



HAL
open science

L'organisation comme Design Pattern dans les systèmes multi-agents multi-niveaux

Vianney Sicard, Mathieu Andraud, Sébastien Picault

► To cite this version:

Vianney Sicard, Mathieu Andraud, Sébastien Picault. L'organisation comme Design Pattern dans les systèmes multi-agents multi-niveaux. Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA), Jun 2021, Bordeaux, France. pp.73-82. hal-03665779

HAL Id: hal-03665779

<https://hal.inrae.fr/hal-03665779>

Submitted on 1 Sep 2022

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.

L'organisation comme Design Pattern dans les systèmes multi-agents multi-niveaux

V. Sicard^a M. Andraud^b S. Picault^a
vianney.sicard@inrae.fr mathieu.andraud@anses.fr sebastien.picault@inrae.fr

^aINRAE, Oniris, BIOEPAR, 44300, Nantes, France

^bANSES, Laboratoire Ploufragan-Plouzané-Niort, Unité de recherche en Santé et Bien-être, Ploufragan, France

Résumé

Cet article présente un design pattern destiné à introduire des mécanismes organisationnels dans les systèmes multi-agents multi-niveaux, afin de faciliter la modélisation de systèmes complexes fortement structurés. Le pattern proposé permet de spécifier comment coupler trois niveaux d'agents dans une architecture de simulation multi-niveaux en considérant des contraintes organisationnelles. Nous montrons une application de ce pattern à la modélisation à grain fin de la conduite en bande dans un élevage porcin, où il est employé pour représenter des organisations sociales et physiques. Nous montrons ainsi les avantages de la combinaison de concepts organisationnels et de patterns multi-niveaux pour représenter et simuler des systèmes dynamiques complexes.

[Cet article est adapté de (Sicard et al., 2021).]

Mots-clés : *simulation multi-agents multi-niveaux, design patterns, système organisationnel, systèmes complexes*

Abstract

This paper describes a design pattern aimed at introducing organizational mechanisms into multi-level agent-based simulation architectures, to facilitate the modelling of highly structured complex systems. This pattern makes it possible to specify how to couple any three levels of agents in a multi-level simulation architecture, taking into account organizational constraints. We applied this pattern to the fine-grained modelling of batch management in pig farms, and illustrate how the pattern can be instantiated and composed at several agent levels to reify physical and social organizations. We thus demonstrate the benefits of combining organizational concepts and multi-level patterns to represent and simulate complex dynamic systems.

Keywords: *multi-level agent-based simulation, design patterns, organizational system, complex systems*

1 Introduction

Les systèmes multi-agents multi-niveaux (MLABS, *Multi-Level Agent-Based Systems*) ont fait ces dernières années la preuve de leur intérêt pour modéliser des systèmes complexes (Morvan, 2012) en offrant un cadre de représentation riche et flexible de leur structure. Cette approche étend les systèmes multi-agents (SMA) en fournissant une représentation explicite du niveau macroscopique et de chaque niveau intermédiaire en tant qu'agents dotés de comportements propres. Plusieurs méta-modèles ou architectures ont été proposés pour l'agentification de groupes d'agents à plusieurs échelles (§ 2.1), sans toutefois développer de méthodes spécifiques pour prendre en compte explicitement les caractéristiques organisationnelles qu'on trouve dans certains systèmes complexes, notamment fortement anthropisés. Dans les systèmes naturels, l'organisation est étudiée comme un phénomène émergent qui résulte des interactions entre agents sous-jacents et n'est pas destiné à être introduit en tant que tel dans le modèle. Dans les systèmes conçus par l'homme, l'organisation est souvent un cadre explicite qui a un impact sur le comportement et les interactions entre individus, et doit donc être modélisée de manière explicite.

Les systèmes organisationnels (Ferber and Gutknecht, 1998; Hannoun et al., 2000; Hübner et al., 2009; Weyns et al., 2010) ne sont pas conçus pour s'intégrer à des structures multi-niveaux. Dans ces dernières, l'enjeu est de représenter des groupes d'agents correspondant à des éléments *structurels* imbriqués (e.g. les cellules dans un tissu, un organe, etc.), alors que les systèmes organisationnels, visent à représenter des groupes d'agents selon des caractéristiques ou des contraintes *fonctionnelles*. Les systèmes organisationnels séparent souvent les dimensions physique et sociale, alors que la modélisation d'écosystèmes complexes nécessite un couplage

fort entre elles (Bousquet and Le Page, 2004). Les approches multi-niveaux et les systèmes organisationnels apparaissent ainsi complémentaires pour aborder la modélisation de systèmes complexes.

Notre objectif est d'introduire des mécanismes organisationnels dans une architecture multi-niveaux. Pour ce faire, nous proposons un *design pattern* qui permet de considérer un groupe d'agents à la fois comme une agrégation structurelle d'agents (approche multi-niveaux), et comme une partie structurée prédéfinie d'une organisation, soumise à des contraintes spécifiques. En outre, comme les groupes d'un MLABS sont des agents qui encapsulent un environnement, ce pattern conduit à spécifier la relation entre les dynamiques et contraintes organisationnelles et celles des environnements, sans distinction *a priori* entre environnements physiques et sociaux.

L'article est structuré comme suit : la section 2 analyse les travaux liés aux organisations dans les SMA et les MLABS. La section 3 décrit la nécessité d'une approche organisationnelle multi-niveaux et l'architecture correspondante. La section 4 présente une application du pattern à la modélisation d'un système d'élevage fortement structuré (gestion en bande d'un élevage porcin). Enfin, nous examinons les perspectives de ces travaux pour la modélisation épidémiologique et les SMA en général.

