Approches distribuées à base d'agents pour modéliser et simuler les systèmes complexes spatialisés

Nicolas Marilleau

▶ **To cite this version:**

Nicolas Marilleau. Approches distribuées à base d'agents pour modéliser et simuler les systèmes complexes spatialisés. Complexité [cs.CC]. Université Pierre & Marie Curie - Paris 6, 2016. tel-01428319

HAL Id: tel-01428319
https://hal.science/tel-01428319

Submitted on 6 Jan 2017

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.

HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

présentée à

L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Approches distribuées à base d'agents pour modéliser et simuler les systèmes complexes spatialisés

par
Nicolas MARILLEAU, UMI 209 UMMISCO – IRD/UPMC
contact : nicolas.marilleau@ird.fr

le
Mercredi 16 novembre 2016

devant le jury constitué de :

Rapporteurs	Guillaume Deffuant	Directeur de Recherche au LISC–IRSTEA, Aubière
	Jean-Pierre Muller	Directeur de Recherche à l'UPR GREEN–CIRAD, Montpellier
	Slimane Ben Milled	Professeur au BIMS-Lab – Université de El Manar/Institut Pasteur, Tunis
Examinateurs	Arnaud Banos	Directeur de Recherche à Géographie-Cité–CNRS, Paris
	Mohammed Baaziz	Professeur au laboratoire de biochimie–Université Cadi Ayyad, Marrakech
	Amal El Fallah Seghrouchni	Professeur au LIP6 – Université Pierre et Marie Curie, Paris
	Emmanuelle Encrenaz	Maître de conférence (HDR) au LIP6 – Université Pierre et Marie Curie, Paris

Table des matières

Table des matières **iii**

1 Contexte introductif **1**

2 Les systèmes complexes avec une vision multi-échelle et distribuée **5**

1 Plurisdiscuplinarité, interdisciplinarité et transdisciplinarité 6

1.1 Concepts et définitions 6

1.2 Contribuer aux systèmes complexes dans la transdisciplinarité . . 7

1.3 Exemples illustrés 8

2 Le modèle et sa distribution au centre des préoccupations 11

2.1 L'APSF, une modélisation pluridisciplinaire de l'espace sol 11

2.2 La participation au profit de la modélisation-simulation 15

2.3 Distribuer les simulations spatialisées ou les plans d'expériences . 22

3 Le couplage de modèles, une approche en devenir 29

3.1 Couplage faible, fort ou intégratif 30

3.2 Assurer la cohérence temporelle 31

3.3 Assurer la cohérence des données 32

4 Conclusion 33

3 Démocratiser le processus de modélisation-simulation **35**

1 Repenser la modélisation-simulation pour tendre vers l'aide à la décision 36

1.1 Vers une centralité du modèle par le couplage 37

1.2 COMODOS, un environnement participatif de modélisation-simulation à grande échelle 37

1.3 Interconnecter des outils existant et profiter de leurs avancées . . 40

2 Trois verrous scientifiques à résoudre 43

2.1 Coupler des modèles par l'espace 43

2.2 Utiliser massivement le calcul haute performance 47
2.3 Favoriser les transferts d'échelle, l'expérience de Lokta-Volterra . 50
3 Un investissement nécessaire dans la pluridisciplinarité 55
3.1 Projet Camisole 55
3.2 Projet MarrakAir 57
4 Conclusion 58

4 Conclusion **61**

5 Curriculum Vitae **63**
1 Fiche synthétique 63
2 Activités d'animation et d'administration de la recherche 64
3 Projets de recherche 65
4 Enseignements 65
4.1 Enseignements universitaires 65
4.2 Tutoriaux 66
5 Encadrements 67
5.1 Doctorats 67
5.2 Stages de master 67
5.3 Projets tuteurés 68
6 Bibliographie 69
6.1 Ouvrages et numéros spéciaux 69
6.2 Chapitres d'ouvrage (13 publications) 69
6.3 Articles de revue indexés dans des bases internationales ou par l'AERES (7 publications) 70
6.4 Articles de conférences avec actes et comité de lecture (45 publications) 71

Bibliographie **77**

Chapitre 1

Contexte introductif

La complexité entretient un cercle vertueux avec les recherches disciplinaires : elle se nourrit de leurs avancées pour, à son tour, les alimenter de développements conceptuels et techniques [81]. Cette progression s'est accélérée ces dernières années sous l'impulsion spectaculaire des moyens et outils computationnels [104, 34]. La modélisation-simulation des systèmes complexes ouvre alors un champ des possibles jusqu'alors inaccessible.

Les modèles ont évolué avec les ambitions croissantes des communautés scientifiques. Ainsi les modèles "KISS" (Keep It Simple Stupid) [6] sont devenus "KIDS" (Keep It Descriptive Stupid) [38] apportant une fidélité fonctionnelle et structurelle vis à vis du système complexe étudié. Aujourd'hui, les modèles deviennent intimement liés au "Monde" par l'introduction progressive de données de terrain, par la captation, mais aussi par les usages que nous en faisons. Ils aspirent, en effet, à s'introduire dans les démarches d'aide à décision.

Si hier, le modèle était conçu et développé par une unique personne ayant de fortes compétences en mathématiques ou en informatique, aujourd'hui il est le produit d'un groupe pluridisciplinaire : un concentré de savoir à visée scientifique ou opérationnelle. Plus exactement, la modélisation-simulation ne peut se réaliser sans le concours du couple – modélisateurs – thématiciens – constitué de chercheurs ou d'opérationnels ayant des points de vue aussi différents que leur culture.

L'activité de modélisation-simulation suit donc un processus participatif (dans son sens naturel [1]) où prennent part l'ensemble des membres du groupe, à leur mesures, en fonction de leurs compétences. Les disciplines usent d'un vocabulaire scientifique différent voire antagoniste ce qui rend difficile, parfois ambigüe, les échanges aux interfaces. Le processus de modélisation-simulation devient alors complexe et le modèle en est l'émergence.

Comment est-il possible de démocratiser l'activité de modélisation-simulation ? Une recherche transdisciplinaire appuyée par une implication dans plusieurs disciplines est

1. Pour des raisons de lecture, nous ne souhaitons pas réaliser un distinguo entre les termes "coopératif", "collaboratif" et "participatif". Nous utiliserons uniquement le terme "participatif" dans son sens le plus simple "prendre part à l'action collective".

nécessaire. La construction d'un outil en est une concrétisation. Il s'agit de la posture que je défends dans mes travaux.

Concevoir des outils participatifs de modélisation est essentiel afin de fédérer les manières de penser et assurer des échanges efficaces. En outre, ils doivent nécessairement s'appuyer sur des moyens de calcul haute performance afin de répondre à une complexité croissante des modèles et des outils d'aide à la décision. Par contre, il est important de rendre transparent l'accès à ces moyens pour le chercheur lambda.

On notera les travaux menés par le groupe ComMod [31] qui s'intéressent au processus de co-construction, plutôt qu'au modèle en lui-même. Dans un autre registre, certains travaux vont s'intéresser aux nouvelles technologies du calcul haute performance pour réduire les temps de simulation. On observe ici deux visages de la distribution : (i) la distribution des compétences pour construire ensemble plus rapidement des modèles, des scénarios ; (ii) et la distribution des simulations pour réduire les temps de calcul. Je pense que ces deux points de vue doivent être traité conjointement afin de construire un ensemble cohérent.

Ainsi mes recherches visent donc à proposer un environnement de modélisation-simulation participatif et intégratif où modélisateurs, thématiciens et opérationnels (décideurs, acteurs de terrain, etc) seront en mesure d'unifier leurs forces et leurs compétences pour concevoir et explorer des modèles spatialisés via une démarche et une infrastructure participative. Les utilisateurs seront, d'une part, en mesure de combiner des modèles existants pour construire des modèles spatialisés et d'autre part, de les explorer en tirant partie du jeu sérieux et du calcul haute performance.

Pour concevoir un tel environnement de modélisation-simulation, il semble intéressant de prendre le contrepied des approches de couplage existantes en plaçant la spatialité des modèles au centre du protocole de couplage. Ainsi les modèles seront couplés via un espace multi-échelle et interagiront par stigmergie aux travers de ce même espace. Cette approche montre tout particulièrement son efficacité en science du sol : une structure pseudo-fractale comme l'APSF traduit la texture du sol. Les processus du sol (macrofaune, décomposeur, plante) sont quant à eux des modèles localisés à différentes échelles, dans ce sol virtuel.

Cette approche de couplage forme une base solide autour de laquelle gravitent :

— *des moyens participatifs* pour la conception et le couplage de modèles qui tiennent compte du point de vue et des compétences des utilisateurs. Un biologiste sera par exemple en mesure de participer à la modélisation en ayant une visualisation du système par des compartiments alors que le modélisateur utilise une visualisation plus algorithmique.

— *des outils participatifs* basés sur les jeux sérieux afin d'identifier des scénarios intéressants à explorer. Les modèles produits pourront faire l'objet de sessions de simulations participatives où interactivité et discussion entre experts seront maîtres-mots. Elles contribueront à l'émergence de scénarios qui formeront un consensus et pourront être identifiés comme importants.

— *des ressources de calcul haute performance* afin d'explorer les scénarios importants. Grâce à une algorithmique distribuée, nous profiterons de la technologie cluster et grille afin d'explorer les scénarios en un temps record tout en masquant la difficulté d'utiliser ce type d'environnement de calcul.

Dans ce cadre, les systèmes multi-agents forment un socle sur lequel nous bâtissons et proposons une instrumentation afin de favoriser la multi-disciplinarité dans le processus de modélisation-simulation des systèmes complexes spatialisés. Il s'agit d'une approche distribuée à la fois (i) dans l'explicitation des problématiques en développant des techniques de modélisation-simulation participative, (ii) dans la capitalisation et la réutilisation de l'existant par la proposition d'infrastructures favorisant le couplage multi-échelle multi-temporelle, (iii) et dans l'exécution des modèles en imaginant une algorithmique distribuée, adaptée à l'exploration des modèles et à la distribution d'une simulation. Ce projet reposera sur le réseau d'outils que je souhaite fédérer.

Cette habilitation se décompose en 2 chapitres suivi de mon curriculum Vitæ :

Chapitre 2 : Les systèmes complexes avec une vision multi-échelle et distribuée Au cours de ce chapitre, nous nous interrogerons d'une part sur la manière de fédérer des compétences et des expériences autour du modèle et d'autre part sur la manière de rendre "facile" l'usage des techniques et des outils de modélisation.

Au travers de deux exemples soigneusement choisis, nous ferons une analyse de moyens déjà déployés permettant d'élever le modèle au centre des discussions. Un des moyens choisi repose sur les techniques de couplage.

Chapitre 3 : Démocratiser le processus de modélisation-simulation A partir de l'analyse faite dans le chapitre 2, nous défendons une approche nouvelle favorisant la participation des chercheurs et opérationnels tout au long du processus de modélisation-simulation.

Ce projet se situant dans la continuité de travaux actuels disséminés (ex. GAMA, OpenMole, PAMS...), nous nous intéressons à fédérer tous ces outils afin de former un ensemble cohérent et donnons des éléments de réponses à quelques verrous scientifiques.

Chapitre 5 : Curriculum Vitæ

Chapitre 2

Les systèmes complexes avec une vision multi-échelle et distribuée

Au travers de sa construction et de ses utilisations, le modèle devient le moyen d'observer, de disséquer, de déchiffrer et d'anticiper les phénomènes qui nous entourent [62, 85, 103, 3]. Cette démarche suscite l'intérêt des communautés, si bien que ces dernières années nous avons observé un développement rapide de l'activité de modélisation alimentant une population de modèles qui aujourd'hui foisonnent. Ces modèles étudient des systèmes complexes divers et variés au sein de champs disciplinaires comme la géographie [2, 97, 8], l'écologie [95, 25], l'épidémiologie [47, 24] ou les sciences du sol [7, 86]. On entrevoit des modèles à l'interface de plusieurs disciplines notamment entre la géographie et l'épidémiologie [10].

Cet engouement pour les sciences de la complexité est sans doute le fruit d'importantes évolutions technologiques. Mais, on notera surtout un véritable souhait d'appropriation de la part des communautés scientifiques et des opérationnels [8]. Le modèle ouvre des perspectives scientifiques qui ne peuvent être atteintes via des approches traditionnelles : c'est une des premières fois où l'objet de l'étude devient accessible et malléable à souhait. Cependant, l'informatique et les mathématiques, leurs concepts, leurs outils et "la peur du code" sont, pour les thématiciens et les opérationnels, des freins à l'autonomie.

Les techniques utilisées pour l'élaboration des modèles, dont font partie les systèmes multi-agents [1] [104, 32], sont nombreuses. Elles sont choisies au cas par cas selon les objectifs de l'analyse et les affinités du thématicien [75]. La démarche de modélisation reste donc en grande partie artisanale et empirique ce qui lui confère naturellement un caractère distribué sur plusieurs points de vue dont :

— *les compétences mobilisées* – les ambitions de modélisation devenant croissantes, la connaissance mobilisée ne peut plus être détenue par une seule et même personne mais appartient à un groupe rassemblant plusieurs champs disciplinaires ;

1. Un système multi-agents est un système constitué d'entités organisées en interaction, autonomes dans leurs actions et leurs prises de décision, qui évoluent dans un espace. Pour plus d'information le lecteur peut se référer à [42].

— *modèle construit* – les modèles *ad-hoc* construits à partir de rien laissent aujourd'hui la place à des composés résultant d'une combinaison astucieuse de modèles existants, déjà éprouvés ;
— *les ressources nécessaires de calcul* – les enjeux de simulation étant grandissants, l'usage des moyens de calcul haute performance s'avère aujourd'hui une nécessité ;
— *les outils utilisés* – la réalisation d'un projet de modélisation requiert une grande variété de moyens conceptuels, d'analyses et de simulations.

Comment fédérer des compétences et des expériences autour du modèle ? Comment combiner des modèles ? Comment rendre "facile" l'usage des techniques et des outils de modélisation ? Pour chacune de ces questions, il est important de trouver des réponses si l'on veut démocratiser le processus de modélisation-simulation.

Dans cette perspective nous verrons dans un premier temps les tenants et les aboutissants de la recherche aux frontières des disciplines. Ensuite, aux travers de cas d'étude soigneusement choisis, nous verrons quels moyens sont utiles pour élever le modèle au centre des discussions. Un des moyens est l'usage des techniques de couplage, nous aborderons ce point dans un dernier temps.

1 Plurisdiscuplinarité, interdisciplinarité et transdisciplinarité

L'activité de modélisation des phénomènes complexes passe par un échange, souvent à l'interface des disciplines, afin de façonner un concentré de savoir : le modèle. Ces échanges ponctuels sont profitables dans l'instant mais peuvent, à moyen et long termes, nourrir les disciplines engagées voire d'autres domaines complètement étrangers.

Les concepts de *pluridisciplinarité*, d'*interdisciplinarité* et de *transdisciplinarité* se distinguent alors par un degré de capitalisation de l'expérience pour des travaux ultérieurs. Nous aborderons ce point dans un premier temps. Contribuer aux domaines des systèmes complexes passe par une recherche dans l'inter- et la trans-disciplinarité et par un investissement dans les disciplines. Nous aurons cette réflexion dans un second temps avant d'illustrer nos propos au travers de deux domaines d'application : la géomatique et les sciences du sol.

1.1 Concepts et définitions

Certains feront l'amalgame entre *pluridisciplinarité*, *interdisciplinarité* et *transdisciplinarité*, conséquence d'une frontière ténue entre ces trois concepts. Pourtant, ces mots nuancent la nature de l'échange scientifique et son impact dans l'évolution des disciplines [107]. Pendant que l'un (la pluridisciplinarité) s'intéresse simplement et presque sans lendemain, à la mise en commun de connaissances et de compétences (aux travers de collaborations visant à accomplir un objectif), les autres (l'inter-, et la transdisciplinarité) ont la particularité d'enrichir mutuellement les disciplines en jeu et de

faire évoluer le questionnement, les méthodes et les outils. Cette terminologie met selon Guy Michaud dans [89] l'accent sur les interactions entre les disciplines :

- *La pluridisciplinarité*– se définit *"comme une association de disciplines qui concourent à une réalisation commune, mais sans que chaque discipline ait à modifier sensiblement sa propre vision des choses et ses propres méthodes* [35]. Il s'agit alors d'une juxtaposition des points de vue et des compétences afin de répondre à un même sujet
- *L'interdisciplinarité*– se définit comme une association de disciplines pour répondre à un objectif commun en introduisant *une communauté des points de vue*. Les concepts et les idées manipulés sont rassemblés et forment une production commune réutilisable. L'activité interdisciplinaire contribue ainsi à l'ouverture des frontières entre les disciplines engagées et à un enrichissement mutuel.
- *La transdisciplinarité*– se définit par *"la mise en œuvre d'une axiomatique commune aux différentes disciplines"*. Ainsi, il s'agit d'une activité qui est *"est à la fois entre les disciplines, à travers les différentes disciplines et au delà de toute discipline"* [82]. La transdisciplinarité s'intéresse donc à construire des objets scientifiques communs en se nourrissant de recherches disciplinaires qui profitent à leur tour de ces avancées [74, 81].

Prenons l'exemple d'un biologiste et d'un informaticien menant un travail en commun. S'il s'agit simplement de concevoir et de développer un modèle, ce travail s'inscrit dans le cadre de la pluridisciplinarité : l'informaticien est presque "au service" du biologiste car "simple" concepteur et développeur d'un modèle. Mais, dans le cas où ces mêmes chercheurs conçoivent ensemble des moyens apportant une représentation descriptive des sols, ils réalisent une activité interdisciplinaire car des verrous scientifiques doivent être levés aussi bien en informatique (gestion d'un espace multi-échelles, représentation des processus écosystémiques) qu'en sciences du sol. Si ce travail apparaissait adapté à la géographie par exemple, on parlerait de transdisciplinarité.

1.2 Contribuer aux systèmes complexes dans la transdisciplinarité

Étudier un phénomène réel ou non, le modéliser et le simuler contribuent implicitement au domaine de la modélisation car, l'expérience acquise et l'approche utilisée présenteront nécessairement une originalité induite par le cas d'application et fera, sans doute, l'objet d'un intérêt futur.

