

Une ontologie formelle pour la modélisation de systèmes complexes en géographie : Le modèle AOC

P. Langlois
UMR CNRS 6266 IDEES – Université de Rouen
Patrice.Langlois@univ-rouen.fr

Résumé

L'objectif de ce travail est de définir un méta-modèle, pouvant s'exprimer par une ontologie formelle, qui doit servir de cadre conceptuel à une plateforme de simulation de systèmes complexes en géographie, 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 par rapport au cadre de pensée qui est le sien, il doit donc être facilement adaptable à sa discipline, à ses thématiques, à ses méthodes, à son langage. Il doit offrir un ensemble de concepts à la fois assez abstraits pour que le modélisateur puisse y puiser une grande variété de réalisations, mais pas trop pour qu'il puisse les intégrer facilement.

Mots clés

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

1. Introduction

L'objectif de ce travail est de définir un méta-modèle, résumé par l'acronyme AOC (Agent-Organisation-Comportement), pouvant s'exprimer par une ontologie formelle. Ce méta-modèle doit servir de base à une plateforme de conception, d'implémentation et de simulation de systèmes complexes en géographie (programme ANR « MAGEO »). Cette ontologie doit fournir un cadre théorique au modélisateur dans lequel il puisse penser son modèle et le formaliser dans un langage cohérent par rapport à ce cadre théorique. Ce dernier doit donc être facilement transposable à sa discipline, à ses thématiques, à ses méthodes, à son langage et donc proche de sa manière de penser, comme on a pu le montrer avec le langage à base de règles de SpaCelle [DPGL03]. Il doit offrir un ensemble de concepts à la fois assez abstraits pour que le modélisateur puisse y puiser une grande variété de réalisations, mais pas trop pour qu'il puisse les intégrer facilement. Enfin, le contexte théorique de la plateforme ne doit pas être alourdi et obscurci par des aspects techniques purement informatiques, qui n'ont rien à voir en général avec la problématique du modélisateur. Notre point de vue

dans cet article sera plutôt orienté conception, avec une volonté d'exposer les concepts généraux internes à la plateforme, mais qui doivent si possible être vu de la même façon par l'utilisateur en phase de conception.

Notre approche est inspirée initialement par l'ontologie AGR de Ferber, [FER 05], [FER06]. Le concept d'agent, dans le contexte AOC, s'applique de manière assez large, 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 très différente de celles des individus qui s'y déplacent.

2. Définition des concepts de AOC

2.1. Classe d'objet – Instance d'objet

Un objet est une entité décrite par des propriétés (qui sont informatiquement décrites par des *attributs* ou des *propriétés*) et des méthodes (informatiquement décrites par des *fonctions* et *procédures* qui décrivent des algorithmes). Ces propriétés et ces méthodes caractérisent la classe de ces objets. Une classe d'objet est l'ensemble potentiel de tous les objets répondant à un type de description donné. D'un point de vue informatique la description de cette classe est l'énoncé dans un langage donné, de la *structure* commune de tout agent de cette classe. Une instance d'objet est la réalisation, la concrétisation, d'un objet individualisé d'une certaine classe, ayant des valeurs précises affectées à ses attributs à un instant donné, qui caractérisent son *état* et la *variabilité* des instances de la classe. A chaque classe est associée la liste des instances réalisées de cette classe.

2.2. L'espace géographique E

L'espace E est une organisation prédéfinie capable de recevoir des points représentés par des coordonnées géométriques. L'espace E est structuré sous la forme d'un référentiel géométrique paramétrable (dimensionnalité, point origine, axes et unités, taille, morphologie). Les points de E n'ont pas d'existence a priori (au sens de leur réalisation), ils sont instanciés selon les besoins, sous forme de *localisations* (*absolues ou relatives*). L'espace E est muni d'une structure mathématique d'espace métrique (euclidienne par défaut), à deux ou trois dimensions. La métrique associée à cet espace, permet de définir les voisinages d'un point comme les boules (ou les disques en 2D) centrées sur ce point. Nous utiliserons couramment trois métriques, d_1 , (dite métrique de Manhattan qui donnent les voisinages de von Neumann), d_2 (euclidienne, qui donne les voisinages euclidiens ou disques) et d_∞ (dite métrique du max qui donne les voisinages de Moore). L'espace peut être limité ou illimité en taille, fini ou infini selon sa morphologie (plane, sphérique, torique, etc.). Pour gérer

l'occupation de l'espace par les éléments matériels ou les agents, nous définirons des organisations spatiales plus spécialisées.

2.3. L'espace social

De même que l'espace géographique, l'espace social est conçu comme une organisation prédéfinie sans autre structure que celle qui permet d'identifier les *individus* (agents) et donc de les différencier les uns des autres. Cet espace peut être structuré par une ou plusieurs organisations sociales formées de composants (ou composantes) ou par des relations entre individus (voir §2.9). L'appartenance d'un individu à une classe (ou composante) sociale, est une forme de « localisation » c'est sa *position* dans l'espace sociale. Un individu doit pouvoir être socialement mobile, il est alors *passager* de sa composante sociale.