2 Travaux connexes

2.1 Les SMA multi-niveaux

Les MLABS se distinguent des systèmes holoniques (Fischer, 1999; Zhang and Norrie, 1999) ou des architectures récursives telles que SWARM (Minar et al., 1996) par leur capacité à décrire des structures non hiérarchiques, afin de représenter des couplages de niveaux non-arborescents rencontrés dans les systèmes complexes. Outre le nombre croissant d'applications des MLABS, des méta-modèles proposent une agentification de groupes d'agents aux échelles intermédiaires entre des individus atomiques et le système entier (Kubera et al., 2011; Morvan et al., 2011; Drogoul et al., 2013; Camus et al., 2015; Hjorth et al., 2020). Les approches récentes prônent par ailleurs une conception basée sur des *design patterns* (Mathieu et al., 2015; Mathieu et al., 2018) à l'instar d'autres domaines SMA (Juziuk et al., 2014; Klügl and Karlsson,

2009) afin d'améliorer la généricité et la réutilisabilité des solutions opérationnelles développées en réponse à des problèmes conceptuels récurrents. Dans la suite, nous nous appuyons sur le méta-modèle PADAWAN (Picault and Mathieu, 2011), dont le formalisme simple repose sur peu d'hypothèses spécifiques, afin de faciliter la transposition du design pattern que nous proposons à d'autres méta-modèles MLABS. L'aspect multi-niveaux y est représenté par la capacité des agents à encapsuler un environnement. Un agent peut être situé dans un ou plusieurs environnements (sans distinction a priori entre environnements physiques et sociaux), et en même temps encapsuler un autre environnement où peuvent être situés d'autres agents, et ainsi de suite (Fig. 1). Les différents niveaux entre l'ensemble du système et les individus sont représentés par les agents qui, par l'environnement qu'ils encapsulent, hébergent d'autres agents.

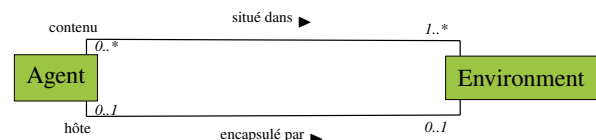


FIGURE 1 – Architecture multi-niveaux. Diagramme de classes montrant les relations entre agents et environnements pour gérer plusieurs niveaux pouvant représenter des structures non-hiérarchiques.

De plus, PADAWAN suppose qu'une matrice d'interaction est associée à chaque environnement pour définir les interactions possibles entre une famille d'agents source et cible dans cet environnement (Kubera et al., 2011). L'élément clef de l'hypothèse sous-jacente à retenir est que les comportements des agents peuvent être spécifiques à chaque niveau.

La principale limite des architectures MLABS, en ce qui concerne les caractéristiques organisationnelles, est qu'elles se focalisent sur les spécifications structurelles des groupes (en tant qu'agents hébergeant d'autres agents via l'environnement) plutôt que sur les spécifications fonctionnelles, sans par exemple la notion de *rôle*. Elles fournissent un cadre pour décrire les couplages entre les agents, les environnements et les interactions, mais assez peu pour les contraintes qui contrôlent les agents et les comportements autorisés dans chaque groupe. Les architectures MLABS sont bien adaptées à la modélisation de systèmes fortement structurés dans lesquels des agents macroscopiques sont construits au-dessus d'agents microscopiques, sous forme d'agrégations, par exemple pour si-

muler des organismes vivants ou le trafic routier. La démarche de conception inverse, qui commence avec des agents macroscopiques et tente de propager les contraintes jusqu'au niveau microscopique, reste difficile.

2.2 L'organisation dans les SMA

La définition de l'organisation donnée par Ferber repose sur trois principes : « (1) le niveau organisationnel décrit le « quoi » et non le « comment » ; (2) aucune description des agents ni de leurs capacités cognitives n'est spécifiée au niveau de l'organisation ; (3) une organisation fournit un moyen de partitionner le système, chaque partition (ou groupe) constitue un contexte d'interaction pour les agents. » (Ferber et al., 2004, traduit) L'organisation peut donc être comprise comme un processus, i.e. un ensemble d'individus avec des contraintes (structure, règles, modèles), ou comme une entité avec ses propres exigences et objectifs (Dignum et al., 2008). L'organisation fournit un cadre pour structurer et gérer les interactions entre les agents, et ajuster leur niveau d'autonomie (Hübner et al., 2009).

Le méta-modèle « Agent-Groupe-Rôle », AGR (Ferber and Gutknecht, 1998), définit les organisations comme un niveau d'abstraction supplémentaire dans un SMA classique, composé de groupes d'agents ayant des objectifs communs ou des tâches communes. Il peut être considéré comme une sorte de cadre dynamique dans lequel les agents sont des composantes. L'environnement (supposé social) représente le contexte de communication entre les agents. Au sein d'un groupe, chaque agent joue un rôle, qui décrit les contraintes (obligations, exigences, compétences) que l'agent doit satisfaire, les avantages (capacités, autorisations, profits) qu'il reçoit, et les responsabilités qui lui incombent. Un agent peut jouer plusieurs rôles et donc se trouver dans plusieurs groupes de la même organisation en même temps. Mais un groupe ne peut être rattaché qu'à une seule organisation. AGRE (Ferber et al., 2005) étend AGR en introduisant un environnement physique. La notion « d'espace » généralise les groupes physiques et sociaux, mais ils restent intrinsèquement distincts (il ne peut y avoir qu'un seul environnement physique mais plusieurs environnements sociaux). Cette approche offre un niveau élevé d'abstraction et établit la base de la structure minimale d'une organisation. Toutefois, la stricte affectation des groupes à une organisation unique et la distinction entre les environnements physiques et sociaux constituent une li-

mite à la représentation des systèmes à structure complexe, car un même groupe ne peut participer à plusieurs organisations. En outre, l'espace dans AGRE n'est qu'un contexte pour un modèle d'activité : il permet de partitionner le système mais pas de représenter la structure ni la dynamique d'un environnement complexe.