Cependant, contribuer explicitement, dans la transdisciplinarité, aux sciences de la complexité nécessite, d'une part, une réflexion inter-disciplinaire, en vue de proposer des méthodes, des concepts et des outils de modélisation. D'autre part, il est précieux d'acquérir un regard et une expertise suffisante, dans plusieurs disciplines distinctes afin de nourrir une contribution plus fondamentale s'appliquant à une multitude d'autres domaines.

Les plates-formes comme OpenMole [93] et GAMA [37] entrent dans cette perspective car elles sont nées à partir de simples constats (dans quelques disciplines) et proposent

des solutions qui vont au delà de ces disciplines originelles. Il s'agit aussi de la démarche que j'ai adoptée tout au long de mon parcours.

1.3 Exemples illustrés

Porter une réflexion transdisciplinaire ne peut, à mon sens, se passer d'expériences interdisciplinaires dans des disciplines très différentes comme la géographie, l'écologie, l'halieutique ou l'épidémiologie. Nous en choisissons deux, des cas d'école aux antipodes en termes de sujet d'étude, de temporalité et de spatialité : les sciences sociales et les sciences du sol. Ces deux domaines serviront de fil conducteur tout au long de ce document.

1.3.1 Sujet d'étude n°1 : Modélisation des dynamiques intra-urbaines quotidiennes (le projet MIRO)

Décideurs et scientifiques s'accordent sur la nécessité de mieux prendre en compte les concepts de durabilité et de résilience comme base des politiques d'aménagement urbain. Celles-ci doivent ainsi promouvoir le respect des équilibres sociaux, l'intégration harmonieuse de la ville aux écosystèmes qui l'entourent, l'usage d'un habitat "vert", ou encore la promotion de moyens de transport économes en énergie. Elles doivent également veiller à diminuer la vulnérabilité de la ville et de sa population face aux scénarios de catastrophes naturelles ou de changements climatiques.

Même si les fonctions de la ville sont définies une à une, leur enchevêtrement rend difficile d'en optimiser une sans modifier, voire dénaturer, l'efficacité d'une autre. C'est pourquoi, il est délicat d'imaginer des politiques qui fassent consensus : (i) sans tenir compte de la diversité des acteurs locaux, des dynamiques environnementales et des processus sociaux ; (ii) et sans évaluer, *a priori*, leur impact sur le territoire.

Comment prendre en compte des données aussi diverses que la démographie, le climat ou la dynamique écologique dans l'évaluation d'un choix de planification urbaine ? Comment anticiper les conséquences sociales, économiques, écologiques, d'une politique d'aménagement donnée ? Comment dessiner et évaluer des politiques adaptées qui fassent consensus parmi l'ensemble des acteurs de la ville ?

Répondre à ces questions passe par la conception de nouveaux outils d'aide à la décision, basés d'une part sur l'association de modèles mathématiques et/ou informatiques d'autre part l'expérience des acteurs et collectivités locales. L'ensemble donne lieu à de véritables expérimentations virtuelles, ayant pour vocation :

- *de sensibiliser les acteurs locaux* sur l'impact des politiques qu'ils mettent en place par une approche simulation "what if" ;
- *d'identifier des politiques innovantes* au travers de scénarios de jeux sérieux multi-acteurs faisant intervenir chercheurs et acteurs de terrain autour du modèle ; et
- *de caractériser en détail le devenir du système* par simulations à grande échelle et massives, réalisées sur des moyens intensifs de calcul tel qu'un cluster ou une grille.

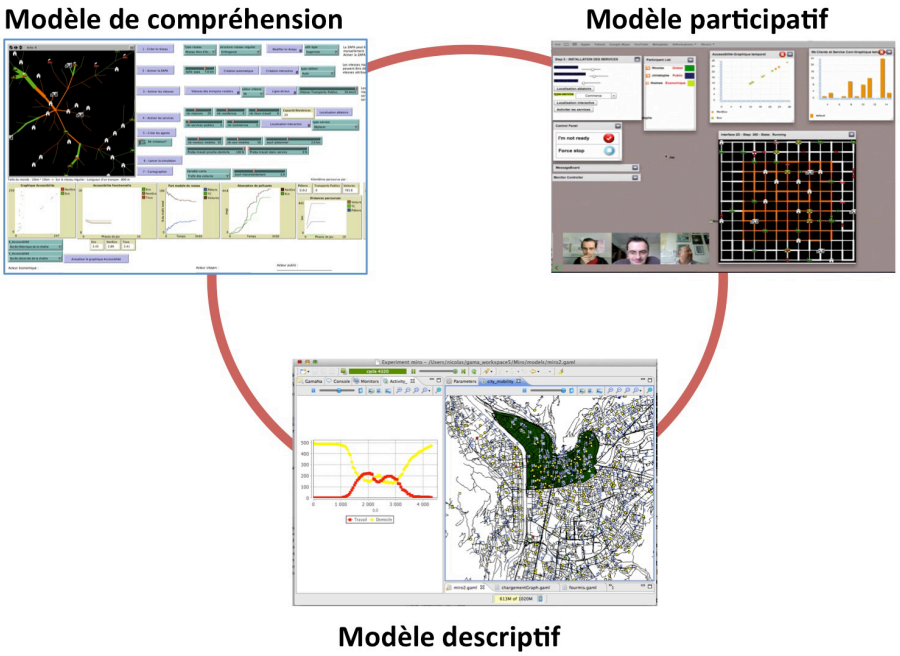


Figure 2.1 – MIRO – 3 modèles, 3 enjeux de modélisation-simulation différents : (i) un modèle de compréhension pour comprendre le système, échanger et tester des hypothèses scientifiques ; (ii) un modèle participatif pour sensibiliser et identifier des scénarios avec les acteurs de terrain ; (iii) et un modèle à grande échelle pour explorer les scénarios

Dans cette perspective, le projet MIRO [45, 9] place le modèle au centre des discussions. Il est un support commun, partagé et manipulé par un groupe de personnes. Mais, il est aussi un objet singulier car, il émane de discussions de quelques individus répondant à un même objectif, à la frontière des disciplines. Ainsi, MIRO distribue 3 modèles complémentaires symbolisant 3 formes d'échanges 2.1 :

— *le modèle de compréhension (SmartAccess)* – un modèle simplifié du système dont l'objet est d'être construit pendant la discussion entre concepteurs afin d'identifier et de comprendre les processus de la ville à modéliser. Il s'agit d'une approche interactive *"d'essai–erreur"* ;

— *le modèle participatif (SM2A2)* – Il s'agit d'une version multi-acteurs du modèle *SmartAccess* à destination des acteurs locaux. Par le jeu, cette version du modèle vise à : (i) sensibiliser les acteurs locaux sur les conséquences de leur politique, (ii) engager une discussion avec eux pour identifier des scénarios d'aménagement pertinents à portée opérationnelle ;

— *le modèle à grande échelle (GamiroD)* – Il s'agit d'un modèle à grande échelle construit sur la base de données de terrain et des processus de la ville identifiée dans *SmartAccess*. Son objectif est d'explorer, sur un cluster, les scénarios d'aménagement conçus lors des sessions de jeux sérieux.

Plus généralement, les modèles canalisent et fédèrent une connaissance distribuée (détenue par plusieurs personnes) sur un système complexe, et forment un condensé pour

en produire de nouvelles par simulation. En résumé, ce projet repose sur deux formes de distributions : la distribution des connaissances et la distribution du calcul.

1.3.2 Sujet d'étude n°2 : modélisation multi-échelles des sols (Projet SWORM)

Les sols jouent un rôle majeur dans la fourniture des services et biens offerts aux humains par les écosystèmes. Situés à l'interface entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et la biosphère, ils participent aux grands cycles nécessaires à la vie sur Terre tels que les cycles de l'eau et des nutriments majeurs (carbone, azote, phosphore). Ils supportent la plupart des systèmes de production agricoles, sylvicoles et pastoraux et participent à la régulation du climat (en contrôlant les émissions de gaz à effet de serre et la séquestration du carbone), au contrôle de l'érosion et à la détoxication.

Les sols sont reconnus comme étant des systèmes biologiques et écologiques particulièrement complexes : ils sont en effet composés d'un grand nombre d'entités, de taille très différentes allant du microorganisme (bactérie, champignon, protozoaire) à la macrofaune (ver de terre, fourmi). Ces entités entretiennent de multiples interactions entre elles et avec leur environnement, si bien qu'il n'est souvent pas possible de déduire simplement leur comportement global à partir de leurs propriétés individuelles. Par exemple, les activités microbiennes génèrent l'essentiel des fonctions du sol sous la dépendance d'autres organismes notamment les vers de terre. Les structures turiculaires créées par les vers de terre sont reconnues comme étant des *hot-spots* d'activités microbiennes.

Pour comprendre et prévoir le fonctionnement d'un sol, les besoins en modélisation sont croissants car les expérimentations *in silico* ouvrent de nouvelles perspectives, irréalisables *in vivo* pour des raisons techniques et de coût. *In vivo*, il est par exemple impossible de suivre l'évolution de la matière organique (MO) contenue par un sol sans avoir préalablement prélevé ou reconstruit des dizaines voire des centaines d'échantillons homogènes. *In silico*, il s'agit simplement de suivre l'état d'une variable d'un modèle durant une simulation qui a été répliquée.

Dans les modèles destinés à décrire et à comprendre le fonctionnement d'un sol, le biotique et l'abiotique sont souvent implicitement décrits via des modèles aspatiaux dit à compartiments [60, 86, 61]. Ceci est notamment la conséquence d'une difficulté à rendre compte [90] :

— des nombreuses interactions existantes entre les organismes ;
— des nombreux échanges entre les organismes et leur environnement spatial ; et
— de l'hétérogénéité spatiale du sol.

Pourtant dans certains cas, la prise en compte explicite de l'hétérogénéité spatiale et des groupes fonctionnels d'organismes permettrait de mieux décrire le fonctionnement du sol [51].

Le modèle SWORM [67, 17] est un des précurseurs dans le domaine de la modélisation spatiale des sols. Ce modèle reposant sur le paradigme agent reproduit l'effet de la macrofaune sur la structure du sol, en s'intéressant à la bioturbation ainsi que la dynamique

de la matière organique. Ainsi chaque agent représente un ver de terre et se déplace dans un environnement virtuel en 3 dimensions, multi-échelles et hétérogène.

Suite à de nombreux échanges interdisciplinaires, j'ai proposé une approche appelée APSF (Arborescent, Pore, Solid, Fractal) permettant d'allier simplicité de description et réalisme afin de décrire la structure complexe qu'est le sol. Pour plus d'information le lecteur peut se référer à la section 2.1 de la page 11.

Les agents "ver de terre" sont décrits au moyen de deux comportements représentatifs de la bioturbation :

— *le comportement de nutrition* conduisant au déplacement du ver, à l'ingestion de matière organique et d'agrégats de sol ;
— *le comportement de déjection* conduisant au déplacement du ver, au dépôt de turricule dans les cavités et à la réactivation localisée de l'activité microbienne.

Plus généralement, la conception du modèle SWORM a nécessité d'une part une réflexion interdisciplinaire s'intéressant à la description multi-échelles des sols et d'autre part au couplage multi-échelles de modèles [67] et à leur distribution [65].

MIRO, SWORM et les nombreux autres projets pluridisciplinaires (notamment en écologie [98, 102] et en épidémiologie [18, 88]) ont été les catalyseurs d'activités de mes recherches interdisciplinaires voire transdisciplinaires. Au fil des années elles se sont interconnectées pour former un ensemble cohérent portant sur la distribution du processus de modélisation-simulation. Dans la section suivante nous aborderons quelques unes de ces avancées avant d'aborder dans une dernière section les concepts de couplage servant de liant.

2 Le modèle et sa distribution au centre des préoccupations

L'activité de modélisation-simulation est un processus distribué autant au niveau humain qu'au niveau technique. D'une part, ce processus suit un échange de connaissances et compétences entre chercheurs et opérationnels afin de construire un objet commun : (le *modèle*). D'autre part, le modèle est quant à lui exécuté, exploré en utilisant des ressources de calcul haute performance.

Au travers de l'exemple du modèle SWORM et de l'approche APSF, nous verrons dans un premier temps comment placer le modèle au centre du processus de modélisation. Nous verrons ensuite comment favoriser l'échange scientifique par la participation et comment favoriser l'interaction par la distribution des simulations ou des plans d'expérience.

2.1 L'APSF, une modélisation pluridisciplinaire de l'espace sol

L'approche APSF (acronyme pour Arborescent PSF) est une adaptation de la structure PSF [87] pour les systèmes multi-agents. Il s'agit de définir une structure abstraite,

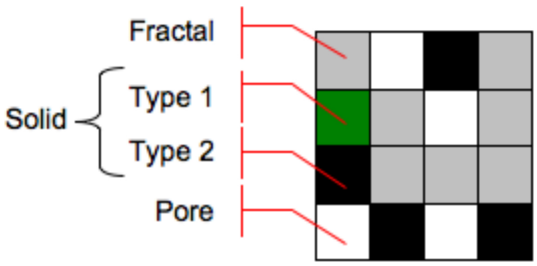


Figure 2.2 – un canevas APSF (Arborescente Pore Solid Fractal) – Ce canevas caractérise l'organisation des particules de sol à partir de données granulométriques.

multi-échelles qui permet la modélisation de sols réels, à partir de données de terrain. Ces derniers constituent l'environnement de systèmes multi-agents et sont alors supports de l'évolution d'agents qui modélisent les protagonistes du système étudié.

2.1.1 L'APSF, une approche multi-échelles pour décrire des sols hétérogènes

A l'image de la structure PSF, l'approche APSF décrit un espace réel par l'intermédiaire de cellules de trois types (cf figure 2.2) : (i) les pores, (ii) les solides et (iii) les cellules décomposables (fractales si nous suivons la terminologie PSF). Une distinction entre les catégories de particules solides peut néanmoins être établie, afin de différencier les particules solides minérales d'un sol (ex. sable, argile) des particules solides organiques (ex. débris végétal).

Par analogie avec l'approche PSF, les cellules de l'espace sont organisées au travers de motifs appelés *canevas*. Plusieurs canevas peuvent être établis donnant ainsi la possibilité de modéliser différentes organisations spatiales des particules, pour un même sol. Chaque canevas définit, alors, la structure d'un sous-espace pour une échelle donnée. L'association et l'organisation de l'ensemble des canevas permettent la description de la structure de l'espace étudié dans sa globalité.

Les canevas s'organisent entre eux selon un arbre (voir figure 2.3.a). Un canevas racine (noté C0) est défini et modélise la structure de l'espace à l'échelle la plus élevée (l'échelle 1). Les cellules décomposables de C0 sont associées aux sous-canevas C1 ou C2 et se décomposent selon l'un de ces 2 motifs. Toutes les cellules décomposables de C2 se subdivisent par le canevas C3. Le même principe est appliqué pour toutes les échelles suivantes : un canevas différent peut être attribué à chaque cellule décomposable. En suivant ce principe, l'arbre de canevas décrit dans la figure 2.3.a) modélise l'espace présenté par la figure 2.3.b). Les feuilles de l'arbre de canevas sont récursives si bien qu'elles permettent une décomposition fractale des sous-espaces qu'elles englobent.

La structure de l'arbre de canevas et la composition de chaque canevas sont choisies à partir de données de terrain afin de représenter le plus fidèlement possible le sol réel.

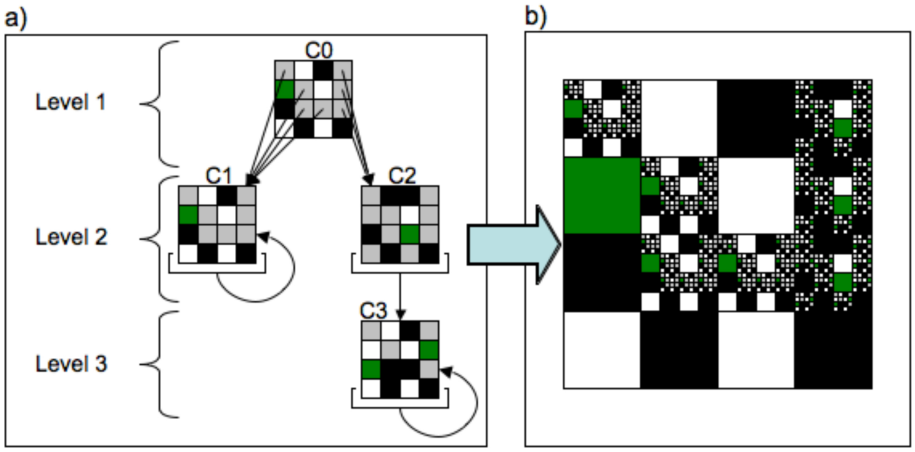


Figure 2.3 – Arbre de canevas APSF et l'environnement qu'il permet de construire – **a)** arbre de canevas qui organise 4 canevas sur 3 niveaux ; **b)** environnement virtuel créé.

	Particule	Taille	Données observées	Données simulées
Minéraux	Sable grossier	0,2–2cm	26%	26,28%
	Sable fin + limon grossier	0,002–0,2cm	12,82%	12,46%
	Limon fin	0,0002–0,002cm	2,04%	1,99%
	Argile	<0,0002cm	4,48%	4,44%
	Matière organique		1,98%	2,1%
	Porosité		52,68%	52,73%
	Masse volumique		$1,204 g/cm^3$	$1,2 g/cm^3$

Tableau 2.1 – Données granulométriques du sol de Lamto. Les données observées correspondent aux données réelles obtenues à partir d'une analyse en laboratoire ; les données simulées sont obtenues à partir du sol virtuel généré.

2.1.2 L'APSF face aux données de terrain

L'approche APSF a été utilisée, dans le cadre de projets pluridisciplinaires (comme Microbes – J. Chotte ou RIM – N. Marilleau) pour modéliser des structures variées de sols tels que des sols de savane (Lamto – Côte d'ivoire), des sols agro-pastoraux français et des sols contaminés (Technosol). Leur modélisation nécessite des données brutes de terrain, plus exactement des données granulométriques, telles qu'elles sont présentées, pour le sol de Lamto, dans la colonne *Données Observées* du tableau 2.1. Ces données présentent l'avantage d'être fréquemment manipulées en pédologie afin de qualifier les sols.