2.4. Le temps

L'espace temporel (ou plus simplement le temps) est aussi une organisation prédéfinie, qui est structurée par un référentiel temporel (ou temporalité) dans lequel s'inscrivent toutes les entités dynamiques d'un modèle. Ce référentiel temporel est dit systémique ou global, dans la mesure où il englobe et référence toute autre organisation temporelle plus spécialisée. Un référentiel temporel se définit par une origine, une unité de temps, un pas de temps élémentaire, une durée maximale et un ordonnanceur élémentaire.

2.5. Objet géographique

Un objet géographique est un objet d'une couche d'information géographique (en général importée d'un SIG) qui n'a pas (encore) de dynamique et qui va s'insérer dans une organisation spatiale. Il possède une *emprise spatiale* dans l'espace E (cette emprise est appelée aussi son *support*). Cette emprise spatiale est un sous-ensemble de E. Un objet géographique possède donc des attributs spatiaux qui servent à décrire son support (donc sa forme et sa localisation), qu'on appelle aussi sa *géométrie*. Les attributs non spatiaux, sont dits *attributs descriptifs*. Au moment de la création d'un agent, les attributs aussi bien géométriques que descriptifs sont en général recopiés dans l'agent.

2.6. Agent

On appelle ici *agent* un objet qui possède une dynamique, c'est-à-dire la possibilité de changer au cours du temps. Ce changement peut affecter son support : si celui-ci subit une transformation isométrique qui, à chaque pas de temps, effectue une translation suivi 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 les attributs non spatiaux de l'agent (internes ou relationnelles) 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, on parlera de *dynamique transformationnelle*. On parlera parfois d'*entité* lorsqu'on voudra englober les notions d'objet et d'agent.

Dans le modèle AOC, un agent est à la fois « positionné » socialement, localisé dans l'espace géographique et dans le temps.

Un agent peut être plus ou moins ouvert à l'extérieur. S'il est ouvert, un agent extérieur peut consulter ses variables d'état qui sont publiques, (voire même les modifier). Mais l'agent peut aussi avoir des variables et des méthodes privées qui ne sont pas visibles de l'extérieur. La programmation orientée objet fournit directement ce genre de fonctionnalité. L'*encapsulation* est un autre moyen de « protéger » l'agent de l'extérieur, contre les « atteintes » directes venant de l'extérieur. Comme si l'agent possédait une *membrane externe*. Remarquons que lorsqu'un agent est complexe, il peut aussi être encapsulé de manière interne comme s'il possédait une *membrane interne*. Il contient alors des entrées et des sorties dites *entrées internes* et *sorties internes* qui lui permet de communiquer et d'interagir avec ses composants internes.

Dans les modèles simples, on se passe de l'encapsulation et on utilise des agents ouverts. Par exemple dans le jeu de la vie, une cellule communique directement son état aux voisines sans passer par des ports de sorties de la cellule qui communiquerait avec des ports d'entrée des cellules voisines, l'état est alors *public* (en lecture). Par contre, l'encapsulation est intéressante dans la modélisation de systèmes possédant soit plusieurs niveaux d'organisation soit un seul niveau mais avec un comportement global composé à partir de nombreuses compétences. Elle rend ainsi plus facile l'analyse et le développement des différentes parties d'un système, ce qui permet de maîtriser à la fois le fonctionnement de chaque partie et le fonctionnement d'ensemble (c'est la propriété de modularité du système), car elle explicite ce qui sort et ce qui entre dans chaque agent, en externe comme en interne.

2.7. Environnement d'un agent

L'environnement d'un agent est l'ensemble des entités qui peuvent être perçues ou modifiées par l'agent. C'est son voisinage sans lui-même. Il est formé aussi bien de passagers que de composants. Ces entités peuvent être plus ou moins proches de lui en termes spatiaux (contraintes spatiales, frontières, contacts, distances, accessibilités) ou sociaux (groupe social, liens économiques, de pouvoirs etc.), mais elles peuvent parfois aussi être très éloignées.

2.8. Structure

On dit qu'un ensemble est muni d'une *structure*, lorsqu'on lui ajoute des opérations, des propriétés qui s'appliquent à tous ses éléments ou des liens qui définissent des relations entre ses éléments. Dans un sens un peu différent, dans le champ de l'informatique, on appelle *structure de donnée*, une manière de décrire, dans un certain langage informatique (de programmation ou de conception), un certain assemblage de type de données. Une structure peut être *statique* ou *dynamique*. On parlera par exemple, d'un ensemble muni de structure d'ordre total ou partiel, de partition, de hiérarchie, d'arbre, de graphe topologique et il existe toutes sortes de structures plus complexes.

2.9. Organisation

On appelle ici *organisation*, une structure qui peut évoluer dans le temps (dynamique). On distingue trois catégories d'organisation, *organisation spatiale*, *organisation sociale* et *organisation temporelle*, selon qu'elle s'insère dans l'espace géographique, l'espace social ou le temps. Nous définissons aussi deux catégories d'entités dans une organisation, des *composants* et des *passagers*, selon la manière dont elles participent à l'organisation.

