Integrating Environments with organizations. In *EAMAS'04*, Australie, p. 127-134.
- Langlois P., Daudé E., 2007, Concepts et modélisation de la diffusion, *Cybergeo*, n°. 364, <http://cybergeo.revues.org/index2898.html>, 23p.
- Langlois P., 2010. *Simulation des systèmes complexes en géographie, fondements théoriques et applications*. Hermès-Lavoisier, Paris.
- Phan D., Amblard F., 2007. *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*.
- Ramat E., 2006. Introduction à la modélisation et à la simulation à événements discrets. In Phan D.& Amblard F., 2007, *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*, p. 87-103.
- Wilensky, U., 1997. NetLogo Termites model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Termites>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.