Afin d'illustrer nos propos, nous nous focaliserons sur la modélisation du sol de Lamto comme cela est proposé dans [17]. L'échantillon de ce sol représente un cube de 20 cm d'arête (soit un volume de 8 000 cm^3). L'espace étudié représente un sol sableux si bien que les particules qui le composent peuvent être considérées comme aléatoirement organisées.

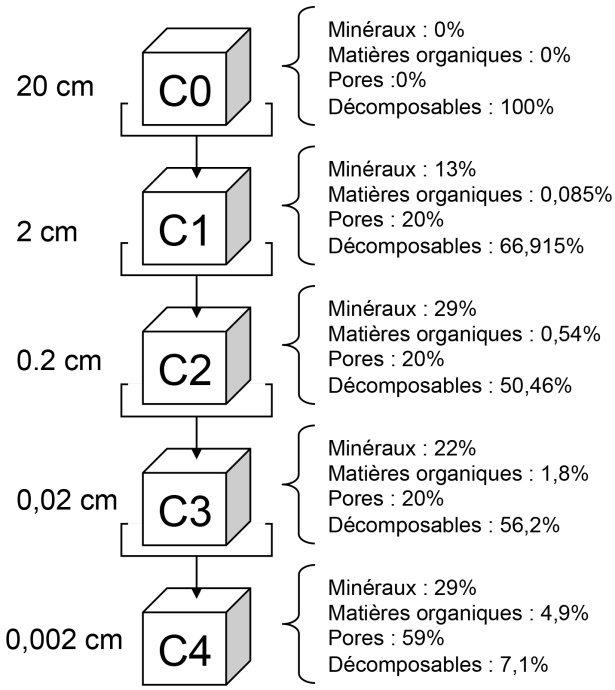


Figure 2.4 – Arbre de canevas APSF construit pour la modélisation du sol de Lamto (côte d'Ivoire).

A partir des données granulométriques, une analyse permet de construire un arbre de canevas tel qu'il est présenté par la figure 2.4. Cet arbre se compose de 5 canevas cubiques (10 cellules de côté soit 1 000 cellules/canevas). Etant sableux, le sol de Lamto est dépourvu de matière minérale ayant une taille strictement supérieure à 2 cm. Cela se traduit dans le modèle par un canevas C0 qui est uniquement constitué de cellules décomposables : ce canevas appliqué à l'échelle 20 cm est justement constitué de cellules de 2 cm. Par contre, aux échelles inférieures, le sol virtuel est composé de pores, de minéraux, de matières organiques et de cellules décomposables. Cela se traduit par des taux strictement supérieurs à 0 pour les paramètres des canevas C1, C2, C3 et C4.

D'autre part, la nature sableuse et homogène du sol de Lamto induit la construction d'un arbre formé d'un unique tronc. Toutes les cellules décomposables d'un canevas à un niveau donné suivent le même canevas et donc la même décomposition au niveau inférieur.

Cependant, les proportions de particules varient en fonction du niveau d'échelle (cf colonne *Données Observées* du tableau 2.1) ce qui induit des paramètres différents pour C1, C2, C3 et C4. Les paramètres des canevas sont aujourd'hui définis de manière empirique. Cependant, avec Sophie Leguédois (LSE – INRA de Nancy) notamment, nous réfléchissons à automatiser ce calibrage, en concevant une interface didactique permettant de saisir des informations granulométriques brutes et construire ainsi un sol virtuel. Les proportions de chaque canevas sont alors identifiées par une résolution inverse, une exploration dirigée par des outils statistiques notamment les lois de Dirichlet [71].

Après génération de l'arbre de canevas, il est possible de procéder à une validation du sol virtuel construit en comparant les données observées avec les données simulées (voir le tableau 2.1. Pour le sol de Lamto, on remarque une bonne représentativité du sol virtuel d'un point de vue texture. Ce sol virtuel offre un cadre encourageant pour modéliser et simuler les processus du sol, notamment l'effet bioturbant des vers de terre.

2.1.3 Discussion

Offrir la possibilité de décrire un espace réel au moyen d'un modèle qui associe, à la fois, une représentation désagrégée (à l'aide de canevas spécifiques), et agrégée (par des fractales) constitue une approche de modélisation conceptuellement intéressante. D'un point de vue pratique, cela se traduit par la création d'une multitude de canevas APSF pour la description fine et fidèle des zones de l'espace étudié dont la structure est connue. Les autres parties de l'espace sont, quant à elles, caractérisées au moyen d'un unique canevas qui se développe sous la forme d'un pseudo-fractale. Cette approche est particulièrement adaptée aux sciences du sol car, dans la plupart des cas, seules les structures macroscopiques des sols sont connues. L'approche APSF rend alors possible une description désagrégée des couches. Les autres sont, quant à elles, décrites aux moyens d'une fractale.

D'un point de vue informatique, l'arbre de canevas APSF constitue une structure abstraite, facilement implantable au sein d'un simulateur. De plus, il présente l'intérêt de pouvoir supporter une algorithmique de couplage afin de combiner les différents processus du sol.

Par ailleurs, la représentation arborescente proposée est simple et intelligible par des non informaticiens si bien qu'elle fait office de support de discussion entre le modélisateur et le thématicien. Un outil participatif de modélisation-simulation orienté sol se dessine, l'APSF en est le média support des échanges. C'est en partie pour cela qu'un groupe de travail pluridisciplinaire (IRD, INRA, Universités) s'est constitué autour de l'approche APSF sous mon impulsion notamment dans le cadre de la soumission du projet ANR ACIER dont j'étais l'initiateur et porteur. Des projets de recherches comme Camisoles (L Bernard, Biodiversité, 2015-2017) ont été déposés et sont financés ; des colloques et sessions de travail entretiennent la discussion.

2.2 La participation au profit de la modélisation-simulation

Les connaissances pour modéliser un système réel ne pouvant pas être détenues par une seule et même personne, il se forme naturellement des groupes pluridisciplinaires qui rassemblent chercheurs et opérationnels, autour d'un enjeu commun tout en maintenant des objectifs individuels. Cette évolution de la recherche s'est vue accélérée par les bailleurs de fonds qui incitent les déposants à construire des partenariats solides entre laboratoires et industriels.

Ainsi l'activité de modélisation-simulation est naturellement devenue un processus distribué où se confrontent des manières de penser, des concepts, des paradigmes, des formalismes afin d'aboutir à une production commune et à des résultats individuels [75]. L'ensemble se matérialise par de nouvelles connaissances sur le système étudié, de nouveaux résultats dans les disciplines représentées voire de nouveaux questionnements.

2.2.1 Le modèle, un objet partagé co-construit

Le modèle est un objet partagé, co-construit par l'ensemble des intervenants. Il peut être considéré comme média de discussion factorisant, via un langage unifié, les connaissances des participants à propos d'un système complexe. Dans l'approche ComMod (Companion Modeling) [41], le modèle est vu comme un objet jetable, presque sans lendemain, dont l'intérêt principal est la médiation voire la négociation entre les participants.

Cependant, le modèle est aussi un produit scientifique permettant de comprendre, prédire, planifier ou aider à la décision [8]. Dans ce cas, il s'agit alors d'un objet réutilisable, valorisable, disséminable avec une portée qui dépasse souvent celle imaginée par le groupe concepteur : hier SWORM n'était qu'un petit modèle développé par un groupe pluridisciplinaire (informaticiens et pédologues) constitué de 6 personnes ; aujourd'hui il rassemble un collectif plus large (informaticiens, pédologues, microbiologistes et mathématiciens) et devient un outil multi-échelles de description de la structure des sols pour le couplage spatio-temporel de modèles.

Le succès d'un modèle passe par son acceptation auprès du groupes de scientifiques (experts du domaine et modélisateurs) et auprès des utilisateurs finaux (opérationnels dans le cas d'un outil d'aide à la décision) [33]. Le modèle pensé collectivement, mais conceptualisé et implémenté individuellement (comme c'est le cas pour la première version du modèle MIRO [9]) souffre d'un manque de crédibilité auprès du groupe. Il est alors perçu comme une boîte noire *"maitrisée"* par trop peu d'individus. Les autres membres du groupe ne se sentent alors pas compétents pour l'utiliser et peuvent alors afficher le doute, un détachement voire une frustration.

Pour favoriser l'acceptation des modèles, les approches participatives apportent des solutions. *"Les approches participatives impliquent, de manière générale, le dialogue entre acteurs fondé sur le respect mutuel et la reconnaissance des savoirs de chacun"* [13].

Le modèle devient un objet accessible autour duquel la discussion est possible. Dans le projet MIRO^2, *SmartAccess* a justement été conçu dans cette perspective [12]. Imaginé et développé par un petit groupe d'informaticiens et de géographes, il a favorisé l'échange pluridisciplinaire sur la manière de modéliser les dynamiques intra-urbaines. Par la concertation, l'expérimentation et la visualisation/évaluation des résultats, il a permis de répondre à nombre de questions de modélisation (ex. *"Quel modèle de trafic doit-on choisir ?" Quels sont les indicateurs pertinents ?*). A partir de ce processus participatif à cycle "rapide" nous avons été en mesure d'implémenter, avec la plate-forme GAMA, un modèle descriptif, à l'échelle des villes de Grenoble et de Dijon [45].

Quand l'enjeu scientifique vise l'aide à la décision, les produits de la modélisation-simulation doivent avoir une réalité opérationnelle afin d'être acceptés des utilisateurs finaux. Pour cela, il semble important d'impliquer les acteurs de terrain dès les origines du processus de modélisation-simulation afin :

- *d'appréhender leurs attentes* et concevoir ainsi des outils d'aide à la décision adaptés ;
- *d'engranger de riches expériences* et connaissances sur le système réel qui permettront par exemple d'identifier des plans d'expérimentations pertinents.
- *de les sensibiliser* aux possibilités offertes par les techniques de modélisation-simulation afin d'éveiller leur curiosité et de les laisser imaginer des outils futurs ; et
- *de réduire la distance* entre l'outil d'aide à la décision et les opérationnels.

Le caractère plurisdisciplinaire et distribué du processus de modélisation-simulation est donc une richesse qui ouvre des perspectives scientifiques et opérationnelles qui sont par ailleurs inaccessibles. Il me semble important d'inciter cette pluridisciplinarité mais sans en abuser car elle est source d'incompréhension.

Les disciplines usent d'un vocabulaire scientifique différent voire antagoniste ce qui rend difficile, parfois ambiguë, les échanges aux interfaces. Par exemple, le mot *"patch"* symbolise, en géographie et en informatique, une cellule (carré, rectangle ou hexagone) avec des propriétés qui découpent un espace de manière régulière [11] ; en écologie il s'agit d'une zone de l'espace considérée homogène avec une forme irrégulière [72]. Comment est-il possible d'éviter ces écueils ?

La constitution de groupes de discussion est un premier point permettant de créer un langage unifié et d'avancer dans le projet. L'usage d'outils collaboratifs de modélisation est complémentaire et catalyse les échanges. Nous nous focaliserons sur ce point dans la suite de la section.

2.2.2 L'approche participative, un moyen de structurer l'échange pluridisciplinaire

L'approche participative est un moyen de mettre en lumière l'expérience des acteurs, et de magnifier leur savoir-faire par la concertation et répondre ainsi aux objectifs d'un projet. Pour cela, elle place le modèle au centre de la discussion afin de le manipuler (de manière individuelle ou collective), de canaliser les échanges entre acteurs et d'éliciter/structurer des connaissances parfois dissimulées. C'est pourquoi, le modèle se doit de traduire les points de vue de chaque acteur tout en apportant des éléments communs de discussion afin d'entremêler travail individuel et travail collectif.

Scénarisées sous la forme de jeux sérieux, ou simples discussions lors de réunion, les approches participatives impliquent les acteurs humains tout au long de l'étude d'un système complexe [13], notamment lors de :

- *la modélisation* – pour raffiner les enjeux de l'étude et produire un modèle [41] ;
- *la simulation* – pour identifier des scénarios à explorer plus finement [99] ; et

— *la collecte de données de terrain* – pour mener des enquêtes auprès des opérationnels et en extraire par le jeu des connaissances qui seraient difficiles à atteindre par des méthodes traditionnelles, [52].

Ainsi, ces techniques adressent tous les publics, de l'opérationnel au modélisateur confirmé et se matérialisent avec des formats divers et variés, du simple plateau de jeu cartonné (ex. *"What A Game"* [43]) au collecticiel web comme (Modeling Commons [2], netlogoWeb [3] ou PAMS [78, 79]), voir figure 2.5. Le format est choisi en tenant compte de :

— *la sensibilité des acteurs à l'outil informatique* – L'utilisation de moyen informatique peut être une difficulté majeure et donc un frein au bon déroulement des séances de discussion ;
— *la temporalité et la spatialité de la participation* – Selon [39] la collaboration est synchrone ou asynchrone et présentielle ou à distance ;
— *les contraintes techniques* – L'accès au réseau de l'Internet ou même à l'électricité n'est pas identique en tout point du globe ce qui rend parfois impossible l'utilisation d'ordinateurs ;
— *la complexité du modèle manipulé* – Entre un modèle de sensibilisation et un modèle d'aide à la décision, on observe une grande variabilité de la complexité du modèle manipulé si bien qu'à partir d'un certain seuil, l'outil informatique devient une nécessité.

Pour ce qui est du fond, il est défini au cas par cas selon le système complexe à modéliser. Il est néanmoins important de le considérer dans le choix du format. Un modèle trop complexe pourrait difficilement se matérialiser sur un plateau cartonné car une capacité de calcul est requise. L'utilisation d'un outil informatique pour la participation est alors conseillé.

2.2.3 Outils informatiques pour la participation

Historiquement, les plates-formes comme Cormas [21, 20], Netlogo [108], Repast [84] ou GAMA [37] sont des environnements *"standalone"* disponibles en téléchargement via leur site web respectif. Les utilisateurs conçoivent et développent alors leurs modèles agents en utilisant le langage de la plate-forme ou en s'appuyant sur des outils graphiques orientés agents tels que Repast-Eclipse IDE [83], GAMAGraM [101], PAML [27]. Ensuite, les utilisateurs partagent les modèles au groupe en utilisant différents canaux, comme les disques partagés, le mail ou les gestionnaires de version.

Avec le développement et la démocratisation des technologies de l'information, des portails communautaires comme OpenABM [4] ou ModelingCommons [5] ont vu le jour et permettent, entre autres choses : (i) de réunir, au sein d'une même "plate-forme", des chercheurs dispersés dans des laboratoires d'un même pays, voire sur des continents dif-

2. `http://modelingcommons.org`
3. `http://www.netlogoweb.org`
4. site web : `https://www.openabm.org`
5. site web :`http://modelingcommons.org`

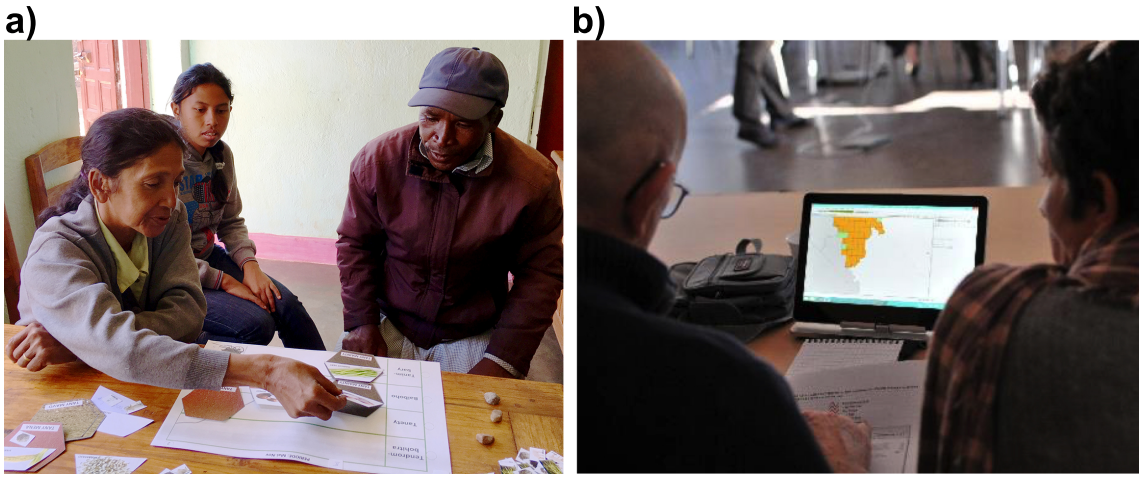


Figure 2.5 – Deux sessions de jeux sérieux, deux objectifs, deux technologies : a) session de jeu visant à recueillir des informations sur les pratiques agricoles auprès d'agriculteurs malgaches en vue d'alimenter un modèle à base d'agents (projet Camisole) ; b) session de jeu visant à sensibiliser les aménageurs et élus de la communauté de commune d'Oléron face aux effets de l'endiguement et du recul stratégique lors de phénomènes de submersions (projet LittoSim) [22].

férents ; (ii) de partager des modèles quel que soit leur emplacement ; (iii) de conserver la trace des versions successives. En d'autres termes, ils permettent une participation asynchrone et à distance.

Concrètement, grâce aux outils précédemment cités, il est possible de visualiser l'ensemble des modèles disponibles, d'en télécharger pour les modifier à sa guise, et de déposer les modifications sur le portail afin de les partager. Ici, nous embrassons le domaine de "l'e-science", problématique qui est aujourd'hui en pleine expansion dans le cadre de projets internationaux comme UniTwin [6].

Quid des environnements synchrones de simulation permettant de manipuler des modèles à distance ou dans un même lieu ? Il s'agit d'un point qui nous intéresse particulièrement dans nos recherches.

Proposer des outils participatifs pour une modélisation-simulation à distance L'arrivée des nouvelles normes du web notamment de HTML 5, des WebSocket et de JavaFx permet d'imaginer de nouvelles interfaces d'utilisation du modèle via un portail web comme le propose la plate-forme Netlogo (cf `http://www.netlogoweb.org/`). Grâce à elles, la participation synchrone et à distance est rendue possible lors du processus de modélisation-simulation.