Les *composants* (ou les *constituants* ou les *organes*) sont des agents structurels constitutifs de l'organisation. La création d'un nouveau composant dans une organisation ou sa disparition, modifie l'organisation toute entière. Un composant appartient à une organisation et une seule. Ce sont les briques d'un mur, les murs d'une maison, les fonctions régaliennes de l'état, les groupes sociaux d'une population, les voies de circulation d'un réseau routier, les phases d'une journée de travail ou celles de la vie d'un agent. Dans une organisation, les composants peuvent être homogènes ou hétérogènes. Lorsqu'ils sont hétérogènes et en petit nombre, on peut décomposer l'organisation en *couches* (ou *compartiments*). Lorsque les composants sont homogènes, interchangeable et souvent en grand nombre, on parle d'*organisation distribuée*. *Une organisation peut être à la fois compartimentée et distribuée, dans ce cas elle contient plusieurs couches* qui contiennent elles-mêmes des composants distribués. Le niveau de la couche n'est pas toujours utile conceptuellement, c'est surtout un moyen pratique (et courant dans le monde des SIG) de structurer physiquement les données. Ainsi on ne fera pas toujours référence à la couche pour parler d'un composant.

Un agent peut être à un moment donné *passager* d'une ou plusieurs organisations. Les passagers sont les usagers de l'organisation. Ils interagissent avec elle et, éventuellement, la font évoluer. Par exemple, ce sont les habitants de la maison, les citoyens de la nation, appartenant à différents groupes sociaux, les véhicules sur le réseau routier, etc. Un passager occupe toujours une position unique (sociale, spatiale ou temporelle) dans une couche d'organisation, qui est

le composant (unique) sur lequel il se trouve (son hôte). Un hôte peut accueillir plusieurs passagers et un passager peut être dans plusieurs organisations ou dans 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).

Ainsi on a les relations sémantiques fondamentales:

Un *passager* « est sur » un *composant* (si le composant est spatial on l'appelle aussi *localisateur* du passager)

Un composant « est dans » une (couche d') organisation (et une seule).

Une *couche* est une sous-structure homogène (un compartiment) d'une *organisation* (et d'une seule).

L'organisation possède des méthodes et des données spéciales 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. Elle gère sa présence, sa mobilité, ses interactions, dans le composant hôte ainsi que les communications, à travers les canaux et les interactions entre tous les agents de l'organisation, passagers ou composants, de contrôler les contraintes collectives, mais aussi, éventuellement, de synthétiser leurs activités en son sein pour produire un comportement global répondant aux objectifs de modélisation, ou un moyen d'observation. L'organisation temporelle est capable d'*ordonnancer* l'exécution des agents.

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

Un agent est dit *terminal* ou *simple* ou *élémentaire*, s'il ne contient pas d'organisation interne, donc non plus de composants internes. Dans le cas contraire il est *non-terminal* ou *composé* ou *complexe*. L'agent est alors un système composé d'agents plus élémentaires en interactions, il possède alors une double description, externe en tant qu'agent, et interne en tant que système formé de ses composants internes. A l'inverse il existe un agent unique qui englobe tout le système, appelé agent-modèle. 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.

Organisations spatiales prédéfinies

Nous décrivons dans la figure suivante, les différents types, mais aussi les paramètres et caractéristiques qui permettent de définir une organisation spatiale.

Organisations spatiales

Choix du type: (présentés ici en trois catégories)

- **Regulières:** construction algorithmique de la structure.

1 : triangles équilatéraux,

2 : carrés,

3 : rectangles,

4 : hexagones

- **Irregulières non topologiques** : modèle « spaghetti »

5 : Points : Liste de points indépendants

6 : Lignes : Liste de lignes polygonales ouvertes indépendantes

7 : Surfaces : Liste de lignes polygonales fermées non croisées indépendantes (deux zones peuvent s'intersecter)

8 : Zonage non topologique : liste de lignes polygonales fermées non croisées mais jointives entre elles (deux zones contigües ont des sommets distincts, mais leurs coordonnées sont égales)

- **Irregulières topologiques** : basé sur le modèle RZ vecteur-topologique [Lan94]

9 : Réseau linéaire topologique (formé de nœuds et de tronçons)

10 : Triangulations (TIN)

11 : Triangulation Delaunay (critère d'optimisation)

12 : Carroyages irréguliers

13 : Hexagonages irréguliers

14 : Maillages de faces polygonales simples (chaque face est limitée par un polygone à un seul bord non croisé, donc face connexe et sans trou)

15 : Maillage choroplèthe (chaque face est limitée par un polygone généralisé à plusieurs bords non croisés, donc les faces peuvent être en plusieurs parties connexes et avec des trous)

16 : Maillage isoplèthe (systèmes de bandes emboîtées limitées par des isolignes, pouvant contenir des points qui correspondent à des minima ou des maxima locaux)

Sélection des types de composants associés à une classe d'agents: (choix multiple possible, selon les éléments disponibles)

Sommets, Centroides de faces, Côtés, Faces

- Choix de la dimension des coordonnées: 2D, 3D

- Choix de la métrique :

d_c : la distance de contigüité est relative à un graphe, c'est le nombre d'arcs minimum entre deux sommets du graphe. Ce peut être la distance entre les sommets d'un graphe, ou la distance entre faces, relativement au graphe dual.