Dans MOISE (Hannoun et al., 2000), l'organisation est considérée comme un système de règles qui contraignent le comportement des agents. Ces contraintes correspondent au rôle, i.e. aux spécifications des comportements autorisés d'un agent dans l'organisation. Un groupe est défini par un ensemble de rôles et un sous-ensemble d'objectifs de ces rôles qui peuvent être atteints dans le groupe. La notion de rôle est ici assez similaire à celle d'AGRE, à la différence que les contraintes ne sont pas directement liées à la cohérence du système. Un agent possède un ensemble de contraintes, appelé missions, qu'il doit remplir pour l'exécution d'activités spécifiques. Les groupes sont des compositions d'agents avec leurs rôles et leurs missions, et ne sont pas explicitement liés à la notion d'environnement. Cependant, un groupe, en tant que contexte d'interaction entre agents, peut être envisagé comme un environnement social. Le concept d'organisation se divise formellement en deux : la structure organisationnelle qui est un graphe défini par un ensemble de rôle (sommets) et d'interactions (arêtes); et l'entité organisationnelle, qui en est l'implémentation. MOISE permet de définir un système organisationnel et une division de ce système, mais la notion d'environnement structuré et dynamique n'est pas prise en compte.

D'autres approches abordent les organisations d'un point de vue de l'ingénierie logicielle, comme ORA4MAS (Hübner et al., 2009) et MACODO (Weyns et al., 2010). MACODO, lequel est basé sur ORA4MAS est un intergiciel pour l'organisation dynamique des agents en fonction du contexte. Il propose une abstraction de l'organisation en séparant les aspects de coordination et de structure à partir du comportement local des agents. L'environnement représente le contexte logiciel de communication, de perception et d'action entre les agents. Cette approche apporte plusieurs solutions à la problématique de la relation dynamique entre les agents, le niveau organisationnel et l'environnement, mais elle ne fournit pas de concepts explicites pour décrire la dynamique des organisations.

Les approches organisationnelles, élaborées dans un cadre SMA classique, ne prennent pas en compte les aspects multi-niveaux, comme la

dynamique de l'environnement, la dynamique structurelle des groupes et le couplage entre ces différents éléments. La modélisation de systèmes fortement structurés exige une représentation explicite des interactions entre les éléments atomiques et leur environnement, mais également entre les agents et chaque niveau. Dans ces différentes approches, il n'est pas possible de représenter de manière simple la dynamique des environnements et le couplage entre les groupes et les organisations, particulièrement dans un contexte multi-niveaux.

C'est pourquoi nous proposons dans ce qui suit un design pattern destiné à introduire des caractéristiques organisationnelles dans les MLABS. L'objectif de cette approche est de pouvoir représenter des couplages propres aux organisations entre des agents appartenant à des niveaux hétérogènes, de décrire les dynamiques des environnements, et d'exprimer les contraintes des organisations (adhésion, exclusion...).

3 Le pattern organisationnel multi-niveaux

L'objectif d'un design pattern est de fournir une solution générique, réutilisable et modulaire à un problème spécifique (Gamma et al., 1994). Ainsi, des patterns structurels ont été définis pour décrire les couplages entre deux niveaux (Mathieu et al., 2018). Indépendamment de ces choix structurels, il s'agit ici de permettre l'introduction d'une représentation explicite de relations organisationnelles dans les MLABS, ce qui suppose notamment de faire des groupes et de l'organisation elle-même des agents.

Représenter explicitement une organisation dans les MLABS suppose trois critères : 1) exprimer et formaliser la relation structurelle entre les agents ; 2) contraindre les comportements et les interactions entre les agents (via la notion de rôle, au moins implicite) ; 3) participer au contrôle de l'environnement structurellement et fonctionnellement.

Le pattern doit également être compatible avec les modèles classiques MLABS, en particulier par rapport au groupement d'agents au sens multi-niveaux. Ainsi, l'appartenance à un groupe n'implique pas nécessairement d'être membre d'une organisation particulière, par contre l'adhésion à une organisation implique l'appartenance à un groupe.

Comme les méta-modèles MLABS ne préjugent pas de ce que représente chaque niveau, les ca-

ractéristiques organisationnelles visées peuvent concerner des agents de niveaux a priori quelconques dans le système, en fonction du domaine d'application. La transposition de concepts organisationnels dans les MLABS via un design pattern est donc pertinente, puisqu'elle ne demande pas de transformer tout le système mais seulement d'identifier les agents rattachés à chaque organisation et de spécifier les relations appropriées entre les niveaux, i.e. comment les agents et les environnements sont liés, avec quelles contraintes et quelle dynamique.

3.1 Structure du pattern organisationnel multi-niveaux

Le pattern organisationnel décrit la structure et la dynamique relationnelle entre trois niveaux : organisation, groupes et atomes (Fig. 2).

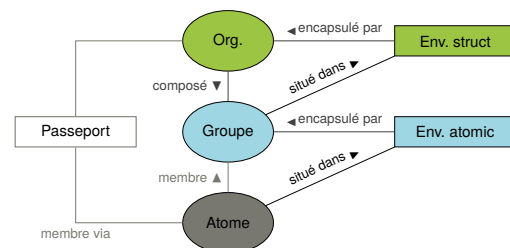


FIGURE 2 – Structure du pattern organisationnel multi-niveaux. L'agent Organisation encapsule un environnement structuré qui est composé d'agents groupes, lesquels encapsulent des environnements atomiques. Les agents impliqués en tant qu'Atomes appartiennent à une organisation par leur localisation dans un environnement atomique. Le Passeport sert de médiateur entre un atome et son organisation.