La plate-forme PAMS (Plate-forme d'Aide à la Modélisation-Simulation) [78], financée par le programme Spirales de l'IRD et l'OIF (Office International pour la Francophonie

6. `http://cs-dc.org/CS-DC_UNESCO_UniTwin`

– 2007-2011) est une des premières initiatives menées dans le domaine de la simulation participative à distance. Ce collecticiel permet, à distance, via une interface web : (i) la manipulation et l'exécution participative de simulateurs développés avec les plates-formes Netlogo, Repast-J et GAMA, (ii) le partage des expérimentations et (iii) la capitalisation des résultats. PAMS est alors déployé sur un serveur web public ce qui rend l'outil accessible tout autour du globe, via un simple navigateur web.

PAMS combine des outils collaboratifs généralistes (vidéo-conférence, messagerie instantanée, etc) avec des outils collaboratifs spécifiques au domaine des systèmes complexes (ex. panneaux participatifs de contrôle des simulateurs, visualisation des résultats, etc). Il s'agit d'un système distribué basé sur une architecture JEE pouvant ainsi être déployé sur un cluster d'ordinateurs afin de supporter la charge de calcul.

Par la suite, PAMS s'est vu associer à une suite logicielle constituée de CoODD et CoUML, deux outils collaboratifs qui à distance et de manière synchrone, permettent respectivement la création de modèles ODD et de modèles UML [80]. CoUML a ensuite été remanié lors de la thèse de Sébastien Chipeaux [27] afin de concevoir et développer un outil web de création de modèles AML et de génération de code GAML. Ses travaux ont été appliqués à la modélisation urbaine dans le cadre du projet MIRO.

PAMS, CoODD et CoUML forment ainsi une suite cohérente d'outils participatifs de modélisation-simulation. Cependant, ces outils ont souffert de la perte de vitesse des technologies Flex et Flash. Ils ont néanmoins joué leurs rôles car ces projets furent riches en enseignements : l'usage d'architecture tel que PAMS est intéressant pour des groupes de travail déjà constitués et familiers des outils informatiques, mais il semble inadapté lors de séances présentielles de jeux sérieux ou de sensibilisation. En effet, l'outil est fortement contraint par les restrictions réseaux en vigueur dans les universités (ex. ports bloqués et débit réduit). L'utilisation devenant laborieuse, il est préférable d'utiliser des architectures de simulation participative locale et synchrone.

Proposer des outils informatiques participatifs pour une simulation présentielle Les approches participatives de simulation présentielles associent le virtuel et le réel en prolongeant modèles et simulateurs virtuels par une infrastructure réelle (salle, table, chaises, réseaux informatique, moyens de projection, papier et tableau). L'espace et son organisation sont savamment pensés autour du modèle afin de favoriser la réflexion individuelle, le travail collectif et la discussion.

Depuis leur création, Cormas et NetLogo s'intéressent aux approches de simulation participative et adoptent deux postures complémentaires. Cormas, assure une visualisation multi-points de vue des modèles grâce à une interface contextualisée et met ainsi l'accent sur la discussion. Netlogo propose HubNet, un moyen d'interconnecter plusieurs interfaces utilisateurs identiques pour une même simulation. Depuis peu, ces deux visions se rejoignent : les prémisses d'une visualisation multi-point de vue sont introduites dans Netlogo ; Cormas introduit, dans une de ses versions confidentielles, les primitives permettant la définition d'interfaces utilisateurs asymétriques connectées [14].

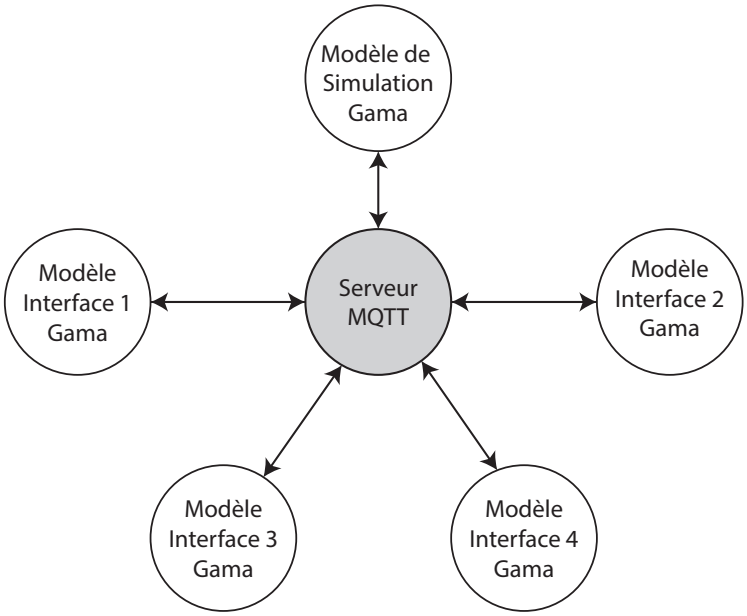


Figure 2.6 – Architecture d'un modèle de simulation GAMA connecté à 4 modèles d'interface utilisateur via le protocole MQTT.

L'outil informatique idéal pour la simulation participative présentielle semble alors être un environnement distribué qui se compose : (i) d'un simulateur qui reproduit la dynamique du système complexe étudié ; (ii) et d'interfaces utilisateurs distribuées et contextualisées qui traduisent le point de vue de chaque acteurs et des éléments communs de discussion. De plus, cet outil se doit d'être rapidement déployable sur un réseau *ad-hoc* sans configuration spécifique, et robuste face aux différentes pannes qui peuvent survenir (coupure de réseau, redémarrage des clients).

Forts de ces expériences, nous avons enrichi la plate-forme GAMA, d'une part, avec un ensemble d'instructions permettant à l'utilisateur d'interagir avec la simulation, et d'autre part avec un plugin (appelé *"Network"*) permettant d'interconnecter des modèles GAMA. Deux types de modèles sont alors nécessaires pour réaliser une simulation participative (voir figure 2.6) :

— *un modèle de simulation multi-agents* qui contient une représentation à base d'agents du système complexe étudié ;
— *des modèles d'interfaces utilisateurs* qui décrivent des points de vue différents sur la simulation multi-agent. Chacun d'eux détermine un ensemble d'actions possibles sur le modèle et un ensemble de visualisations.

Outre faciliter une simulation multi-point de vue, cette architecture ouvre de nombreuses perspectives, notamment la combinaison de modèles d'interfaces contrôlés par des acteurs humains avec des modèles d'interfaces qui sont gérés par agents. Les modèles d'interface étant des modèles à base d'agents, il est aisé de décrire, au moyen d'un agent, des comportements qui réaliseront des actions sur le modèle de simulation.

Afin de permettre les interactions réseau entre les simulations, nous nous reposons sur des technologies nouvelles qui diffèrent de l'approche Client-Serveur utilisée par Cormas

et Netlogo. Cette dernière est une technologie simple à mettre en place mais instable sur un réseau vacillant, ce qui entraine de multiple déconnexions lors des sessions de travail participatifs. Nous avons opté pour l'emploi du protocole MQTT (Message Queue Telemetry Transport), protocole télémétrique dédié au réseau à faible bande passante avec une qualité de service médiocre. Ainsi au centre de ce dispositif est déployé un serveur de messagerie MQTT comme ActiveMQ [7] ou RabbitMQ [8], middlewares qui ont fait leurs preuves en génie logiciel.

Cette infrastructure a été utilisée avec succès dans le cadre du projet LittoSim [22] lors d'une session de jeux sérieux avec la Communauté de Communes de l'Ile d'Oléron. Malgré la déconnexion de plusieurs clients et une panne du réseau wifi, la session de jeu ne fut pas interrompue.

Toutes ces expériences ont montré l'intérêt et l'importance de favoriser l'échange entre scientifiques et opérationnels. Ce dernier doit cependant être catalysé aux moyens d'outils soigneusement choisis afin d'éviter débordements et autres nuisances lors des discussions. Au regard de la littérature deux catégories d'outils participatifs se dessinent : (i) les outils présentiels utilisés lors de sessions de travail (sensibilisation, construction de scénarios) en un même lieu avec notamment des opérationnels ; (ii) les outils à distance utilisés par un public averti afin de concevoir, modifier et manipuler les modèles. Ces deux catégories conservent un lien privilégié avec le modèle et la simulation : le modèle est l'objet manipulé le plus souvent au travers de simulations interactives exécutées dans l'instant. L'utilisation des moyens de calcul haute performance est alors indispensable.

2.3 Distribuer les simulations spatialisées ou les plans d'expériences

Les modèles et les simulateurs reproduisent des phénomènes de plus en plus grands et complexes, avec une précision attendue qui s'affine. Dans ces conditions, les ressources requises pour une simulation s'accroissent pendant que le nombre d'exécutions nécessaires ne cesse d'augmenter. Par ailleurs, l'activité de simulation tient une place grandissante tout au long du processus de modélisation-simulation, ce qui impose un passage rapide d'une activité à l'autre, une interactivité en conséquence et l'usage massif des ressources de calcul.

Une vaste offre de moyens de calcul haute performance (HPC – High Performance Computing) est aujourd'hui disponible sur le réseau (grilles, clusters) et dans nos propres ordinateurs (CPUs –Central Processing Unit–, GPUs –Graphics Processing Unit–). Toutes ces ressources sont souvent sous-exploitées malgré leurs potentiels importants. Par exemple, utilisé astucieusement, un GPU (présent dans chacun de nos ordinateurs) permet d'obtenir un *speed up* de 50 et plus par rapport à une même exécution sur unité de calcul (coeur) d'un CPU [48, 56]. L'utilisation de ces ressources reste néanmoins confidentielle aux initiés car elle exige une technicité très spécifique [73].

7. site web :`http://activemq.apache.org`
8. site web :`https://www.rabbitmq.com`

Compte tenu du caractère pluridisciplinaire de la modélisation-simulation et du caractère dispendieux d'une étude complète d'un simulateur, la conception et le développement d'outils modélisation-simulation tirant profit des systèmes distribués s'avèrent un challenge d'actualité. Cela soulève un ensemble de verrous scientifiques et techniques dont la réponse gommerait la majorité des pré-requis nécessaires à leur utilisation. C'est justement dans cette perspective que s'inscrivent quelques recherches transdisciplinaires notamment celles autour d'OpenMole, de GAMA et d'algorithmes distribués spécifiques au monde de la simulation à base d'agents.

La distribution de l'exécution d'un simulateur est abordée dans la littérature sous deux angles : (i) distribuer le plan d'expérience sur un ensemble de coeurs (chaque simulation s'exécutant sur un et un seul coeur) ; (ii) distribuer une simulation sur plusieurs coeurs. Nous nous focaliserons sur ces deux points dans la suite de cette section.

2.3.1 Explorer un modèle en utilisant les moyens de calcul haute performance

L'étude des systèmes complexes tels que des systèmes écologiques ou urbains ne peut être dissociée d'une phase d'exploratoire [1] où modèles et simulateurs sont disséqués afin de comprendre, prévoir et décider. D'autre part, le crédit donné aux résultats d'une simulation dépend fortement de la confiance qui est accordée au simulateur, et donc de la qualité de sa validation.

Pour cela, pléthore de simulations sont nécessaires, ce qui est coûteux du point de vue des ressources mobilisées (temps de calcul, processeurs et mémoire) voire impossible compte tenu de la taille de l'espace des paramètres à étudier. Il est alors essentiel de réduire de manière significative le domaine à explorer.

Construire des algorithmes au cas par cas pour explorer des modèles complexes
Nombre d'algorithmes de recherche existent et proposent des stratégies ou des optimisations. Selon [23, 100, 59], ils s'organisent en 3 catégories :

- *Recherche locale (ex. HillClimbing, Recuit Simulé, Tabu Search, Pattern Search)* – A partir d'un jeu de paramètres de départ, cette stratégie vise à parcourir de proche en proche l'espace des paramètres tout en maximisant (ou minimisant) une fonction d'utilité.
- *Recherche globale (ex. algorithme génétique, Optimisation par essaims particulaires)* – Cette stratégie vise à couvrir la totalité de l'espace de recherche et déterminer par raffinement successif une solution optimale. Ces approches sont particulièrement performantes lorsque l'espace de recherche est multimodale.
- *Recherche par criblage (ex. Latin Hypercube Samling, DIviding RECTangle, Recherche Dichotomique)* – la recherche par criblage est une stratégie de recherche systématique visant à cribler l'espace des paramètres en vue de détecter des zones intéressantes.

L'une des particularités des simulateurs représentatifs de phénomènes réels, aussi appelés *simulateurs complexes*, est d'avoir un espace des paramètres dont la nature et la

forme est fonction : (i) des objectifs scientifiques ; (ii) de la nature des paramètres manipulés ; et (iii) du système complexe étudié. C'est pourquoi, la méthode d'exploration doit être choisie au cas par cas.

GRADEA, un outil distribué pour combiner des algorithmes d'exploration *"Le succès et l'efficacité d'une technique de résolution dépendent la plupart du temps d'un compromis entre l'exploration et l'exploitation"* [96], c'est-à-dire entre la recherche des zones intéressantes de l'espace de paramètres (exploration) et l'approfondissement des recherches dans les zones détectées (exploitation). Combiner différentes stratégies de recherche permet de tirer parti de chacune d'elles voire d'inhiber leurs lacunes afin d'obtenir un meilleur compromis entre exploration et exploitation.

De nombreux travaux proposent d'associer, par exemple, les algorithmes évolutionnaires avec d'autres approches comme DIRECT [58]. Leur association offre une cartographie de l'espace des paramètres [100, 23] et de mieux l'explorer ensuite.

Dans ce contexte, l'approche GRADEA, née de la collaboration entre l'UMMISCO et le DISC (Département d'Informatique des Système Complexe de l'Université de Franche-Comté), dans le cadre de la thèse de HO The Nhan, offre une architecture modulaire qui assure, à la demande, la combinaison de plusieurs algorithmes de recherche. Ainsi, les utilisateurs sont en mesure de définir simplement des stratégies personnalisées et adaptées à l'exploration de leurs simulateurs complexes, en s'appuyant sur des algorithmes existants.

Cette plate-forme repose sur une architecture originale à base d'agents qui s'organisent en deux espèces (figure 2.7) :

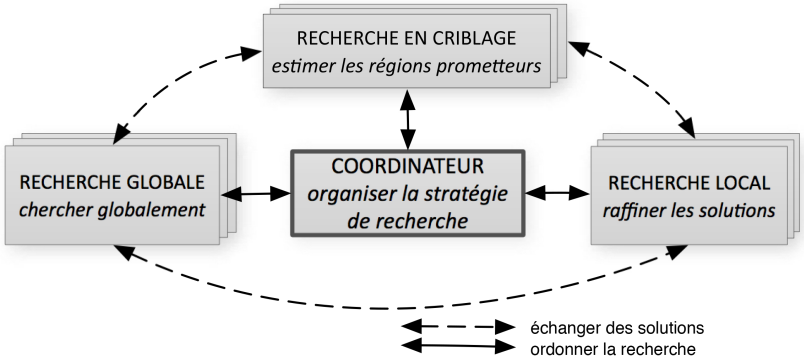


Figure 2.7 – Architecture de l'approche GRADEA. Figure extraite de [59].

— *les agents de recherche* – Ils analysent un espace (ou sous-espace) de paramètres selon un algorithme de recherche défini dans son comportement (ex. Monte-Carlo, évolutionnaire, etc) ;
— *l'agent coordinateur* – il conjugue, quant à lui, les différentes recherches en interagissant avec les *agents de recherche*. Pour cela il ordonne la réalisation de recherches, récupère et assemble les résultats (même partiels) pour ordonner de

nouvelles recherches ou présenter les résultats à l'utilisateur. C'est par la définition du comportement de cet agent que l'utilisateur explicite la stratégie de recherche.

A l'initialisation du système multi-agents GRADEA, les agents de recherche s'enregistrent auprès de l'agent coordinateur. Lorsque ce dernier reçoit une demande de recherche de la part d'un utilisateur, il suit son comportement préprogrammé qui l'amène, par exemple, à demander un criblage aux agents de recherche ayant cette capacité. Ces derniers identifient des simulations à réaliser, les soumettent aux clusters et attendent les premiers résultats. Les simulations s'exécutent en parallèle sur le cluster (1 simulation par coeur disponible). Dès qu'une simulation s'achève, une autre prend sa place sur le coeur. Les résultats de simulation sont alors envoyés à l'agent de recherche qui les retransmet à son tour à son agent de coordination. Ce dernier décide en fonction de ces nouveaux résultats partiels soit d'attendre d'autres résultats soit d'ordonner une nouvelle recherche avec une stratégie et ainsi de suite...

Distribuer les plans d'expériences Clusters et grilles se composent de coeurs à disposition et d'un gestionnaire de soumission qui va répartir les demandes de calcul sur les différents coeurs. Par exemple, le Mésocentre de calcul de l'Université de Franche-Comté [9] compte 1280 coeurs accessibles via le gestionnaire *Oracle Grid Engine* [10]. Le gestionnaire de soumission n'est autre qu'une file d'attente qui lance les calculs sur un ou plusieurs coeurs dès qu'il y a de la place.

C'est dans cette configuration où il n'est pas possible de déterminer à l'avance quand se terminera les simulations que l'architecture distribuée et adaptative de GRADEA prend tout son sens. Son fonctionnement permet d'accepter les contraintes d'utilisation des clusters et de profiter efficacement de la puissance de calcul disponible. En effet, même avec des résultats partiels, certaines simulations peuvent se voir annulées, d'autres créées et s'exécuter. Ainsi, des centaines de simulations peuvent s'exécuter en parallèle sur des centaines de coeurs (1 simulation par coeur), de manière désynchronisée. Dès qu'une simulation se termine, une autre prend sa place.

Il existe de nombreux gestionnaires de soumission comme SGE, LSF, PBS Pro et LoadLeveler [109]. Chaque gestionnaire possède son propre dictionnaire d'instructions. C'est la raison pour laquelle GRADEA n'accède pas directement aux gestionnaires de simulation. Il se repose sur un *middleware* permettant d'accéder de manière transparente, grâce à une interface unifiée, à différents gestionnaires de soumission et donc à différentes configurations de grilles et de clusters.