d_R : la distance (curviligne) de déplacement sur un réseau linéaire topologique, c'est la longueur minimale entre deux points quelconques du réseau.

d_1 : distance (à vol d'oiseau) de type manhattan

d_2 : distance euclidienne (à vol d'oiseau)

d_∞ : distance du max (à vol d'oiseau)

- Choix de l'opérateur de voisinage :
 - par englobement
 - par empiètement
 - de centre à centre

figure 1. Organisations spatiales prédéfinies

Organisations sociales prédéfinies

Trois types d'organisations sociales de base semblent fréquentes (en plus de liste ordonnée qui est l'organisation par défaut), la partition, la hiérarchie et la hiérarchie de partitions. Néanmoins, la grande diversité des structures sociales susceptibles d'être utilisées dans un modèle géographique nous font penser que la définition d'une telle organisation passe le plus souvent par une description complète des relations et règles qui la constituent, à travers une ontologie informatique.

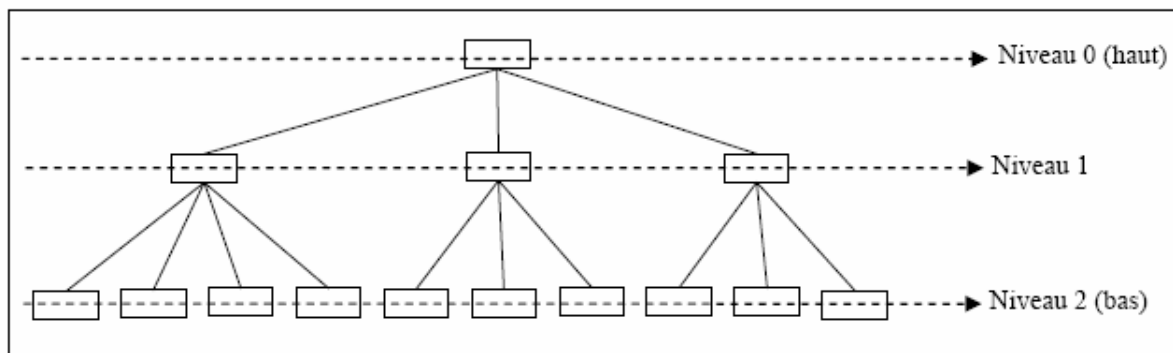


figure 2. hiérarchie de partitions

2.10. Comportement, compétence, dynamique, processus.

La dynamique de l'agent est un processus qui lui permet de faire évoluer son contenu (matériel, énergétique, informationnel), de se transformer dans l'espace (changement de forme, d'orientation, de localisation) ou d'agir sur (et d'interagir avec) son environnement extérieur comme sur son espace intérieur. Le résultat de ce processus, appelé comportement de l'agent, est l'expression dynamique, modélisée par l'exécution de ses compétences à travers une simulation. En général, le comportement global de l'agent est la combinaison de processus plus simples, qu'on appelle *comportements élémentaires* et qui sont l'expression de compétences élémentaires de l'agent. Une compétence s'exprime informatiquement par une méthode de transformation de certains attributs interne de l'agent ou de certaines de ses sorties, dont la mobilité, en fonction de ses attributs présents et de l'état de son environnement. La définition d'une compétence peut résulter au niveau de l'éditeur de modèle d'un ensemble de règles contenant des fonctions élémentaires d'acquisition, d'évaluation,

d'action et d'observation. La combinaison de ces fonctions par différentes opérations, produit la compétence finale, qui confère à l'agent son potentiel de perception, de cognition et d'action.

Une compétence est dite *innée* (ou *permanente*) lorsqu'elle est constitutive de l'agent, c'est-à-dire apparaît dès sa création, et subsiste jusqu'à sa mort.

Une organisation ou ses composants offrent à ses agents de passage des compétences supplémentaires, appelées *compétences acquises* (ou *temporaires*), variant selon le type de composant sur lequel il se trouve. Ils permettent à chaque passager d'adapter son comportement à l'environnement (spatial ou social) du moment.

Un *comportement* est donc l'expression temporalisée d'un processus résultant de l'exécution d'une compétence de l'agent, acquise ou innée.

Plusieurs modèles de description de compétences sont envisagés :

1) Diagramme de transition [PhAm07]: Pour définir des comportements réactifs modifiant des états qualitatifs, en fonction de règles qui prennent en compte à la fois l'état interne de l'agent et sa perception de l'environnement.

2) Diagramme de type Forrester [For68] : Pour définir des comportements quantitatifs qui s'expriment par des équation différentielles modélisant l'évolution de variables qui représentent des stocks ou des contrôles de flux et des canaux qui représentent des flux entre ces stocks. Ces diagrammes s'appliquent normalement à un système compartimenté, mais on peut penser qu'ils sont aussi transposables à une organisation distribuée.

3) Diagramme d'activité (type UML): pour décrire une organisation temporelle [Fal01], des enchaînements d'actions ou de transformations dans le temps, plus ou moins synchronisées ou coordonnées, effectuées par un même agent ou entre plusieurs agents qui interagissent .