L'organisation est une agentification d'un environnement structuré, i.e. un environnement qui peut être divisé en sous-environnements (« environnements atomiques »). L'atome représente tout agent membre d'une organisation : l'appartenance à une organisation résulte de la localisation de l'atome dans un environnement atomique, selon les contraintes associées. L'environnement atomique contient de l'information et est encapsulé par un agent Groupe qui gère la dynamique environnementale. Les Groupes sont eux-mêmes situés dans l'environnement structuré encapsulé par l'agent Organisation, qui gère ainsi la dynamique des environnements et assure sa propre cohérence via des contraintes. Comme dans (Ferber et al., 2005), l'organisation est un cadre dans lequel les agents se comportent. Les informations relatives à l'appartenance d'un atome à une organisation (e.g. la localisation de l'atome, l'état de l'atome vis-à-vis

des contraintes, etc.) sont stockées dans le passeport. Nous détaillons ces éléments ci-dessous.

3.2 Les atomes et leurs états

Un atome correspond à tout agent hébergé par une organisation et qui est soumis aux contraintes de celle-ci. Le terme « atome » signifie que nous ne considérons pas sa structure sous-jacente (il peut, ou non, encapsuler un environnement dans lequel d'autres agents peuvent être situés, etc.).

Les atomes sont situés dans un environnement atomique où ils peuvent interagir avec d'autres agents atomiques : tous appartiennent à un groupe, c'est-à-dire l'agent qui encapsule l'environnement considéré. L'atome peut agir dans cet environnement, i.e. prendre ou déposer de l'information (§3.5).

Comme tout agent, l'atome possède des états qui changent en fonction de son comportement (« états réels »). Ces états réels peuvent violer des contraintes de l'organisation. L'organisation peut alors décider soit que cette violation est interdite (et exclure l'atome), soit que l'atome peut être malgré tout considéré comme respectant temporairement les contraintes (et garder l'atome). Dans ce dernier cas, l'organisation passe outre la divergence entre l'état réel de l'atome et l'état attendu en attribuant un « état nominal » à l'atome. Pour préserver l'autonomie des agents, l'état nominal ne peut être imposé directement à l'atome, il est donc consigné dans une structure de données spécifique appelée « Passeport » (§3.3) : l'état nominal d'un agent pour une organisation relève donc de l'interprétation que fait l'organisation des états réels, et non d'un état intrinsèque à l'atome.

3.3 Organisation, contraintes, passeport

L'agent organisation est la concrétisation du niveau abstrait Organisation, dotée de ses propres comportements et états. Une organisation encapsule un environnement structuré qui est divisé en sous-environnements, eux-mêmes encapsulés par des agents Groupes, où les atomes sont localisés (Fig. 2). L'organisation doit vérifier que chacun de ses membres (les atomes) respectent les contraintes qui définissent son intégrité. Si ce n'est pas le cas, elle décide soit d'exclure les contrevenants, soit de reconsidérer comment elle les perçoit en leur attribuant un état nominal qu'elle place dans leur passeport.

Les contraintes permettent à l'organisation d'admettre des atomes et de les localiser, ou de les rejeter. Elles constituent un ensemble de règles concernant les états réels ou nominaux des atomes, auxquelles ceux-ci doivent se plier pour entrer ou rester dans une organisation, et les actions associées au respect ou à la violation de ces règles.

Le passeport constitue un pattern médiateur entre une organisation et un atome. Il stocke des informations sur la localisation et les états nominaux, pour représenter le point de vue de l'organisation sur l'atome, à un temps donné. Le passeport est la propriété d'un atome mais n'est géré que par le système organisationnel (agent Organisation, Fig. 2). Le passeport est composé de deux éléments : l'historique des localisations de l'atome, et le visa (état nominal de l'atome en fonction d'une organisation). Si un atome appartient à plusieurs organisations, il doit disposer d'un passeport répondant à chacune, sans préjuger de l'implémentation.

3.4 Rôle

Les rôles sont considérés comme des comportements abstraits que les agents peuvent manifester au sein d'un groupe (Ferber and Gutknecht, 1998). Comme dans le modèle PADAWAN (Kubera et al., 2011), nous supposons que les comportements que les agents peuvent adopter dans un environnement donné sont spécifiés par une matrice d'interaction. Cette matrice est une fonction qui détermine les interactions possibles entre une famille source et une famille cible. Les familles sources ou cibles peuvent être, selon l'application, soit un agent spécifique, soit un nom arbitraire tel qu'une classe d'agents, soit encore une valeur particulière d'un état réel ou nominal. Les rôles sont alors définis simplement une combinaison de comportements spécifiés dans les matrices d'interaction.

3.5 Environnement, environnement structuré et groupe

En toute généralité, les environnements sont définis formellement selon (Mathieu et al., 2015) comme un espace doté de deux fonctions : placer des agents et fournir de l'information. Une telle notion de l'environnement permet de représenter indifféremment un espace physique ou social. De plus, les environnements ont leur propre dynamique liée à leur topologie (voisinage, transmission d'informations, etc.).

Un environnement structuré est composé de sous-parties (environnements atomiques) organisées selon des relations topologiques spécifiques et animées d'une dynamique propre. La représentation topologique repose sur un graphe dont les sommets sont les environnements atomiques (qui portent de l'information) reliés par des arêtes pondérées (représentant les flux d'information) qui décrivent la dynamique de l'environnement (Fig. 3).

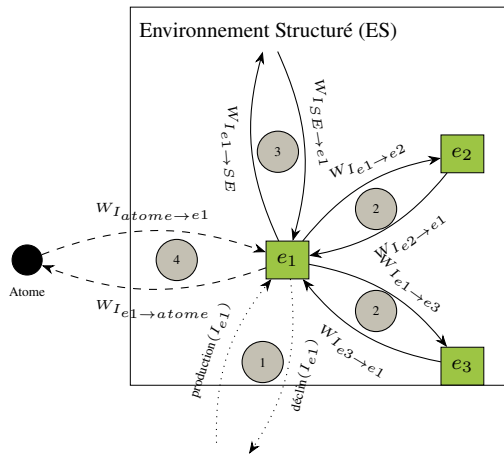


FIGURE 3 – Représentation de la dynamique d'une information I dans un environnement atomique e_1 , résultant des flux entrants/sortants (pondérés par des valeurs $W_{I_{e \rightarrow e'}}$) provenant 1) de la dynamique intrinsèque (sources/puits), 2) des échanges avec d'autres environnements atomiques voisins (e_2, e_3) ou 3) avec l'environnement structuré ES , et 4) des actions effectuées par les atomes situés dans e_1 .