Pour des raisons historiques, GRADEA se repose sur la plate-forme EPIS [16] (Easy Parallel and Interactive Sworm) qui est le résultat d'une collaboration pluridisciplinaire (Modélisation, Système distribué et Sciences du Sol) entre UMMISCO (IRD/UPMC), le DISC (Université de Franche-Comté), le LIRMM (Université de Montpellier) et Eco&Sol (IRD/Université de Montpellier), formalisée par un projet financé par l'IRD (Nicolas

9. site web : `http://meso.univ-fcomte.fr`
10. tutorial : `http://star.mit.edu/cluster/docs/0.93.3/guides/sge.html`

Comportement	Taux d'utilisation CPU
Excréter	36.62%
Manger	25.96%
Chercher une cavité	24.30%
Chercher des aliments	12.82%

Tableau 2.2 – Taux d'utilisation CPU utilisé pour chaque comportement d'un agent ver de terre. Tableau extrait de [36].

Marilleau, Spirale 2011–2012). Mais l'offre a évolué si bien que des plates-formes comme OpenMole sont devenues particulièrement performantes, voire des références. Dans un avenir proche GRADEA s'appuiera alors sur ce type de Middleware.

2.3.2 Distribuer la simulation pour tirer parti des ressources de calcul disponible

Les avancées technologiques actuelles tendent vers le développement de processeurs multi-coeurs plutôt qu'une augmentation effrénée de la fréquence (loi de Moore), tel que nous avons pu le constater dans les années 2000. Aujourd'hui, un simple ordinateur de bureau est intrinsèquement un système distribué, constitué de plusieurs processeurs (CPU, GPU, parfois MIC – Many Integrated Core –). Ces processeurs sont eux-mêmes constitués d'unités de calcul "indépendantes", des coeurs (quelques uns pour un CPU à plusieurs milliers pour un GPU).

Compte tenu du tournant que prennent les développements technologiques, il est important d'en prendre acte et d'identifier des solutions informatiques qui profitent de ces nouvelles architectures. Nous en aborderons 2 principales adaptées au domaine de la modélisation-simulation : la distribution du calcul environnant ou la distribution de l'environnement et des agents.

Distribuer le calcul environnant Pour fonctionner, un simulateur exécute le modèle et un ensemble de fonctions annexes, souvent une interface graphique, des routines de gestion des cycles de vie du modèle ou des procédures de sauvegarde des résultats. Ces fonctionnalités annexes peuvent être considérées comme *environnantes* dans la mesure où elles n'interviennent pas dans le déroulé du modèle. Elles sont néanmoins nécessaires au bon fonctionnement du simulateur et à son accès par l'utilisateur au travers d'interfaces graphiques, de fichiers, etc.

Distribuer le calcul environnant revient à réaliser un *benchmark* d'un simulateur afin d'identifier ses goulots d'étranglement. Si ces derniers sont principalement générés par le modèle, une étude plus approfondie sur le modèle sera nécessaire pour le distribuer. Par contre, si des ralentissements apparaissent au niveau de l'interface ou de l'allocation mémoire, il devient aisé d'en extraire le code afin qu'il soit exécuté sur un ou plusieurs autre(s) coeur(s).

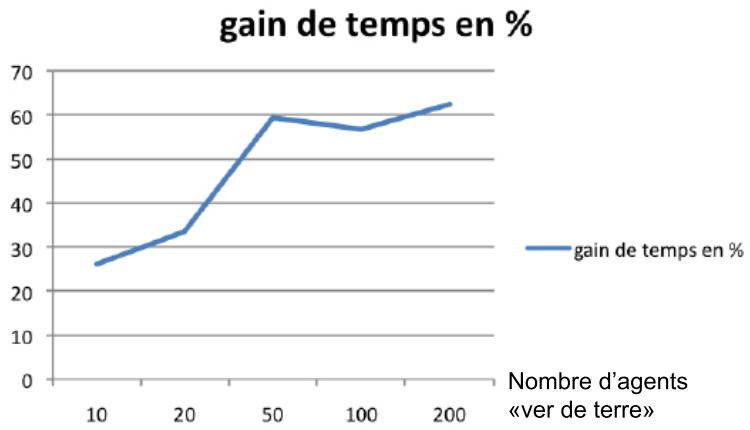


Figure 2.8 – Gain de temps après parallélisation des routines d'allocation/dés-allocation mémoire (figure extraite de [36]).

Par exemple, en étudiant le modèle SWORM (cf section 1.3.2 page 10), on s'aperçoit que près de 37% (voir tableau 2.2) du temps d'exécution des agents *vers de terre* est destiné au comportement "d'excrétion" des turricules et plus exactement à l'allocation mémoire des cellules fractales alors que ce comportement n'est activé que rarement [36]. Une simple extraction des routines d'allocation/dés-allocation mémoire suivi d'une migration de leur exécution vers un second coeur apporte un gain de performance substantiel (près de 60%, figure 2.8). Cette modeste initiative dans le domaine de l'informatique a permis d'en lancer de nouvelles visant à mieux utiliser les processeurs d'un ordinateur (CPU et GPU) [64].

Les plates-formes de simulations agents comme Netlogo ou GAMA s'appuient sur ce principe et profitent des nouvelles architectures parallèles de processeur pour distribuer le calcul environnant comme la gestion des interfaces utilisateurs ou des connexions aux données, aux réseaux. Le noyau de simulation (moteur d'exécution du modèle) reste, quant à lui, mono-coeur : tous les agents et l'environnement s'exécutent sur le même coeur. Cette approche présente l'avantage d'assurer simplement une intégrité d'exécution du modèle.

Le nombre de coeurs par processeur physique étant encore limité, cette méthode de distribution se prête bien aux configurations informatiques actuelles. Mais, on entrevoit d'ores et déjà les limites : les architectures devenant massivement parallèles, il devient urgent de développer des approches de parallélisation des modèles agents.

Distribuer l'environnement et les agents Les environnements distribuées de simulations agents comme Repast-HPC [29, 30], FLAME [26, 28], Rafale-SP [68] ou celle proposée par Alban Rousse *& al.*[94] déploient au contraire des noyaux multi-coeurs de simulation afin de pleinement profiter des ressources d'un ordinateur ou d'un ensemble d'ordinateurs en réseau. Pour cela, elles s'appuient sur des technologies éprouvées dans le domaine des systèmes distribués dont MPI (Message Passing Interface) ou OpenMP (Open Multi-Processing). La simulation ne s'exécute alors plus sur un unique coeur d'un

processeur mais est répartie sur un ensemble d'unités de calcul autonome, souvent physiquement éloignées (sur des ordinateurs différents). Ainsi le noyau de simulation se compose de plusieurs sous-noyaux inter-connectés voire hiérarchisés. Chacun d'eux exécute une partie du modèle (une partie de l'environnement et une partie des agents) et se synchronise avec les autres afin d'assurer l'intégrité de la simulation. Pour rendre transparente cette architecture distribuée complexe, une armada d'algorithmiques est nécessaire notamment pour : (i) la synchronisation de l'espace/temps [63, 54], (ii) la réplication des données (notamment de l'environnement) [94] ou (iii) la gestion des conflits [92].

L'utilisation de telles architectures distribuées facilite la scalabilité des modèles et permet un gain de performance notable (rapidité et mémoire). Mais elle reste à destination d'un public averti, ce qui dénote avec le caractère multidisciplinaire de l'activité de modélisation-simulation. En effet, distribuer un simulateur requiert des compétences à la fois en informatique et dans le domaine d'application :

— *des connaissances algorithmiques et matériels* sont nécessaires pour mieux tirer parti des ressources disponibles ;
— *des connaissances dans le domaine d'application* sont aussi importantes afin d'être en mesure de répartir judicieusement le calcul sur les ressources disponibles.

Une distribution inadaptée peut avoir des conséquences désastreuses sur les performances : même si le réseau d'un cluster (de type *"infinity band"*) est dédié, rapide et à faible latence, il n'en demeure pas moins un goulot d'étranglement. La nature complexe (au sens système complexe) des simulations multi-agents fait que les interactions (Agent-Agent ou Agent-Environnement) sont essentielles, prédominantes et imprévisibles. Mais, chaque agent interagit le plus souvent avec son voisinage proche (accointances localisées dans un espace géographique ou social). Ainsi, pour minimiser l'usage du réseau d'un cluster, il convient de mener une étude préalable, qui visera à identifier les poches d'interactions au moyen d'algorithmes informatiques ou simplement *"à dire d'expert"*. A titre d'illustration, dans le cadre de la modélisation-simulation des mobilités intra-urbaines, cela revient à :

— observer le trafic de la ville qui nous intéresse ;
— en déduire que les véhicules interagissent avec le tronçon sur lequel ils circulent et avec les autres véhicules localisés sur le même tronçon ;
— s'apercevoir que les véhicules situés sur un boulevard périphérique ont tendance à rester sur ce même boulevard à l'intersection suivante ;
— simuler tous les tronçons et véhicules du boulevard périphérique sur un même noeud de calcul.

2.3.3 Discussion

Par définition un système multi-agents est un système distribué. Pourtant, l'exécution d'un SMA sur des ordinateurs multi-coeurs, multi-processeurs est loin d'être trivial si bien que sa distribution nécessite un large panel de compétences aussi bien conceptuelles, techniques, qu'applicatives. Faut-il proposer aux différentes communautés scientifiques

des concepts et outils informatiques qui masquent cette technicité comme le propose Guillaume Laville dans MC-SMA [64] (Many Core et Système Multi-Agent) ? Faut-il, au contraire, proposer des méthodes et outils informatiques qui permettent aux communautés d'appréhender les techniques de distribution de simulateurs complexes comme le propose Emmanuel Hermellin & *al.* [57] ? Ce sont deux écoles avec une même finalité : faciliter l'accès aux ressources de calcul haute performance.

Dans le domaine de la simulation distribuée à base d'agents, l'expérience montre que la réponse se situe au centre des deux extrêmes précédemment cités. Masquer complètement la technicité conduit à des solutions informatiques très spécifiques voire figées. Le plus souvent, elles n'auront d'usage que celles pour lesquelles elles ont été créées car les utilisateurs potentiels seront souvent déçus de ne pouvoir ajouter simplement l'epsilon cher à leur cas d'étude. Mettre en avant les spécificités de la simulation distribuée à base d'agents, même de manière didactique par des méthodes et langages génériques peut, au contraire, surprendre, voire rebuter, les scientifiques des autres disciplines.

Plus généralement, le pivot central du processus de modélisation-simulation est le modèle. Il s'agit d'un composé faisant l'objet de toutes les attentions lors des discussions de groupe. Par itération successives, il se voit complété par des connaissances, des données et des sous-modèles et gagne ainsi en représentativité vis-à-vis de la question scientifique de départ. En contrepartie sa complexité est croissante si bien que l'usage de ressource de calcul haute performance devient une priorité. Dans un premier temps, l'usage des techniques d'exploration semble suffisant. Mais il est fondamental de garder à l'esprit cette mutation des architectures processeurs pour tendre vers la distribution des simulations. D'autre part, le modèle doit s'appuyer sur des concepts et des langages compris par l'ensemble des membres du groupe pluridisciplinaire. Comment allier le modèle, la participation et la distribution du calcul dans un processus cohérent ? L'usage des méthodes de couplage me semble être une bonne option.

3 Le couplage de modèles, une approche en devenir

Depuis que la modélisation existe, il est naturel d'assembler des modèles entre eux afin d'en construire de nouveaux, qui répondent aux attentes et aux nouveaux questionnements scientifiques. La création d'un modèle à partir de rien, devient aujourd'hui une exception, voire une approche déconseillée par la communauté.

Modélisateurs et thématiciens combinent alors des modèles à base d'équations, des système multi-agents, des automates cellulaires ou des modèles stochastiques. Ces assemblages sont *ad-hoc* : l'ensemble des modèles choisis sont redéveloppés dans un même langage, souvent sans tenir compte des règles les plus basiques (cohérence temporelle, cohérence spatiale ou le domaine de validité des modèles).

Les techniques et langages, de couplages (ex. DEVS [110], VLE [91], RECORDS [15], VSoil [11], HLA [5] ou FMI [19]) proposent justement des moyens conceptuels et des outils visant à combiner, dans un cadre "sécurisé" des modèles entre eux afin d'en produire de nouveaux, plus adaptés aux contextes et problématiques actuelles. On peut légitimement s'interroger sur les raisons empêchant une croissance plus importante de ces moyens.

Dans le cadre de la modélisation spatialisée, l'une des limitations majeures de ces outils se situe justement dans la description de l'espace. VSoil et Records ne semblent à ce jour pas appropriés pour, par exemple, décrire explicitement une hétérogénéité structurelle des sols ce qui rend difficile l'usage de ces plate-formes pour la modélisation de toute une gamme de processus spatialisé du sol.

Au cours de cette section, nous faisons un rapide tour d'horizon des techniques de couplage et des règles à suivre afin d'assurer la cohérence des temporelles et des données entre les modèles.

3.1 Couplage faible, fort ou intégratif

Le couplage n'impose pas une unicité dans les formalismes et représentations utilisés. Néanmoins, et a minima, des liens entre les modèles doivent exister : c'est ce que l'on appelle des *facteurs de couplage*. Ces connexions entre les modèles peuvent être :

- *directes* – les modèles décrivent des dynamiques différentes (épidémie, mobilité) mais reposent sur une description commune des entités du système (les même individus sont par exemple modélisés dans les modèles). Une ou plusieurs associations sont alors évidentes rendant le couplage naturel.
- *indirectes* – les modèles décrivent des dynamiques différentes (épidémie, mobilité) en maintenant leurs propres représentations des entités du système (individus/population par exemple). L'association entre les modèles n'est alors pas naturelle ; des fonctions de transformation doivent être mises en place.

Concernant le couplage à proprement parler, il existe trois principales approches pour le mettre en oeuvre :

- *couplage intégratif* – cette approche est la plus courante. Son principe est de transformer et combiner des modèles afin de construire un modèle plus grand. Des phases de conception, de développement et de validation importantes sont nécessaires pour la mise au point de tels modèles, qui impliquent une réflexion méthodologique préalable sur le couplage et sur la manière de combiner les modèles.
- *couplage faible* – cette approche est la plus simple. Elle consiste à exécuter les modèles en suivant un *workflow*. Les modèles échangent simplement leurs entrées/sorties (les sorties de l'un deviennent les entrées de l'autre) et conservent ainsi leur indépendance. Une limitation à cette approche se situe dans la concurrence, la temporalité et la spatialité des dynamiques car elles ne peuvent pas être prises en compte sans l'usage de procédés permettant le changement d'échelle.

11. Site web de la plate-forme :`https://www6.inra.fr/vsoil/`

— *couplage fort* – cette approche considère au contraire la concurrence, la temporalité et la spatialité des dynamiques comme un facteur déterminant de la dynamique du modèle. Les sous-modèles s'exécutent concurremment et partagent des données tout au long de la simulation. Des techniques de synchronisation des modèles doivent alors être mises en place, notamment pour assurer leur ancrage dans des "espace-temps" cohérents.

Le couplage intégratif et le couplage fort introduisent une interdépendance forte des modèles couplés. Elle doit être maîtrisée afin d'assurer la cohérence entre les modèles au moyen d'artifices algorithmiques et de techniques éprouvées.

3.2 Assurer la cohérence temporelle

Lors de la conception d'un modèle, le choix de l'échelle temporelle est un élément crucial qui intervient dès les premiers instants du processus de modélisation car il impacte l'ensemble des choix ultérieurs. Modifier la temporalité d'un modèle implique de reconsidérer la pertinence et la représentation de l'ensemble des dynamiques modélisées, ce qui amène le plus souvent à une reconstruction du modèle. Dans le contexte d'un couplage fort et faible, il est donc important de conserver la temporalité de chacun des modèles engagés. Il faut dans le cas contraire utiliser une approche intégrative.

Néanmoins, une question reste en suspend : *"Comment associer des modèles ayant des temporalités différentes sans pour autant les modifier ?* Pour cela, une temporalité fédérant les temporalités de chaque modèle doit être identifiée.

Une approche classique consiste à distinguer les modèles continus (par exemple, les modèles mathématiques à base d'équations différentielles ordinaires ou d'équations aux dérivées partielles) des modèles discrets (comme les chaînes de Markov, les automates cellulaires ou les systèmes multi-agents par exemple).

En effet, l'association de modèles continus est simple à réaliser car le langage des mathématiques offre de nombreux outils pour assurer la cohérence entre les modèles. Par contre, l'association avec des modèles discrets pose plus de problèmes. Dans ces modèles, le temps est découpé en unités temporelles atomiques sous trois formes :

— *le pas de temps fixe* – durée atomique représentative d'une durée réelle et séparant deux évaluations du modèle. Cette durée est choisie arbitrairement en tenant compte de la dynamique du modèle. Il s'agit de l'approche la plus utilisée dans les modèles à base d'agents.

— *le pas de temps variable* – durée atomique représentative d'une durée réelle variable. Cette durée est déterminée par le modèle en fonction de l'intensité de sa dynamique (plus la dynamique a un effet important sur le phénomène étudié, plus le pas de temps est court). Les méthodes de simulation numérique comme Runge Kutta reposent sur ce principe, des outils de couplage comme *"sol virtuel"* l'ont aussi adopté.

— *l'évènement* – action horodatée entraînant une nouvelle évaluation du modèle et son évolution. Ainsi les actions sont placées sur un chronogramme d'événements.

La simulation vise à dérouler ce chronogramme. Les approches de couplage comme DEVS [111], HLA [5] sont basées sur cette méthode.

Pour coupler des modèles, il est important de choisir une unité temporelle commune afin d'être en mesure de synchroniser leur exécution. Choisir la temporalité d'un modèle s'apparente ainsi à définir la fréquence d'échantillonnage d'un signal. Une échelle trop petite favorise la précision mais induit un surcoût (temps de calcul, complexité du modèle) voire des incohérences de modélisation (c'est donner une mesure à une précision inappropriée au regard de la précision des données disponibles). Au contraire, une échelle trop grande ne permet pas de discerner la dynamique du système. Le choix d'une échelle temporelle adaptée est de première importance car elle impacte fortement la suite.