3. Relations entre les concepts de base

3.1. La dualité agent-organisation

L'agent géographique présente un aspect dual selon le point de vue sous lequel on l'observe. Dans sa globalité extérieure – qui lui confère une intégrité matérielle, spatiale, temporelle et une identité comportementale – il sera appelé agent. Dans sa complexité intérieure il sera décrit comme un système ou une organisation, sauf si c'est un agent terminal.

L'interface entre la vision agent et la vision organisation d'un même objet est à la fois spatiale (limite géométrique entre l'extérieur et l'intérieur de l'objet : sa frontière) mais aussi fonctionnelle, comme une « membrane

externe », lieu des échanges contrôlés, mais aussi lieu de séparation entre deux mondes, entre deux niveaux de description et de fonctionnement. L'interface-membrane est aussi le moyen de protéger l'intégrité de l'individu contre les agressions externes, mais elle est source de limitations diverses, aussi bien en termes de contraintes spatiales qu'en termes d'activités et de connaissance du monde extérieur, c'est la notion d'encapsulation.

Les deux faces duales de l'agent sont indispensables à la description du monde vu comme un système complexe d'emboîtement de niveaux de description, où l'objet apparaît maintenant comme le médiateur de l'interaction à la fois entre les éléments de chaque niveau et entre les niveaux d'organisation du monde.

3.2. Diagrammes ontologiques

Dans cette formalisation AOC, chaque entité se décompose elle-même en différentes sous-catégories : nous distinguons trois sous-classes d'agents spatialisés : les passagers, les composants, les localisateurs, deux types de mécanismes comportementaux : les comportements individuels (innés) et les comportements émanant du collectif (acquis) et définis dans l'organisation.

Il se dégage de cette construction une variété de concepts d'entités géographiques matérielles, informationnelles, individuelles ou collectives qui sont des catégories relatives au modèle ou au problème traité, et non une catégorisation absolue de ces entités.

Nous proposons dans ce qui suit, quelques diagrammes UML, permettant de récapituler les entités ontologiques définies et les liaisons entre ces entités, avec, pour certains des informations complémentaires, non traitées dans le texte.

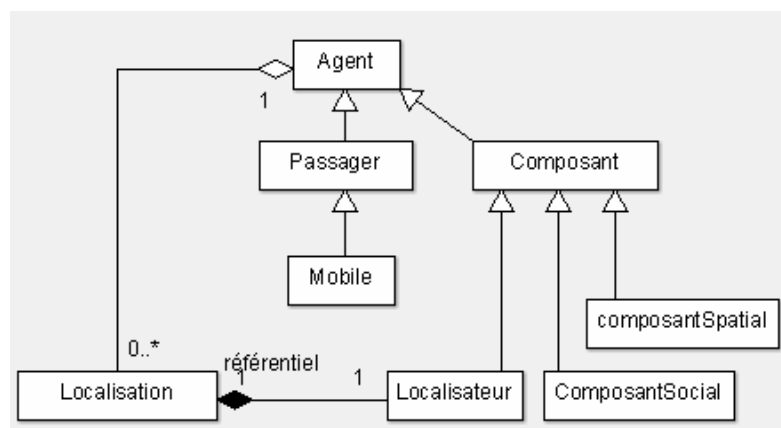


figure 3. Classes d'agents

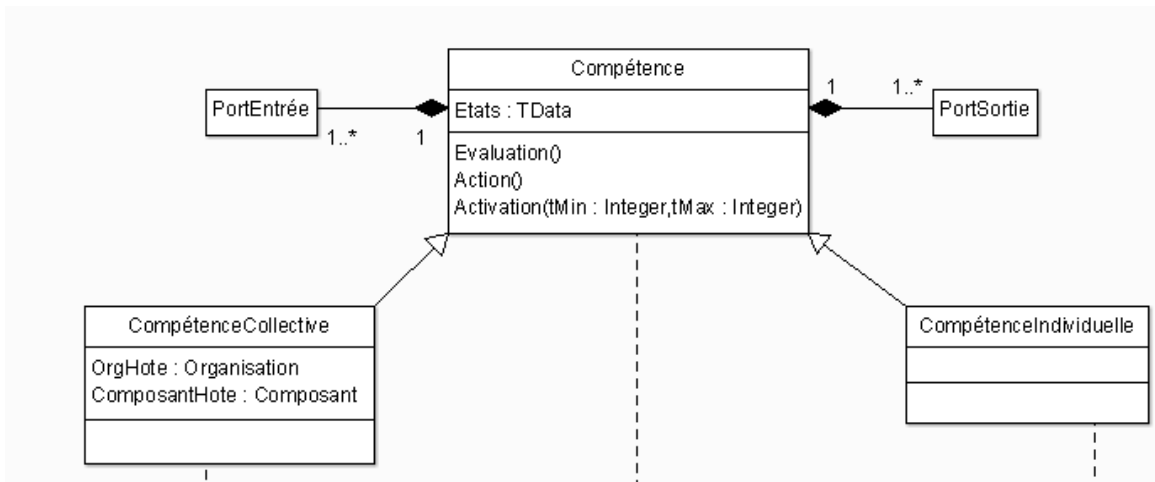


figure 4. Compétence temporaire (collective), compétence permanente (individuelle)