Considérer un environnement comme atomique relève du point de vue du pattern, au sens où les agents concrets du système qui doivent instancier les notions d'Organisation, de Groupe et d'Atome dépendent de la partie du sous-système concernée par la problématique organisationnelle. Ainsi, l'environnement vu comme atomique à un niveau (groupe ou atome) peut lui-même être structuré de façon à implémenter le pattern de façon récursive. De même, un agent considéré comme atomique du point de vue d'une organisation, peut être vu à son tour comme une autre organisation selon une autre instance du pattern (Fig. 4 & 5).

4 Application à la modélisation de systèmes d'élevage complexes

Les modèles épidémiologiques mécanistes permettent de comprendre et de prédire la propagation d'agents pathogènes à différentes échelles (de l'individu au territoire) selon différents scénarios

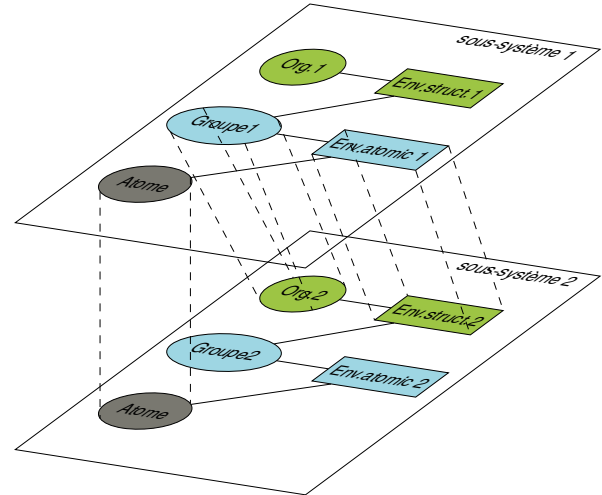


FIGURE 4 – Composition du pattern articulée sur le Groupe. Le niveau Groupe du sous-système 1 est lui-même structuré en organisation. L'Atome est le même dans les deux sous-systèmes.

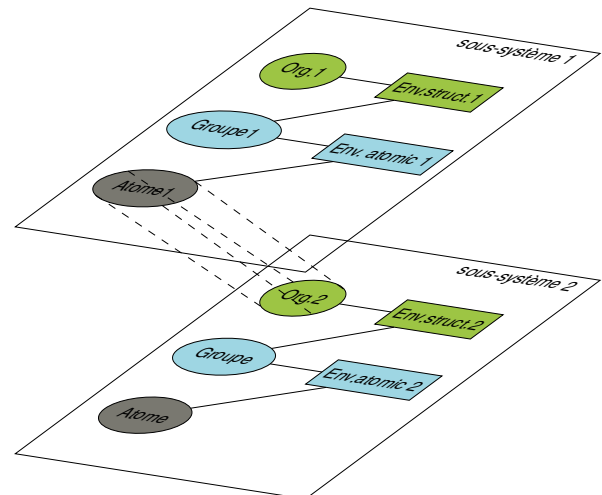


FIGURE 5 – Composition du pattern articulée sur l'Atome. Le niveau Atome du sous-système 1 se décline comme une Organisation dans le sous-système 2.

(Keeling and Rohani, 2008; Ezanno et al., 2020). La prise en compte de la complexité des pathosystèmes (structuration des populations et des environnements, dynamiques, contraintes...) est difficile, mais nécessaire pour rendre les modélisations réalistes, d'identifier les mécanismes impliqués et les leviers d'action possibles.

Le framework open source EMULSION¹, dédié à la modélisation épidémiologique mécaniste stochastique, a montré que les MLABS organisés à partir de design patterns (Mathieu et al., 2018) constituaient un cadre pertinent pour cette problématique (Picault et al., 2019). C'est donc as-

1. <https://sourcesup.renater.fr/www/emulsion-public/>

TABLE 1 – Conduite type d'un élevage porcin en 7 bandes avec intervalle de 21 jours (Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2010). Le temps passé dans un secteur pour chaque bande est calculé de manière à optimiser l'occupation des salles.

	Secteur Insémination	Secteur Gestation	Secteur Maternité	Secteur Post-sevrage	Secteur Engraissement
Stade physiologique	Insémination	Gestation	Allaitement	Post-sevrage	Engraissement
Nombre de bandes à loger	2	4	2	3	6
Entré dans les mêmes salles tous les ... (jours)	35 ou 42	77 ou 84	35 ou 42	56 ou 63	119 ou 126
Durée d'occupation (jours)	35	77	28	4 × 61 ou 3 × 54	6 × 114 ou 1 × 121
Temps disponible pour le nettoyage, la désinfection et le vide sanitaire (jours)	5 × 4 ou 2 × 1	7 et 1	14 et 7	2	5

sez naturellement que nous avons choisi d'adapter ce framework pour implémenter le pattern dans l'architecture multi-niveaux et en réaliser une preuve de concept en santé animale.