La méthode la plus utilisée pour choisir cette échelle consiste à déterminer le plus grand pas de temps fixe multiple de l'ensemble des pas de temps des modèles couplés (le PGCD des pas de temps – Plus Grand Commun Diviseur). Cette approche est simple à mettre en place mais peut s'avérer coûteuse car tous les modèles sont évaluées à l'échelle de temps la plus fine induisant à périodicité exagérée d'exécution des modèles.

La deuxième approche (utilisée dans *VSoil*) vise à considérer un pas de temps variable. Un pas de temps par défaut est choisi en tenant compte de la dynamique du système. A proximité de l'exécution d'un modèle, le pas de temps est subdivisé en pas de temps plus petits afin de coïncider avec la temporalité du susdit modèle. Lorsque ce dernier est exécuté, le pas de temps retrouve sa périodicité normale.

Cependant, la méthode qui semble faire consensus par les plates-formes de couplage vise à considérer le pas de temps comme un événement périodique au même titre que les événements des modèles à événements discrets. Il devient alors naturel d'associer des modèles avec des temporalités différentes : pas de temps et événements sont rassemblés et s'entremêlent tout au long d'un même fil d'exécution symbolisant le temps d'une manière continue. L'exécution du modèle couplé se traduit donc par l'exécution successive d'une liste ordonnée d'événements datés et déroulant ainsi le temps de la simulation.

3.3 Assurer la cohérence des données

La cohérence des données est assurée par des techniques et des outils qu'implémentent les formalismes comme DEVS [111] et les plates-formes de couplage comme FMI [19], HLA [5], VLE [91] généralistes, ou dédiées comme Records [15] ou VSoil. Ces environnements de couplage caractérisent le modèle comme une boîte noire dotée de paramètres d'entrée et de sortie. Ces modèles sont interconnectés en s'appuyant sur des fonctions de transition qui se chargent du changement d'échelle des sorties d'un modèle vers les entrées du suivant, en assurant une cohérence temporelle des données.

Cette vision du couplage présente l'intérêt de décrire simplement les liens subsistant entre les modèles : le modèle ainsi construit s'apparente à un workflow cadencé par une horloge à événements discrets.

Dans le domaine de la modélisation des phénomènes spatialisés, ces approches affichent rapidement leurs limites. En effet, chaque modèle couplé utilise une représentation individuelle voir privée de son espace. La concurrence à la ressource spatiale est alors difficile à modéliser, pourtant elle est essentielle dans certains domaines notamment en sciences du sol. Ceci est, semble t-il, la conséquence des origines mathématiques et a-spatialisées de ces formalismes.

Depuis peu, une nouvelle vision prend le contre-pied des approches historiques en plaçant l'espace au centre du couplage. L'espace devient alors une zone privilégiée où s'opèrent des interactions entre les modèles amenant concurrences et stigmergies. Dans ce cadre, l'espace se doit d'être multi-échelles par l'utilisation d'une architecture dédiée, par exemple, holonique [54] ou pseudo-fractal [67], pour assurer la liaison spatiale entre des modèles évoluant à des échelles différentes.

Dans le domaine des dynamiques urbaines, l'approche a notamment été utilisée dans le cadre de la thèse d'Ines Hassoumi [53] afin de modéliser les phénomènes socio-économiques de croissance urbaine. La ville est souvent considérée comme un espace multi-échelles où s'opèrent des processus de différentes natures (croissance démographique, croissance économique, croissance du secteur public etc), mais disposant tous d'une emprunte spatiale (lieux d'habitation, localisation des services économiques et localisation des services universels). Il devient alors naturel de localiser ces processus dans un espace virtuel et multi-échelles représentatif de la ville. Ces processus sont alors en mesure d'interagir et de cohabiter, via l'espace, comme nous pouvons le voir dans les systèmes urbains.

Dans le domaine des sciences du sol, l'approche de couplage par l'espace prend tout son sens. Une description pseudo-fractale permettra non seulement de tenir compte du caractère tridimensionnel, multi-échelles, hétérogène que possède un sol, mais aussi de rapprocher des propriétés physiques (granulométrie, densité apparente, etc) des sols. Les modèles à coupler, représentatifs des processus écosystémiques (dégradation de la matière organique, bioturbation, etc) sont alors naturellement localisés dans ce monde virtuel et sont en mesure d'interagir à l'image de ce qui se passe dans la nature.

4 Conclusion

L'activité modélisation-simulation d'un système complexe est naturellement un processus distribué où se confrontent des manières de penser, des concepts, des paradigmes, des formalismes afin d'aboutir à la co-construction de modèles communs. Ainsi le petit modèle, presque jetable, conçu et développé au cas par cas à partir de "rien", laisse place à des modèles d'un nouveau genre : des modèles à grandes échelles, voire des outils d'aide à la décision, construits comme un LEGO par un emboitement savamment orchestré d'autres modèles qui reposent sur des paradigmes et des formalismes variés. C'est pourquoi capitalisation et couplage multi-échelles tendent à devenir un standard plutôt qu'une démarche innovante. D'ailleurs, il s'agit d'une évolution à laquelle à fait face, il

y a quelques années, le génie logiciel par la création de normes pour le développement d'applications distribuées et mobiles.

Les techniques de couplage et les systèmes multi-agents sont des instruments de modélisation prometteurs. Leur versatilité permet de combiner des modèles très différents dans leur concept, leur formalisme et leur fonctionnement. La majorité des approches actuelles (VLE, RECORD, VSoil) s'appuie sur un couplage par les entrées/sorties des modèles. Lors de la modélisation de phénomènes spatialisés, l'espace, les interactions spatiales et la concurrence spatiale sont importantes dans la dynamique observée. Un couplage par l'espace semble s'imposer dans ce cadre.

Ainsi, nous voyons se dessiner petit à petit une approche où se place, au centre, une représentation descriptive et multi-échelle de l'espace qui est choisi en harmonie avec le domaine d'application. Autour gravite le couplage avec ses outils de modélisation-simulation, son algorithmique et ses ressources de calcul. Par ces nouveaux concepts, ces outils et l'approche participative, nous souhaitons faire tomber la frontière entre le modèle et l'expert du domaine pour tendre vers l'aide à la décision.

Chapitre 3

Démocratiser le processus de modélisation-simulation

L'évolution des programmes affichés par les écoles chercheurs tel que MAPS [1], MISS-ABMS [2], JTD (Journée de Tam Dao) [3] montre une progression notable des compétences en modélisation dans nombre de disciplines. Il devient aujourd'hui tout à fait possible pour un thématicien d'étudier un système complexe par le modèle pour le modèle. Le thématicien n'est alors plus simplement expert du domaine, auditeur et force de conseils, il s'improvise modélisateur, partie prenant de la conception et du développement du modèle.

Démocratiser le processus de modélisation-simulation afin de tendre, *in fine*, vers l'aide à la décision est aujourd'hui une réalité. Mais pour cela, il est urgent d'actualiser le regard que nous portons sur le processus de modélisation-simulation et les outils dédiés afin de mieux accompagner ces nouveaux modélisateurs.

L'une des particularités première du processus de modélisation-simulation des systèmes complexes se situe dans la singularité de son déroulé. Si l'on peut espérer pouvoir s'inspirer des outils issus du génie logiciel collaboratif (collecticiels) pour concevoir des outils de modélisation et simulation, il faut cependant souligner les particularités des systèmes complexes, qui font que leur conception diffère du génie logiciel distribué "classique" sur plusieurs points majeurs [103] : la variabilité de la démarche de modélisation, la complexité des systèmes, la richesse des points de vue et des compétences modélisées, et la validation des modèles.

Le projet que j'initie introduit une approche nouvelle favorisant la participation des chercheurs et opérationnels tout au long du processus de modélisation-simulation. Les modèles ne sont plus simplement le résultat d'un travail de recherche mis à la disposition de l'ensemble de la communauté (par exemple dans des répertoires partagés), ils deviennent les supports concrets autour desquels le travail pluridisciplinaire s'organise. En d'autres

1. site web :`http://maps.hypotheses.org`
2. site web :`http://www.agropolis.org/miss-abms/`
3. `http://www.tamdaoconf.com`

termes, il s'agit de proposer un environnement conceptuel et logiciel permettant de rapprocher chercheurs et opérationnels autour du modèle. Nous l'appellerons *"COMODOS"* (COllaborative MODeling for cOmplex Systems) car ce projet fait suite à une idée lancée avec Jean-Daniel Kant (Lip6) en 2012 dans le cadre de l'appel à *DIGITEO*.

L'espace, la participation, le couplage et le calcul haute performance seront au coeur du dispositif. Je pense que la représentation multi-échelles de la structure d'un espace réel constitue une première base solide pour entamer par le couplage de sous-modèles une discussion et la co-construction d'un modèle spatialisé. Les simulations à grande échelle permettent alors de rendre compte de la qualité du modèle (tests individuels ou exploration), et d'évaluer des scénarios avec une réalité opérationnels.

L'environnement envisagé distingue alors deux modes de participation : (i) la participation pour l'aide à la décision en se reposant sur le jeu sérieux afin de construire des scénarios pertinents à explorer ensuite (ii) la participation pour la conception du modèle, sa validation, son exploration ou l'optimisation des scénarios identifiés.

Ce projet ambitieux n'est autre que la continuité de travaux actuels disséminés (ex. GAMA, OpenMole, PAMS...). Il vise à les fédérer et les interconnecter afin de former un ensemble cohérent. Pour cela, il est important de porter une réflexion sur cette vision de la modélisation-simulation par la participation et le couplage. Nous aborderons les pistes de recherche à suivre. Finalement nous verrons comment cette action s'inscrit dans le cadre de projets labellisés.

1 Repenser la modélisation-simulation pour tendre vers l'aide à la décision

Tendre vers l'outil d'aide à la décision, c'est se rapprocher de l'opérationnalité, de la temporalité et des données de terrain afin que l'outil donne des résultats utiles et intéressants en un temps acceptable. Dans ce cadre, les modèles KISS, presque autosuffisants, laissent naturellement la place à des modèles descriptifs (KIDS) qui s'expriment quant à eux dans un écosystème de ressources externes (modèles, données d'enquêtes, données de capteurs et moyens de calculs).

Néanmoins, pour rester intelligible et accessible par tous et à tout moment, le modèle doit rester au centre des discussions et au centre de l'espace de travail. Le couplage et l'environnement participatif de modélisation-simulation sont les solutions que nous privilégierons. Nous les abordons dans un premier et deuxième temps. L'environnement participatif imaginé est un outil interconnecté à un réseau de plates-formes. Nous détaillerons ce point en dernier lieu.

1.1 Vers une centralité du modèle par le couplage

Le modèle n'est plus un objet monolithique mais un système distribué qui se compose d'un ensemble de sous-modèles conçus conjointement ou séparément par des thématiciens et informaticiens modélisateurs, selon un processus qui émerge de la participation. L'activité de modélisation nécessite alors l'utilisation de formalismes et d'outils reposant sur des concepts, qui pour certains sont disciplinaires, et génériques pour les autres, afin d'assurer la convergence des idées et des points de vue.

Placer la représentation de l'espace au centre de la discussion est la position que nous défendons car (i) l'espace est d'une part commun et reconnu par tous les membres du groupe ; et d'autre part, son existence est corroborée par des données de terrain (SIG, granulométrie, capteurs).

L'usage des techniques de couplage de modèles (cf section 3 du chapitre précédent page 29) est aussi parfaitement indiquée car elles conservent une proximité en réutilisant modèles, concepts et vocabulaires de la thématique tout en préservant une généricité gage d'ouverture et d'interopérabilité. Je souhaite prendre le contre-pied des environnements de couplage (comme VLE, Records ou VSoil) en proposant : (i) une approche de couplage centrée sur l'espace car nous pensons que nombre des interactions entre les processus d'un système complexe utilisent l'espace comme support d'échange ; (ii) une approche environnée par des outils de participations afin de faciliter l'accès au modèle, à la simulation et au résultat.

Les modèles descriptifs, surtout lorsqu'ils tendent vers l'outil d'aide à la décision, s'appuient massivement sur des données de terrain issues d'enquêtes ou de capteurs. Ces modèles connaissent une complexité croissante avec, *in fine*, l'allongement des temps de simulation. L'utilisation de moyens de calcul haute performance s'avère de première importance afin de distribuer chaque simulation ou chaque plan d'expériences. Mais l'usage de ces ressources requiert l'utilisation de techniques informatiques spécialisées. Démocratiser l'activité de modélisation-simulation, c'est aussi rendre transparent l'accès à ces ressources et les intégrer nativement dans le modèle.

Ainsi, l'usage des techniques de couplage de modèles jumelés aux techniques participatives tels qu'elles sont abordées dans la section 2.2.3 du chapitre précédent page 18 est une approche innovante qu'il semble intéressant d'explorer afin de favoriser la centralité des modèles dans le processus de modélisation-simulation. Elles doivent néanmoins se voir compléter par des avancées majeures en informatique pour introduire nativement les données de terrain et le calcul haute performance.

1.2 COMODOS, un environnement participatif de modélisation-simulation à grande échelle

L'environnement participatif envisagé est un collectiel qui allie des fonctionnalités collaboratives usuelles (tableau blanc, messagerie instantanée, forums, répertoires partagés,

etc.) à de nouvelles, spécifiques au domaine des système complexe, permettant ainsi la conception et la manipulation participative de modèles et de simulateurs.

La participation étant soit à distance soit présentielle (cf section 2.2.2 du chapitre précédent, page 17), COMODOS se présente naturellement sous la forme d'un environnement web dans le cas d'interaction à distance ou d'une application *standalone* pour les échanges présentiels. Cet outil adresse ainsi deux groupes d'utilisateurs :

— *le groupe de conception* – conçoit et teste successivement les différentes versions du modèle produit. Les membres de ce groupe sont habitués à travailler ensemble et se retrouvent régulièrement afin de contribuer au projet. Dans ce cadre, l'utilisation des technologies du web s'avère un atout afin de réduire la distance géographique entre les participants et maintenir un rythme de travail avec des sessions régulières.

— *le groupe d'aide à la décision* – manipule et explore un modèle déterminé lors de sessions de jeux sérieux afin d'identifier des politiques d'aide à la décision. Il s'agit de scénarios pertinents à explorer et à optimiser ensuite. Dans ce cadre, les sessions de travail sont réalisées en présentiel ; une application en réseaux, installée sur des ordinateurs ou tablettes est une solution adaptée.

1.2.1 Groupe de conceptions

Pour le groupe de conception, il s'agira d'un outil didactique qui leur permettra de construire collectivement des modèles spatialisés (voir le scénario 1, figure 3.1) en paramétrant, dans un premier temps, un monde virtuel multi-échelles représentatif de l'espace réel et en spatialisant, dans un second temps, des sous-modèles (existants ou à concevoir). Par simulation, les utilisateurs seront en mesure d'utiliser et d'évaluer le produit de ce travail. Afin d'assurer une validation continue des différentes versions du modèle, un cycle "rapide" entre les activités de conception et de simulation est possible grâce à l'interactivité de l'interface et aux ressources de calcul disponibles. Des outils d'exploration seront aussi disponibles afin de tester à plus grande échelle le modèle et produire ainsi des résultats (voir le deuxième scénario, figure 3.2).

1.2.2 Groupe d'aide à la décision

Pour le groupe d'aide à la décision, il s'agira d'un outil participatif qui permet de manipuler une même simulation grâce à des interfaces asymétriques, c'est à dire des interfaces différentes affichées sur plusieurs terminaux. Lors des sessions de travail, notamment lors de jeux sérieux (voir figure 3.3), chaque membre du groupe a accès à une interface qui détermine un point de vue sur la simulation et un ensemble d'actions possibles. Cette configuration logicielle et matérielle favorise la concertation, la confrontation des idées, l'explication des choix, mais surtout l'identification de scénarios intéressants. Ces derniers aideront à la décision dès que le groupe de conception achèvera l'optimisation. (cf scénario 2 – figure 3.2).

Messieurs X et Y, chercheurs en écologie, respectivement localisés à Bondy et à Hanoi, souhaitent concevoir ensemble un modèle visant à reproduire le cycle de la matière organique (MO) pour un sol agricole de Madagascar. M. X se connecte alors à la plate-forme web et accède à l'interface de création de modèles. Dans cette interface, trois domaines d'utilisation apparaissent : les sciences du sol, l'halieutique et la géographie. M. X choisit naturellement "sciences du sol" et nomme son modèle "Camisole". Une interface de configuration de structure APSF s'affiche, M. X renseigne le tri granulométrique du sol modélisé à partir des données d'échantillonnage prélevé sur le terrain. Il apparait à l'écran un arbre de canevas APSF. M. X décide d'inviter M. Y pour l'aider dans son travail de modélisation. M. Y se connecte à son tour, lance une visioconférence et s'aperçoit qu'une simulation est déjà en train de s'exécuter. En effet, M. X a couplé à son sol virtuel un modèle de bioturbation à base d'agents récupéré dans la bibliothèque de modèles. En ce moment même, il est en train de tester ce couplage. M. X satisfait du couplage arrête la simulation, affiche la perspective de modélisation et explique à M. Y ce qu'il a fait en utilisant le pointeur de la souris.
M. Y décide de modéliser l'activité microbienne (assurant la décomposition de la MO) pendant que M. X choisit de représenter sur le même modèle les protozoaires qui rendent la MO décomposée assimilable pour les plantes.
M. Y est microbiologiste et connait le modèle qui répondra à ses besoins. Cependant, ce modèle n'existe pas dans la plate-forme et M. Y ne sait pas comment l'ajouter car il n'a aucune compétence en mathématiques. Aux canevas correspondant à l'échelle spatiale de l'activité microbienne, M. Y ajoute un modèle fantôme qu'il documente par des entrées, des sorties, une description du processus en utilisant le format ODD [50]. En même temps, il contacte M. Z mathématicien expérimenté et convient avec lui d'une séance de travail.
Pendant que M. Y tentait d'ajouter un modèle, M. X a choisi de coupler un modèle proie-prédateur pour modéliser la dynamique des protozoaires (les proies étant les microbes ; les prédateurs étant les protozoaires). Lors de l'ajout du modèle, M. X. s'aperçoit que deux implémentations du modèle existent, un CPU et une GPU. M. X. choisi le CPU car il sait que sa carte graphique est vieillissante. Il a aussi peur de la portabilité. Ensuite, il teste son ajout en réalisant une simulation. Insatisfait, il modifie les coefficients du modèle proie-prédateur et teste de nouveau mais ne comprend toujours pas ce qu'il se passe *"certainement un problème de coefficient"*. Il convient alors d'un rendez-vous avec M. K qui est expert en dynamique de population...