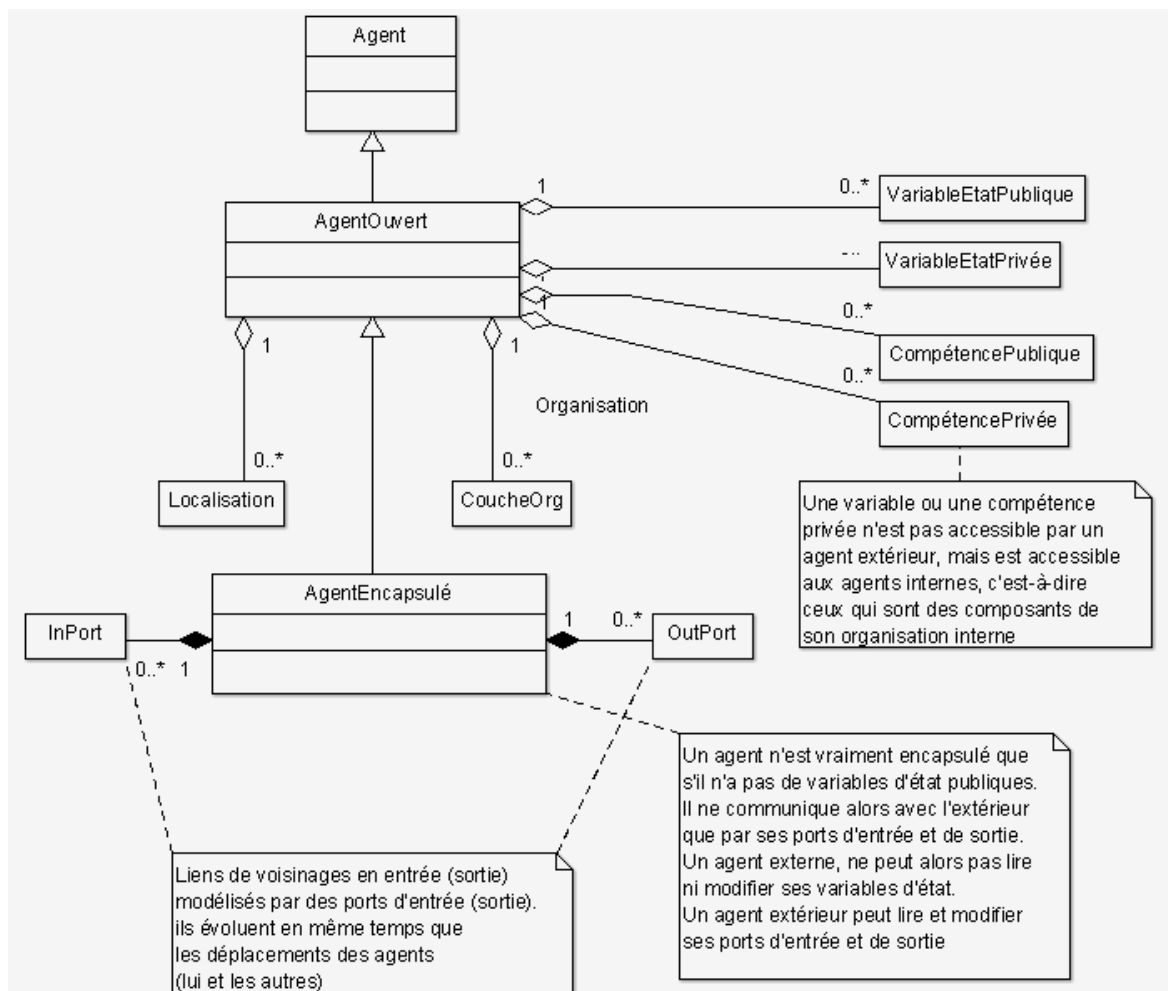


figure 5. Agent ouvert, agent encapsulé

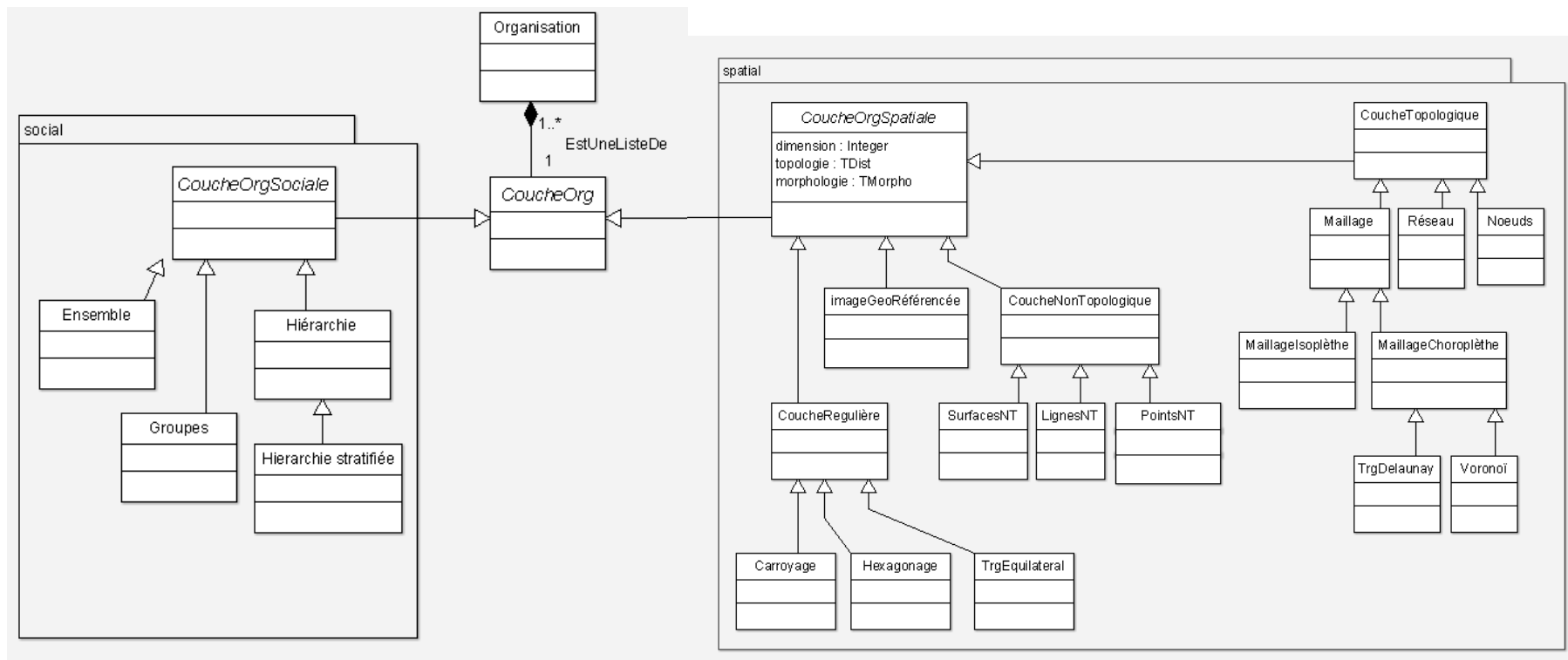


figure 6. Couches d'organisations

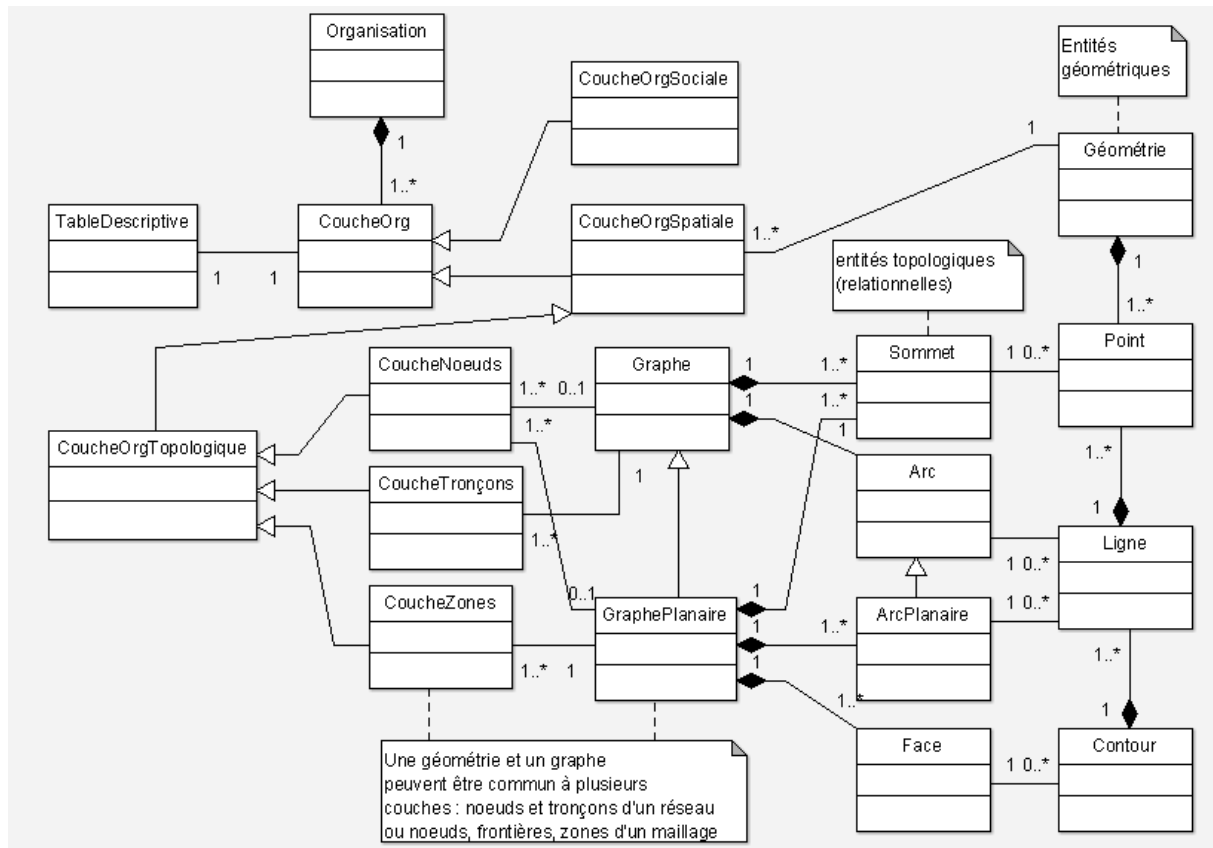


figure 7. Structures d'organisation spatiale

4. Conclusion

La vision autoréférente (récursive) de la structure de l'agent de AOC est essentielle en géographie, car c'est une discipline qui jongle avec les échelles d'observation. Ces échelles peuvent être prises en compte dans les SIG à travers différentes couches d'informations. Mais la structuration AOC permet de définir des liens « verticaux » forts entre les niveaux d'organisation. Cette multi-représentation des objets, produit une complexité spécifique à la géographie, lieu des interactions, des émergences et de l'auto-organisation. L'aspect récursif permet donc d'envisager des modèles géographiques multi-scalaire et multi-niveaux. De plus, ces niveaux nécessitent en général des temporalités différentes des processus qui y opèrent.

La vision organisationnelle à la fois sociale et spatio-temporelle est également importante dans notre construction, car elle permet la prise en compte des interactions socio-spatiales, fondamentale en géographie humaine. Les notions d'organisation et d'agent apparaissent alors comme des représentations duales d'un même concept, celui de système. En effet, vu de l'extérieur le système est représenté dans son unité et son individualité, il forme un tout ayant une certaine autonomie mais couplé avec son environnement, c'est un agent. Vu de l'intérieur, le système est représenté comme une organisation d'agents qui le