4.1 Application à la conduite en bande

Dans ce qui suit, nous montrons comment le pattern organisationnel multi-niveaux peut-être appliqué pour modéliser la conduite en bande en élevage porcin français, ainsi que sa plus-value. Les porcs sont élevés en bandes afin de garantir une évolution homogène des états physiologiques des animaux : gestation et allaitement pour les truies et engraissement pour les porcelets. Cela implique que les bandes doivent être cohérentes, i.e. que tous les animaux doivent être dans le même état physiologique au même moment. Les animaux, selon leur type (truie ou porcelet), leur état physiologique (âge et stade de reproduction), et leur appartenance à une bande, sont placés dans des espaces spécifiques (secteur, salle) qui sont des environnements. Ce type de conduite illustre notre problématique :

- l'environnement physique est fortement structuré (secteur, salle, portée, case) ;
- l'environnement physique possède sa propre dynamique (accumulation, propagation, diffusion et décroissance d'agents pathogènes) ;
- les bandes (environnement social) doivent conserver leur cohérence (critères d'homogénéité)
- les agents peuvent avoir différents statuts (réel : la valeur effective, et nominal : selon la valeur attendue dans la bande) pour un même état (appartenance à une bande, stade physiologique, localisation, etc.) en fonction du contexte ;
- les environnements sont étroitement liés entre eux (couplage entre bande et localisation physique) via différents niveaux

de regroupement d'agents.

Nous nous basons sur une structure d'exploitation « type » (Salines et al., 2020), composée de cinq secteurs correspondant aux différents stades physiologiques : 1) insémination, 2) gestation, 3) maternité (truies et porcelets ensemble pour l'allaitement), 4) post-sevrage (porcelets séparés de leur mère), 5) engraissement (porcs engraisés avant envoi à l'abattoir) (Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2010). Le nombre de bandes détermine le type de conduite (logement et calendrier). Dans notre exemple, nous considérons une gestion en 7 bandes décalées de 21 jours. L'évolution temporelle d'une bande dépend du temps passé dans un secteur, correspondant aux stades physiologiques (Tableau 1). Avant d'aborder la propagation d'agents pathogène et son contrôle, notre objectif est de simuler la conduite et d'observer le comportement global du système et l'évolution des animaux dans les bandes, tant pour les aspects sociaux (bandes) que physiques (hébergement).

Un animal correspond à un atome, et nous considérons deux organisations principales : une pour les bandes (sociale) et une pour l'hébergement (physique). L'organisation « bande » se décompose en plusieurs portées (une truie et « ses » porcelets, naturels ou adoptés, par portée). Chaque portée correspond à un environnement atomique (social) encapsulé par un agent groupe. La portée est liée à l'organisation par un environnement structuré, lequel reflète les relations entre les environnements atomiques. L'organisation « hébergement » est décomposée en plusieurs secteurs (environnements atomiques). Ces environnements atomiques sont des organisations représentant la structuration d'un secteur en salles (Fig 6).

L'évolution des stades physiologiques est fonction du temps et la durée spécifique de chaque étape est directement contrôlée par l'atome et

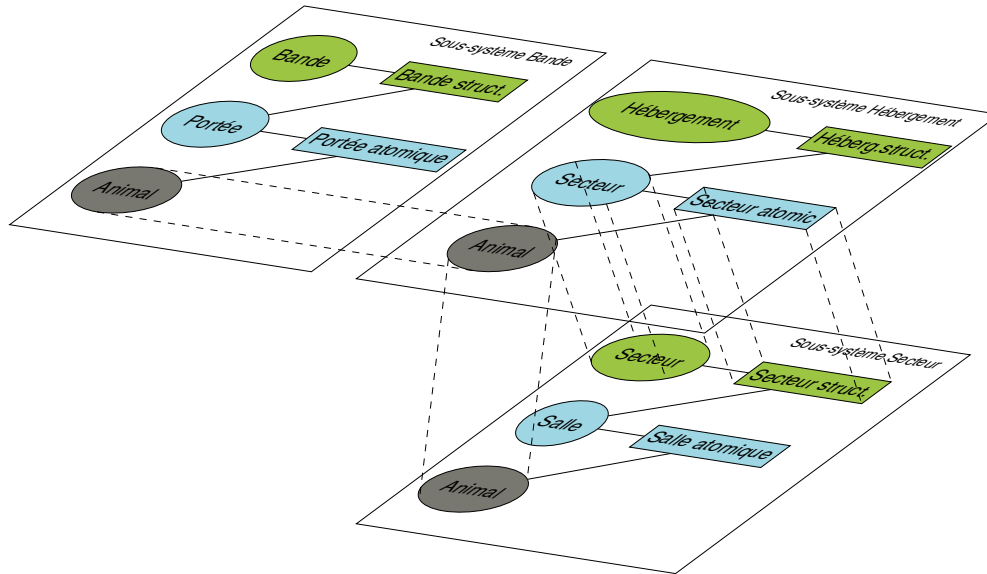


FIGURE 6 – Composition de trois instances du pattern organisationnel multi-niveaux pour modéliser la conduite en bande d'un élevage porcin. Deux organisations principales : Hébergement (organisation physique), et Bande (organisation sociale). L'organisation Secteur est un « zoom » du niveau Secteur d'Hébergement pour décrire les contraintes spécifiques à la gestion d'un Secteur.

dépend de son type (truie ou porcelet).

La localisation des atomes dépend de leurs états (stade physiologique, type, bande) et des contraintes qui définissent le couplage entre les organisations « bande » et « hébergement » :

- la localisation dans un secteur dépend de l'état physiologique
- tous les animaux d'une même bande sont localisés dans une même salle
- tous les animaux d'une même portée sont localisés dans le même lieu

Par exemple, pour être localisés dans le secteur maternité, les animaux peuvent être soit une truie soit un porcelet et doivent être dans l'état allaitement. Certains animaux de différentes bandes peuvent potentiellement satisfaire ces contraintes et être localisés dans le même secteur au même moment, c'est pourquoi les bandes sont réparties dans différentes salles (une bande par salle). La gestion des bandes est optimisée en fonction de l'occupation des salles (Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2010).

Pour la preuve de concept du pattern organisationnel, nous avons représenté l'occupation des secteurs et des salles sur une durée de 452 jours. Du fait du décalage de 21 jours, nous avons commencé par la première bande en allaitement, et calculer à partir de là les démarrages des bandes suivantes (deuxième bande en gestation depuis 21 jours, troisième bande en gestation depuis 42 jours, etc.). L'élevage est composé de 15 truies par bande (i.e. 105 truies en tout).