Figure 3.1 – Scénario 1 – création d'un modèle multi-échelles représentant le cycle de décomposition de la matière organique dans un sol agricole de Madagascar.

Messieurs X et Y, chercheurs en écologie, respectivement localisés à Bondy et à Hanoi, souhaitent réaliser quelques simulations dont les résultats vont illustrer une présentation qu'ils écrivent en commun pour des opérationnels. Les deux chercheurs se connectent sur le site web du projet et lancent ensemble une discussion privée. M. X charge le modèle *Camisole*, et propose à M. Y. de partager son interface. M. X commence à saisir des paramètres de simulation, qui ne conviennent pas à M. Y, lequel démarre une session de visioconférence pour faire part à M. X de sa surprise. Après discussion, les deux tombent d'accord sur une sélection de paramètres. M. X et M. Y décident alors de l'optimiser. Ils saisissent au moyen de l'interface d'exploration, la valeur des paramètres choisis, et la fonction d'utilité à optimiser. M. X lance l'optimisation en cliquant sur le bouton "explore". Le modèle et le plan d'expérience sont alors transmis au cluster. Ne pouvant obtenir les résultats dans l'instant, M. X et M. Y fixent un nouveau rendez-vous et se déconnectent.
Quelques heures se sont écoulées, M. X est averti par mail que des résultats sont déjà disponibles. Impatient, M. X se connecte sur le portail et s'aperçoit que 123 simulations sont déjà terminées. M. X réalise alors une pré-analyse des résultats et en fait part à M. Y par mail...

Figure 3.2 – Scénario 2 – Optimisation d'une sélection de paramètres par l'utilisation du HPC.

Les interfaces proposées aux membres du groupe d'aide à la décision se doivent d'être simples, didactiques et explicatives. Leurs contenus sont déterminés et enrichis pour répondre aux enjeux de la session de travail, et pour être en accord avec la fonction, le domaine d'activité et l'expérience des membres du groupe.

1.3 Interconnecter des outils existant et profiter de leurs avancées

Un vaste panel d'outils complémentaires existent aujourd'hui dans le domaine des systèmes complexes (ex. CORMAS, GAMA, GRADEA, MCSMA, OpenMole, Pams, R). Chacun d'eux s'inscrit dans une partie de l'activité de modélisation-simulation spatialisée mais l'ensemble recouvre la quasi totalité des besoins du processus. Dans ce contexte, il est préférable de combiner des outils existants plutôt que d'en créer un de toute pièce.

Ce projet ambitieux n'est autre que la continuité de mes travaux actuels. Il s'agira de combiner trois orientations scientifiques dans les systèmes distribués (la participation –section 2.2– , la modélisation-simulation –section 2.1– et le calcul intensif –section 2.3–) afin de concrétiser un ensemble cohérent. La plate-forme finale profitera ainsi d'un formidable réseau en partie structuré dans le groupe RNSC-Simtools.

Ainsi, l'environnement COMODOS s'apparente à un réseau d'outils interconnectés avec en son centre la plate-forme de modélisation-simulation GAMA. En effet, la plate-forme GAMA se présente naturellement comme le pivot de la proposition COMODOS. Outre le cadre institutionnel, ce choix pour GAMA est motivé par :

Messieurs X et O, chercheurs respectivement en écologie et en informatique, localisés à Bondy et à Dakar, souhaitent organiser une session de sensibilisation auprès d'opérationnels en vue de promouvoir le modèle Camisole. Via l'interface du portail web, M. X fait une extraction de Camisole et obtient un fichier compressé contenant l'ensemble des sources (Gaml) et les données nécessaires. M X. teste le modèle télécharger en utilisant la version de GAMA installé sur son ordinateur. Tout va bien, le modèle fonctionne. M. X convient alors avec M. O d'un rendez-vous pour définir des interfaces.
Quelques semaines plus tard, les interfaces sont développées sous GAMA et le jeu sérieux est calibré. Un groupe d'opérationnels est alors convié à participer. La session de jeu peut alors débuter. . .Au fil du jeu, M. X et O voient se dessiner une politique environnementale qui leur semble intéressante. Il décide de l'étudier sur le champ. Il profite alors de leur connexion mobile 3G, des nouvelles fonctionnalités de GAMA pour déployer rapidement et simplement un plan d'expériences sur un cluster. Le jeu se poursuit alors. . .Avant la fin du jeu, les simulations sont terminées pour la plupart. M. O construit dans l'urgence une mini présentation pendant que M. X commence un débriefing. M. O présente alors les résultats. Un opérationnel intervient alors énumérant les avantage et inconvénient de la solution proposé. M. X. continue le débreifing et présente la politique imaginée lors du jeu. Les opérationnels interviennent et proposent alors des améliorations. Il est déjà tard, la scéance de travail s'achève. . ..
Arrivé dans leur laboratoire respectif M. X et O se connectent à la plateforme web et décident d'explorer les scénarios identifiés par les opérationnels. Pour cela, ils importent les données acquises lors de la session de jeu. Chargement terminé, les politiques sont modifiées à la marge afin de tenir compte des remarques des opérationnels. Les plans d'expériences sont déployés sur le cluster, exécutés massivement et analysés à l'obtention des résultats.
15 jours se sont écoulés. Une deuxième réunion avec les opérationnels tient place. Les résultats de l'exploration sont présentés, les politiques imaginée par les opérationnels ont été optimisées et convainquent. . .

Figure 3.3 – Scénario 3 – Jeux sérieux pour établir des politiques d'aide à la décision.

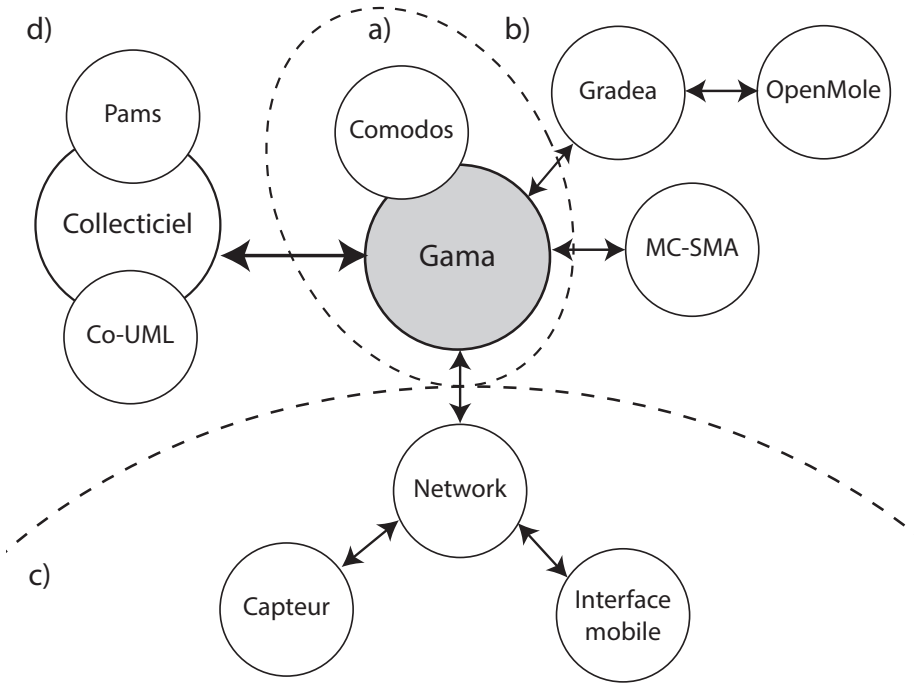


Figure 3.4 – Architecture de l'environnement Comodos

— *sa proximité aux données* – GAMA est un environnement de simulation agent qui présente l'avantage d'intégrer nativement des instructions dédiées à l'importation et la manipulation de données de terrain (Système d'Information Géographique, Modèle Numérique de Terrain, CSV) ;
— *son caractère pluridisciplinaire* – GAMA est utilisé dans le cadre de nombreux projets pluridisciplinaires. Cela est permis grâce à un langage didactique globalement utilisable par les experts du domaine ce qui facilite la pluridisciplinarité. Par ailleurs des outils de modélisation graphique comme GamaGram [101], PAML [27] visent à rendre plus accessible la plate-forme.
— *son extensibilité* – Un système de plugins rend possible l'ajout de nouvelles fonctionnalités, notamment des ponts vers d'autres plates-formes.
— *ses performances* – Cette plate-forme présente des performances tout à fait honorables au regard de celles affichées par Netlogo ou Repast. D'autre part, elle est déployable sur des clusters ou des grilles et profite ainsi d'importantes ressources de calcul.

Le réseau d'outils que je propose s'organise en 4 groupes (voir figure 3.4) :

1. *le noyau de simulation* – la plate-forme GAMA enrichie par un plugin dédié au couplage spatialisé de modèles constitue le moteur de modélisation et de simulation.
2. *les accès au calcul haute performance* – Ce groupe s'appuie sur GRADEA et OpenMole afin de faciliter et d'accélérer l'exploration des modèles en profitant d'une algorithmique dédiée et de ressources de calcul haute performance. GRADEA est alors en charge des plans d'expériences optimisés. Ces derniers sont ensuite in-

terprétés par OpenMole qui distribue les simulations sur des clusters ou grilles dédiés. L'accès au calcul haute performance s'exprime aussi par la distribution du simulateur en lui même. Pour cela, les avancées introduites par MC-SMA (Many Cores et Système Multi-agents) seront d'un intérêt majeur.

3. *Participation présentielle et objets connectés* – Grâce au plugin "Network", il est possible de connecter, via le réseau, des objets aux agents de la simulation. Lors de simulation participative avec des opérationnels, il sera ainsi possible de déployer rapidement des interfaces utilisateurs sur des terminaux connectés à un réseau local. Ces interfaces donneront des points de vue et des contrôles différents sur les agents de la simulation. Par ailleurs, ce plugin s'avère intéressant pour obtenir des données de capteurs en temps réel.
4. *Participation distancielle* – Il s'agit d'une plate-forme web regroupant à la fois outils collaboratifs généralistes (visio conférence, messagerie, etc) et outils participatifs de modélisation-simulation comme CoUML qui doit évoluer pour introduire un formalisme de couplage de modèle, et PAMS qui permet l'exécution à distance de modèle.

La mise en place d'une telle infrastructure logicielle est un sujet ambitieux où apparaît de nombreuses problématiques d'ingénierie. Néanmoins, ce projet révèle de nombreux verrous scientifiques d'actualité dans le domaine de la modélisation-simulation des systèmes complexes notamment dans les domaines du couplage de modèles, du calcul massivement parallèle et du transfert d'échelle. Donner des réponses à ces questionnements ne peut se réaliser seul. C'est dans le cadre d'un projet d'équipe et avec l'appui d'un réseau que je compte mener à bien ce projet.

2 Trois verrous scientifiques à résoudre

La création d'un environnement comme COMODOS soulève et soulèvera une multitude de verrous scientifiques. Au cours de cette section, nous nous focaliserons sur 3 d'entre eux qui me semblent majeurs et tenterons de donner des réponses. Dans un premier temps, nous nous intéresserons au couplage spatialisé et son usage dans la pluridisciplinarité. Ensuite, nous verrons comment tirer profit du calcul haute performance pour gagner en interactivité et favoriser l'échange interdisciplinaire. Finalement nous nous interrogerons sur le transfert d'échelle afin de favoriser la multiplicité des points de vue dans un même modèle couplé.

2.1 Coupler des modèles par l'espace

Aujourd'hui, une multitude de plates-formes comme VLE, HLA, FMI, Records ou VSoil sont construites sur les bases du couplage, d'autres s'y orientent depuis peu (ex. GAMA). Certains framework sont généralistes (ex. VLE, HLA ou FMI) et adressent toutes les thématiques, d'autres comme Records ou VSoil se dédient à un domaine d'ap-

plication particulier notamment les sciences du sol. Mais l'ensemble déploie un arsenal de formalismes, de techniques et d'algorithmes pour assurer une cohérence dans le couplage, notamment pour la synchronisation temporelle des modèles et la synchronisation des données qu'ils s'échangent.

Cependant, on notera la quasi-absence du concept de spatialité malgré son importance pour l'étude de certains phénomènes complexes. Je souhaite justement développer cette forme de couplage car elle présente un enjeu d'avenir dans nombre de disciplines notamment en science du sol.

Si l'on prend l'exemple de la modélisation du fonctionnement des sols. On s'apercevra qu'une multitude de modèles existent, les uns comme Momos [86], Mior[69] vont s'intéresser à la dynamique de bactéries pendant que d'autres se focaliseront sur la bioturbation par les racines ou les vers de terre. Pour étudier l'effet de la bioturbation sur l'activité microbienne, l'approche usuelle serait de concevoir un modèle à compartiments comme Min3P [70] délaissant ainsi toute spatialité. Pour cela, il est admis qu'un sol est environnement multi-échelles, hétérogène. L'activité microbienne est alors inégalement répartie. Dans ce contexte, les approches comme VLE, Records ou VSoil atteignent rapidement leurs limites.

2.1.1 Principe du couplage spatialisé des modèles

Coupler des modèles par l'espace revient naturellement à considérer un espace (ex. le sol), des sous-modèles (infiltration de l'eau, bioturbation, décomposition de la matière organique) et les interactions qui se déroulent entre l'espace et les sous-modèles (voir figure 3.5). Dans ce contexte, les systèmes multi-agents semblent particulièrement indiqués : ils permettent de décrire naturellement un espace multi-échelles (l'Environnement) dans lequel agissent des processus spatialisés (des Agents sous-modèles). Ces processus se voient en interaction indirecte par stigmergie.

Chaque sous-modèle est représentatif d'un processus qui se déroule dans l'espace (bioturbation, décomposition des nutriments). Il est alors décrit par : (i) des règles de comportement (ex. algorithme, automate cellulaire, système multi-agent, Equation Dérivée Ordinaire EDO), (ii) les données de l'espace qu'il modifie, (iii) et une emprunte spatiale (zone restreinte de l'espace où le modèle est en mesure d'appliquer des modifications).

Pour chaque simulation, les sous-modèles sont instanciés une ou plusieurs fois. Durant la simulation, ils modifient une zone restreinte de l'espace en fonction de son évolution et de son emprunte spatiale. Les autres instances de modèle perçoivent ces modifications à leur échelle et agissent en conséquence. La synchronisation temporelle des modèles reposerait sur une algorithmique éprouvée qui a été développée dans les travaux d'Ines Hassoumi [54]. La gestion de l'espace et des échelles seraient à la charge d'agents holoniques particulièrement adaptés à cet effet. Ils donnent une vision hiérarchique, multi-échelles et pourront intégrer des comportements afin d'assurer les transferts d'échelle.

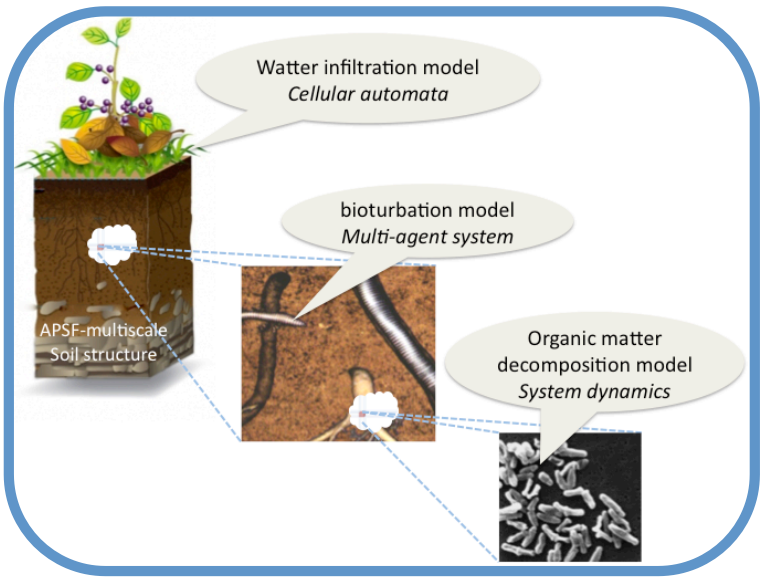


Figure 3.5 – Principe de couplage spatialisé de 3 modèles dans un sol virtuel.

2.1.2 Proposer une représentation pluridisciplinaire de l'espace

La description de l'espace et les concepts engagés se doivent d'être en accord avec le sujet de l'étude. L'espace ne saurait avoir la même teneur si l'on étudiait une ville ou si l'on étudiait un sol. Il est important de conserver une proximité avec le système étudié, sa structure et ses données de terrain afin d'en faciliter l'utilisation, et permettre aux utilisateurs de se projeter dans le modèle.

Quelques structures spatiales usuelles seront proposées dans COMODOS. On pensera notamment aux grilles, aux SIG et à l'APSF. Mais si aucune d'entre elles ne convenait, ce serait donc à la charge du modélisateur d'en mettre une en place pour le sujet de l'étude qui l'intéresse. Pour cela, une littérature abondante sur les DSL (Domain Specific Language) existe [46]. On notera aussi les nombreuses avancées dans le domaine des systèmes multi-agents centrées l'espace [73]. Je pense néanmoins que UML offrirait une bonne base pour la formalisation car il s'agit d'un langage graphique, très utilisé dans nombre de disciplines. Il peut aussi être spécialisé pour des domaines précis en introduisant des concepts et outils spécifiques et adaptés ce qui le rend plus intelligible pour l'expert du domaine et facilite sa construction.

A titre d'exemple, l'utilisation de l'approche APSF abordée dans la section 2.1, page 11, semble être, au regard des écologues, une approche prometteuse. Outre une bonne représentativité des textures de sols, l'arbre de canevas de l'APSF est un formidable outil synthétique qui facilite la navigation entre les échelles spatiales et ouvre ainsi de nouvelles perspectives quant à la description des processus écosystémiques des sols.