compose et qui interagissent entre eux. Donc le collectif est présent non seulement à l'extérieur, par l'environnement dans lequel d'autres agents évoluent, mais il est aussi à l'intérieur dès qu'on observe l'agent dans sa complexité interne comme une organisation d'agents le composant. A un niveau encore plus interne, ces composants peuvent eux-mêmes être des organisations, etc. Mais la descente a forcément une fin et les agents terminaux sont des agents élémentaires indécomposables. Enfin la notion de passager évoluant dans (ou entre) des organisations est propice à la modélisation individus-centrée des interactions, le passager pouvant jouer le rôle de médiateur (corpusculaire) de l'interaction entre composants. Ceux-ci peuvent être entraînés dans un flux ou un champ piloté à un niveau supérieur, à moins que ce soit eux qui provoquent à ce niveau agrégé l'émergence d'un tel flux ou d'un tel champ.

La « membrane » de l'agent est la limite entre deux univers collectifs situés à des niveaux de structuration différents. La manifestation de l'individualité de l'agent étant finalement située à l'interface entre ces deux univers. De plus, cette interface joue un rôle doublement fondamental, car non seulement c'est une membrane filtrante (c'est-à-dire frontière à la fois séparatrice et communicante) mais c'est aussi le lieu-support de tous les contacts et des interactions entre agents d'un même niveau (rencontres, collisions entre mobiles, frontières territoriales, connexions de réseau, etc.) mais aussi entre agents sociaux et spatiaux, entre agents localisés et agents localisateur.