Les résultats de la simulation (Fig. 7) sont conformes à la littérature (Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2010) et aux pratiques de terrain. Le pattern organisationnel multi-niveaux est efficace pour représenter, modéliser et simuler à travers un cadre homogène les spécificités de la conduite en bande, il permet à la fois d'observer le comportement spatial (localisation) et de suivre l'aspect social selon différents niveaux, de la bande aux individus. Ainsi, la capacité de modélisation multi-niveaux prend en compte les aspects précis des interactions entre les agents, qu'il s'agisse d'atomes, de groupes, d'organisations ou des environnements encapsulés.

5 Conclusion et perspectives

Nous proposons un pattern organisationnel pour étendre la capacité des MLABS à représenter et mettre en œuvre des relations ou des contraintes dynamiques entre les agents, les niveaux d'organisation et les environnements. Cette proposition se présente sous la forme d'un design pattern qui peut être réutilisé et adapté à d'autres architectures MLABS, et qui peut être appliqué à plusieurs sous-systèmes dans le cas de structures très complexes (sous-organisations ou organisations concurrentes). En outre, elle repose entièrement sur le fait que toutes les entités d'un MLABS sont représentées par des agents, ce qui favorise l'homogénéité structurelle du système.

Ce modèle a été aisément implémenté dans

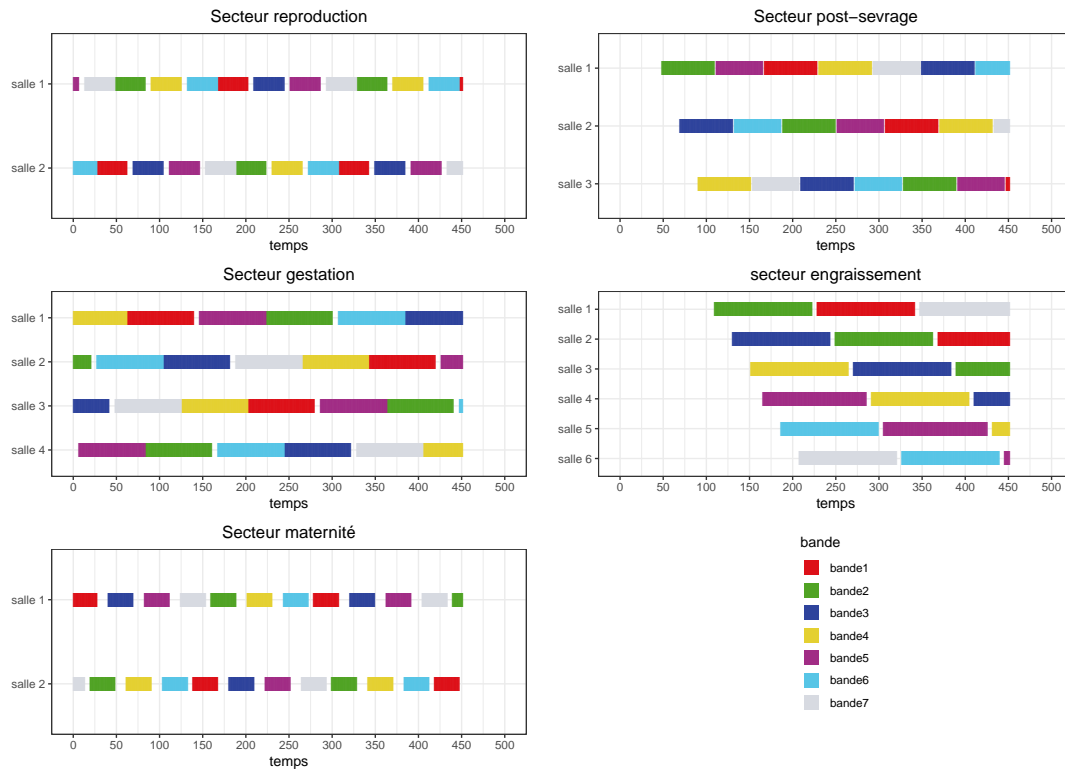


FIGURE 7 – Résultats des localisations issues des simulations. Les animaux sont localisés dans les différents secteurs et salles en fonction de leur état nominal, i.e. vu par leurs organisations (Chambre d’Agriculture de Bretagne, 2010).

une plate-forme de simulation MLABS existante (EMULSION), ce qui démontre la flexibilité et la cohérence de notre proposition avec les approches MLABS déjà structurées par des patterns. La preuve de concept mise en œuvre dans EMULSION contribue également à la modélisation épidémiologique multi-échelles des écosystèmes complexes. La représentation explicite des couplages entre agents, environnements et organisations est une étape importante pour représenter des populations et des environnements fortement structurés et étendre les paradigmes de modélisation classiques. Cela permettra de mieux comprendre la dynamique des environnements anthropisés et aider à évaluer des mesures de contrôles réalistes.

Dans un cadre applicatif, nous avons illustré comment le pattern organisationnel multi-niveaux permet de représenter avec précision l’organisation complexe d’un système agricole fortement structuré : l’élevage porcin en bande. Notre prochain objectif sera d’étudier la propagation d’un agent pathogène respiratoire dans le système en tenant compte, à un niveau de détail fin social et spatial, de la dynamique de l’exposition des animaux aux pathogènes portés par leur environnement et de celle de leurs contacts se-

lon leurs stades physiologiques. Cela permettra de mieux comprendre la circulation des agents pathogènes dans de tels systèmes complexes, notamment pour construire et évaluer des scénarios de maîtrise réalistes et efficaces.

Enfin, l’introduction de caractéristiques organisationnelles dans les MLABS contribue à réduire l’écart entre les approches structurelle et fonctionnelle des systèmes complexes. L’approche par design pattern permet d’élargir le concept d’organisation en tant que relation locale entre plusieurs niveaux réifiés par des agents, ce qui amène à une architecture flexible et homogène.

Remerciements

Ce travail est co-financé par la division Santé Animale d’INRAE (Institut national de recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement) et de la région Pays de la Loire.

Références

- Bousquet, F. and Le Page, C. (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176(3-4) :313–332.
- Camus, B., Bourjot, C., and Chevrier, V. (2015). Considering a Multi-Level Model as a Society of Inter-

- acting Models : Application to a Collective Motion Example. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(3) :7.
- Chambre d'Agriculture de Bretagne (2010). Les conduites en bandes en production porcine - cohérence de la chaîne de bâtiments, Organisation du travail, Truies en groupe.
- Dignum, V., Meyer, J.-J. C., Weigand, H. G., Dignum, F., and Meyer, J.-J. C. (2008). An Organization-oriented Model for Agent Societies.
- Drogoul, A., Amouroux, E., Caillou, P., Gaudou, B., Grignard, A., Marilleau, N., Taillandier, P., Vavasseur, M., Vo, D.-A., and Zucker, J.-D. (2013). GAMA : multi-level and complex environment for agent-based models and simulations. In *Proceeding of the International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'2013)*, pages 1361–1362.
- Ezanno, P., Andraud, M., Beaunée, G., Hoch, T., Krebs, S., Rault, A., Touzeau, S., Vergu, E., and Widgren, S. (2020). How mechanistic modelling supports decision making for the control of enzootic infectious diseases. *Epidemics*, 32 :100398.
- Ferber, J. and Gutknecht, O. (1998). A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. In *Proceedings International Conference on Multi Agent Systems (ICMAS'98)*, pages 128–135. IEEE Comput. Soc.
- Ferber, J., Gutknecht, O., and Michel, F. (2004). From Agents to Organizations : An Organizational View of Multi-agent Systems. In *Agent-Oriented Software Engineering IV*, volume 2935, pages 214–230. Springer.
- Ferber, J., Michel, F., and Baez, J. (2005). AGRE : Integrating Environments with Organizations. In *Environments for Multi-Agent Systems*, Lecture Notes in Computer Science, pages 48–56. Springer.
- Fischer, K. (1999). Robotics and Autonomous Systems. *Robotics and Autonomous Systems*, page 11.
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., and Vlissides, J. (1994). *Design Patterns, Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison Wesley.
- Hannoun, M., Boissier, O., Sichman, J. S., and Sayettat, C. (2000). MOISE : An Organizational Model for Multi-agent Systems. In *Advances in Artificial Intelligence*, Lecture Notes in Computer Science, pages 156–165. Springer.
- Hjorth, A., Head, B., Brady, C., and Wilensky, U. (2020). LevelSpace : A NetLogo Extension for Multi-Level Agent-Based Modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(1) :4.
- Hübner, J. F., Vercouter, L., and Boissier, O. (2009). Instrumenting Multi-agent Organisations with Artifacts to Support Reputation Processes. In *Coordination, Organizations, Institutions and Norms in Agent Systems IV*, Lecture Notes in Computer Science, pages 96–110. Springer.
- Juziuk, J., Weyns, D., and Holvoet, T. (2014). *Design Patterns for Multi-agent Systems : A Systematic Literature Review*, pages 79–99. Springer.
- Keeling, M. J. and Rohani, P. (2008). *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*. Princeton University Press.
- Klügl, F. and Karlsson, L. (2009). Towards Pattern-Oriented Design of Agent-Based Simulation Models. In *Multiagent System Technologies*, volume 5774 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 41–53. Springer.
- Kubera, Y., Mathieu, P., and Picault, S. (2011). IODA : An interaction-oriented approach for Multi-Agent Based Simulations. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 23(3) :303–343.
- Mathieu, P., Morvan, G., and Picault, S. (2018). Multi-level agent-based simulations : Four design patterns. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 83 :51–64.
- Mathieu, P., Picault, S., and Secq, Y. (2015). Design patterns for environments in multi-agent simulations. In *Proceedings of the 18th Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2015)*, volume 9387, pages 678–686. Springer.
- Minar, N., Burkhart, R., Langton, C. G., and Askenazi, M. (1996). The Swarm Simulation System : A Toolkit for Building Multi-Agent Simulations. Technical report.
- Morvan, G. (2012). Multi-level agent-based modeling - A literature survey. *arXiv :1205.0561 [cs]*. arXiv : 1205.0561.
- Morvan, G., Veremme, A., and Dupont, D. (2011). IRM4MLS : The Influence Reaction Model for Multi-Level Simulation. In *Multi-Agent-Based Simulation XI*, volume 6532 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 16–27. Springer.
- Picault, S., Huang, Y.-L., Sicard, V., Arnoux, S., Beaunée, G., and Ezanno, P. (2019). EMULSION : Transparent and flexible multiscale stochastic models in human, animal and plant epidemiology. *PLOS Computational Biology*, 15(9) :e1007342.
- Picault, S. and Mathieu, P. (2011). An Interaction-Oriented Model for Multi-Scale Simulation. In *Proceedings of the 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'2011)*, pages 332–337. AAAI.
- Salines, M., Andraud, M., Rose, N., and Widgren, S. (2020). A between-herd data-driven stochastic model to explore the spatio-temporal spread of hepatitis E virus in the French pig production network. *PLOS ONE*, 15(7) :e0230257.
- Sicard, V., Andraud, M., and Picault, S. (2021). Organization as a Multi-level Design Pattern for Agent-based Simulation of Complex Systems :. In *Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, pages 232–241. SCITEPRESS.
- Weyns, D., Haesevoets, R., Helleboogh, A., Holvoet, T., and Wouter, J. (2010). The MACODO Middleware for Context-Driven Dynamic Agent Organizations. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, 5(4) :16.
- Zhang, X. and Norrie, D. H. (1999). Holonic Control at the Production and Controller Levels. In *In Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, pages 215–224.