5. Références bibliographiques

- [DPGL03] : Dubos-Paillard E., Guermond Y., Langlois P., « Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SpaCelle », *L'espace géographique*, vol 4, 2003, p357-378
- [Fal01] : El Fallah-Seghrouchni A., « Modèles de coordination d'agents cognitifs », Chap 4, in J.P. Briot, Y. Demazeau, *Principes et architectures des systèmes multi-agents*, Paris, 2001
- [FER 05] Ferber J, Michel F, Baez J, 2005, « AGRE: Integrating Environments with organizations », in *E4MAS'04: Environments for Multiagent Systems*, Australie, p.127-134.
- [FER06] Ferber J. 2006, « Introduction aux concepts et méthodologies de conception multi-agents », Chap 1. in *Modélisation et simulation multi-agent, applications pour les sciences de l'homme et de la société*, (dir) Amblard F., Phan D, Paris 2006, 445 pages
- [For68] : Forrester J.W., 1968, *Principles of Systems*, Wright-Allan Press.
- [Lan94] : Langlois P., « Formalisation des concepts topologiques en géomatique », *Revue internationale de géomatique*, Vol 4, n° 2 - pp 181 à 205, 1994.
- [Lan07] Langlois P., 2007, *Fondements théoriques pour la simulation de systèmes complexes en Géographie*, mémoire d'HDR, 2007, université de Rouen.
- [PhAm07] : Phan D.& Amblard F., 2007, *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*,
- [Pro05] : Provitolo D, 2005, « Un exemple d'effets de dominos: la panique dans les catastrophes urbaines », *Cybergeo*, article 328, 2005.