L'approche APSF a été utilisée sur quatre terrains d'étude différents avec 4 groupes de scientifiques disjoints :

— le sol de Lamto (Côte d'Ivoire) [17] pour une étude fonctionnelle ;

— les TechnoSol pour la réhabilitation des sols pollués ;
— les sols agricoles français afin d'étudier les diversités microbiennes ; et
— les sols agricoles dans la province d'Antanarivo (Madagascar) en se focalisant sur la problématique de fertilisation face au changement global.

Ces 4 expériences de modélisation APSF ont montré qu'après une rapide phase d'apprentissage des principes et concepts de l'approche, les écologues se projettent naturellement dans le modèle de sol. Ils sont alors en mesure de donner des noms aux différents niveaux d'échelles (sable grossier, sable fin, limon, argiles) et ils localisent spatialement les processus qui les intéressent. Cet anthousiasme est certainement le fruit d'une proximité de la représentation vis à vis du système réel tout en ouvrant l'espace des possibles.

Introduire l'APSF dans COMODOS revient alors à réutiliser le langage de description d'origine et à le compléter par des primitives graphiques. de couplage. Par exemple sur la base de l'arbre de canevas développé dans SWORM [17], les trois processus précédemment cités (infiltration de l'eau, bioturbation et décomposition de la matière organique) peuvent y être insérés et spatialisés en associant à chaque canevas, un processus. Une première esquisse du diagramme de couplage peut être établie (figure 3.6). Pour l'exemple, trois sous-modèles ont été arbitrairement sélectionnés :

— *SWAT ("Soil and Water Assessment Tool")* [77, 4] – il s'agit d'un modèle hydrologique combinant climat et cycle de l'eau sur les bassins versant. Ce modèle à compartiments s'appliquant à l'ensemble du sol virtuel que nous modélisons, il est placé à l'échelle la plus haute de l'arbre (Canevas C0)
— *le Modèle Agent "vers de terre"* – il s'agit d'un modèle à base d'agents (à l'image de SWORM) où chaque individu représente un ver de terre d'environ 2 mm de section. Les vers de terre se déplacent dans le sol virtuel en quête de nourriture et mangent de la matière organique ou des agrégats de sol (cellules décomposables) à leur échelle. deux fois par jour, ces agents déposent des turricules et comblent ainsi des pores. Dans la figure 3.6, ce modèle est placé au canevas C1 car chaque cellule de ce canevas mesure 2 mm.
— *MiOr ("Micro-Organisme")* [69] – il s'agit d'un modèle qui reproduit la dynamique des bactéries qui est particulièrement intense dans les turricules des vers de terre.

Construire un langage spécifique aux sciences du sol à l'image de celui présenté dans la figure 3.6 et l'intégrer dans un collecticiel web serait une véritable avancée dans le domaine. Le développement de ce langage pourrait profiter de réflexions transdisciplinaires menés pour la construction de l'environnement COMODOS.

2.1.3 Discussion

Garder une proximité aux données et au domaine tout en ouvrant des perspectives nouvelles semble être une des clés de la dissémination d'une approche de modélisation. Cette proximité est malheureusement antagoniste avec le concept de généricité.

Coupler des modèles via l'APSF est pertinent en sciences du sol mais s'avère évidemment inadapté en géomatique car la nature de l'espace, les besoins opérationnels

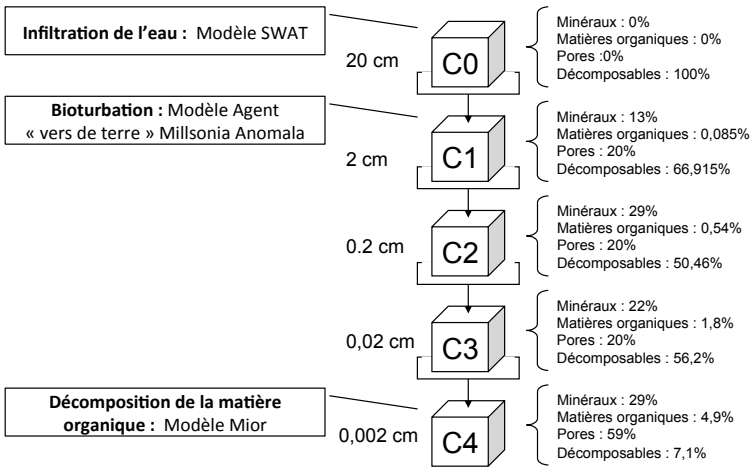


Figure 3.6 – Esquisse d'un diagramme de couplage appliqué au sol de Lamto. Il s'agit d'un arbre de canevas APSF auquel s'ajoute une localisation des processus.

et concepts manipulés sont très différents. Plus généralement, il semble impossible de concevoir une représentation unifiée (à toutes les disciplines) du couplage spatialisée qui susciterait l'enthousiasme à la fois des experts du domaine et des modélisateurs.

Proposer une représentation du couplage spatialisé par domaine majeur (géomatique, écologie, sciences du sol, pêcherie ...) est, selon moi, la solution opérationnelle la plus viable et la plus adaptée au contexte pluridisciplinaire. Néanmoins, une représentation généralisée du couplage spatialisé est nécessaire afin d'offrir un cadre conceptuel. Ce cadre pourrait ensuite être dérivé en fonction du domaine scientifique assurant ainsi une cohérence globale facilitant l'intégration des représentations dérivées dans un collecticiel.

Comme le montre [55], les agents holoniques sont particulièrement adaptés à cet effet. Ils donnent une vision hiérarchique, multi-échelles, du monde simulé. A titre d'illustration, une modélisation APSF s'articulerait autour d'agents *"spatiaux"* représentant les cellules, qui se décomposent récursivement par d'autres agents *"spatiaux"* (représentatives des sous-cellules) et des agents *"modèle"* qualifiant les processus étudiés.

Nous voyons ici se dessiner un environnement participatif de modélisation-simulation qui s'adapte à l'utilisateur (en proposant une représentation de l'espace en fonction des disciplines) et est interactif en laissant la possibilité de lancer à tout moment des simulations. C'est pourquoi cet environnement COMODOS utilisera massivement le calcul haute performance.

2.2 Utiliser massivement le calcul haute performance

COMODOS tisse un lien étroit entre le modèle et la simulation, un cycle rapide passant d'un état à l'autre pour une construction incrémentale des modèles, des scenarios et des résultats. L'exécution de simulations est massivement nécessaire tout au long du processus de modélisation-simulation notamment lors : (i) de la conception du modèle

pour réaliser des tests ; (ii) d'une session de jeu sérieux pour assurer la dynamique du jeu et constituer un scénario ; ou (iii) de l'exploration d'un scénario pour son optimisation.

L'usage des moyens de calcul haute performance s'impose alors afin de répondre aux besoins d'exploration et de scalibité des modèles. C'est pourquoi, COMODOS se doit d'intégrer les technologies du HPC et de proposer des ponts afin d'en libérer l'accès.

Deux principaux regards sont portés sur la distribution (cf section 2.3, page 22) : (i) la distribution des plans d'expériences (n simulation –> n cœurs) ; et (ii) la distribution des modèles (1 simulation –> n cœurs). Pour COMODOS, ces deux approches sont complémentaires et pourront s'entremêler afin de gagner en interactivité et en performance.

2.2.1 De l'expression des scénarios à leur optimisation par la distribution du calcul

Comme nous l'avons vu, la complexité des systèmes modélisés et celle des modèles associés rend souvent impossible d'avoir une bonne idée des paramètres pertinents et du plan d'expérience à réaliser.

Sous la forme d'un jeu sérieux réalisé avec des opérationnels, la simulation participative est justement un moyen efficace d'identifier, à dire d'experts, un ensemble restreint de paramètres, et des scénarios intéressants en devenir d'une politique. L'élicitation de ces scénarios, leur exploration, leur optimisation pour finalement aider à la décision doivent s'organiser dans un continuum automatisé : un processus secondé par des moyens informatiques.

Une première réflexion doit être portée sur la notion de scénario pertinent. Le scénario pertinent semble rarement être optimal, mais doit faire le consensus des opérationnels. Comment juger de la pertinence d'un scénario ? La mise en place d'une métrique quantifiant l'évolution des comportements dans le jeu est une voie explorée dans le projet LittoSim (Nicolas Becu, CNRS, 2015–2017). Est-ce-qu'une stabilité de ces comportements induit la mise en place d'un consensus ? Il s'agit de l'une de nos questions à laquelle nous nous attacherons de répondre.

Néanmoins, on notera d'ores et déjà que la construction d'un scénario requiert plusieurs simulations successives avec une forte interactivité. Les participants eux-même pourraient désirer exécuter une simulation indépendamment du groupe afin de tester une idée dans la confidence avant de la partager au groupe. Distribuer ces simulations et utiliser des ressources de calculs hautes performances permettraient de gagner en interactivité, en puissance et seraient un avantage pour le déroulement des séances de travail. Ces aspects sont abordés dans la section 2.2.2 page 49.

Une fois générés, les scénarios font office de point de départ pour construire des plans d'expériences se focalisant sur quelques paramètres à optimiser. Distribuer ces plans d'expériences consiste à exécuter, sur des cœurs différents, des instances du modèle avec des paramètres différents. Cette approche ne nécessite aucune modification du simulateur, si ce n'est son déploiement dans le contexte particulier du HPC.

Les environnements comme EPIS (Easy Parallel and Interactive Sworm) ou OpenMole rendent justement transparent l'accès aux ressources de calcul, au moyen, respectivement, d'une interface web et d'un langage de script. Ainsi, ces outils assurent le transfert, le contrôle et l'exécution de plans d'expériences en tirant profit des ressources disponibles. Associé à GRADEA, ces environnements constituent une base autonome pour l'exploration distribuée des modèles. GRADEA coordonne l'exécution des plans d'expériences en s'appuyant sur une bibliothèque d'algorithmes d'exploration, et sur EPIS (bientôt sur OpenMole) pour réaliser effectivement ce calcul sur un cluster ou une grille. Une intégration dans GAMA reste néanmoins nécessaire au moyen d'un plugin qui ouvrira ainsi le champ des possibles à la plate-forme.

2.2.2 Profiter des ressources matériels pour accélérer une simulation

La distribution des simulations consiste à modifier le modèle de manière à ce qu'il exploite les ressources d'un cluster en une seule exécution. Deux méthodes sont applicables : une dite "en mémoire partagée" et la seconde en "mémoire distribuée". Dans la première, le simulateur exploite le parallélisme des nouvelles architectures de processeurs, les cœurs, et les architecture multi-processeurs. Dans la seconde, le simulateur exploite un ensemble de cœurs, en divisant son espace de travail pour coller à l'architecture de la machine.

Compte tenu de son architecture décentralisée, le couplage spatialisé de modèles semble particulièrement adapté à la distribution des simulations et laisse aisément imaginer une version physiquement distribuée du simulateur. Chaque agent modèle s'exécuterait alors sur un cœur différent et serait synchronisé via un algorithme distribué de gestion du temps comme ceux proposés dans [55]. Cela laisse imaginer un déploiement hybride du modèle usant au mieux des ressources physiques d'un ordinateur (CPU, GPU, etc). Un premier travail en collaboration avec le DISC (Département d'Informatique des Système Complexe de l'Université de Franche-Comté) a abordé la question [65].

Cependant, le rôle central de l'espace est un frein à la distribution. En effet, il donne lieu à tous les échanges entre les agents. Centraliser la gestion de l'espace sur un même cœur conduit à un goulot d'étranglement ralentissant *de facto* la simulation.

Distribuer l'espace sur différents cœurs est facilité par la vision hiérarchique des agents holoniques. L'agent *"spatiale"* à l'échelle la plus haute se décompose en agents spatiaux d'échelle inférieure, ces derniers s'exécutant sur différents cœurs. En reprenant l'exemple de Lamto 3.6, il s'agirait de répartir les agents d'échelle C1 sur des cœurs séparés.

Mais, la distribution de l'espace soulève un questionnement notamment sur l'inconsistance (un même objet avec des valeurs différentes sur chaque cœur) et sur la concurrence (un même objet utilisé/modifié par plusieurs agents en même temps). Les algorithmes éprouvés dans les plates-formes comme Repast-HPC [29] ou celle proposée par A. Rousset *et al.* [94] forment un bon point de départ.

2.3 Favoriser les transferts d'échelle, l'expérience de Lokta-Volterra

Nombre de modélisateurs diront qu'il y a mille et une façons de modéliser un même phénomène complexe. A titre d'exemple, il suffit de regarder le nombre de versions existantes du modèle proie-prédateur. Même si les équations de Lokta-Volterra font références [66, 105, 106, 76], les versions proposées par NetLogo, GAMA, Cormas ne sont pas fausses alors qu'elles donnent des résultats différents. Cette multiplicité des possibles est conséquence de la diversité des points de vue. Au delà de deux échelles de modélisation différente, la Netlogo du modèle proie-prédateur nuance la reproduction et introduit l'énergie par rapport au modèle de originel.

Il est alors légitime de se poser la question : *Est-il possible de créer deux modèles à deux échelles différentes d'un même système complexe en conservant le même point de vue, les mêmes paramètres et les mêmes sorties ?*

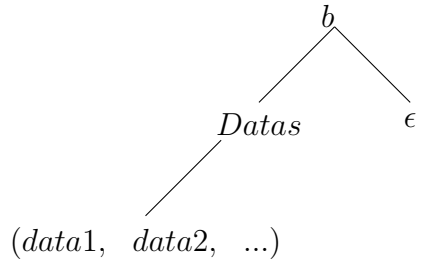
Ce questionnement présente une portée scientifique qui dépasse celle d'une simple analyse comparative entre deux modèles très différents d'un même phénomène complexe. Il s'agit d'identifier des techniques permettant de passer d'une échelle à l'autre, de manière transparente, sans distorsion dans les résultats. Ce travail contribue à développer les techniques de couplage mais aussi à tendre vers des modèles *adaptatifs* dont le niveau d'échelle utilisé est ajustés dynamiquement selon : (i) les besoins de la simulation, (ii) le point de vue de l'utilisateur (observation à l'échelle de l'individu ou à l'échelle du territoire ?).

2.3.1 Considérer les niveaux d'échelle comme un *continuum*

Une première réflexion lancée en 2011 dans le cadre du réseau MAPS avait l'ambition de comparer le modèle macroscopique (à base d'équations dérivées ordinaires) de Lokta-Volterra à une modélisation microscopique (centrée sur l'individu) du même phénomène par les systèmes multi-agents. Ce travail s'est soldé par l'étude de deux modèles très différents [102] car ils ne modélisaient pas les mêmes dynamiques. L'un était une reproduction du modèle de Lokta-Volterra pendant que l'autre s'intéressait aux dynamiques induites par les bosquets et les troupeaux.

Néanmoins ces recherches furent formatrices et ont permis de construire une fiche pédagogique [98] utilisable par tout enseignant désireux de véhiculer un message sur la démarche de modélisation et les choix de granularités temporelles et spatiales des modèles [4]. Ce travail se poursuit, aujourd'hui *en binôme*, avec Nathalie Corson (LMAH – Université du Havre) et tend à reconsidérer le distinguo fait entre les notions d'échelle microscopique et d'échelle macroscopique.

4. Fiche pédagogique téléchargeable à l'url suivante : `http://maps.hypotheses.org/production-pedagogique-de-maps/modeles-mapsiens/proie-predateur`



— Datas : distances, espace, ...
— ϵ : ensemble des données qui ne sont pas connues mais qui doivent être pris en compte. Cette valeur est calculé par simulation

Figure 3.7 – Décomposition des facteurs du modèle macroscopic en données, distances et ϵ à l'échelle microscopic

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} &= ax - bxy \\ \frac{dy}{dt} &= -cx + dxy \end{cases} \tag{3.1}$$

L'équation 3.1 se compose des paramètres suivants :

a : taux de croissance des proies

b : taux de prédation

c : taux de mortalité des prédateurs

d : taux de croissance des prédateurs en fonction de la prédation

Dans cette réflexion, nous prenons l'hypothèse qu'entre ces deux niveaux d'échelle se dresse un *continuum* indiquant qu'il existe une multitude de modèles ayant le même point de vue sur le système, produisant les mêmes résultats mais avec un niveau d'échelle différent. Ces modèles se situent dans ce *continuum* en fonction du niveau de description, de la donnée en présence et de l'usage qu'il en est fait. Ainsi, le facteur d'un modèle macroscopique tel que b pour le modèle de Lokta-Volterra (cf équation 3.1) possède une représentation microscopique (à l'échelle plus fine) qui se compose de données de terrain (ex. système d'information géographique), de données physiologiques (ex. distance de perception) et d'un facteur inconnu ϵ.

Afin de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse, nous avons procédé à une analyse comparative de deux modèles proie-prédateur, l'un macroscopique à base d'équations dérivées ordinaires (le modèle originel de Lokta-Volterra) et l'autre microscopique à base d'agents. Nous avons développé ce dernier pour l'occasion afin de reprendre trait pour trait le point de vue du modèle EDO (paramètres, résultats, processus modélisés) tout en ajoutant le paramètre *"distance d'interaction"* ($DistanceInteraction$) symbolisant la zone de contact entre les individus proies ou prédateurs afin de circuler entre les niveaux d'échelle.

Le modèle à base d'agents est naturellement spatialisé, il décrit un territoire où évoluent des proies et des prédateurs en interaction. Chaque proie et chaque prédateur est modélisé par un agent qualifié par le comportement de l'espèce. Les agents proies se déplacent et se reproduisent selon un taux (a_{micro}). Les prédateurs se déplacent, meurent selon un taux (c_{micro}), capturent les proies dans leur zone d'interaction selon un taux (b_{micro}), et se reproduisent en fonction du nombre de proies dans la zone d'interaction et d'un taux (d_{micro}).

Le paramètre *DistanceInteraction* est un curseur permettant de placer le modèle microscopique dans le *continuum* des échelles spatiales. Si la zone d'interaction de chaque agent recouvre la totalité de l'espace, le modèle devient populationnel et non spatialisé car, tous les agents sont en interaction avec tous les autres. Une distance très petite symbolise un modèle centré sur l'individu où le comportement de chacun est conditionné à la fois par le voisinage proche et l'hétérogénéité spatiale. Une distance intermédiaire est à mi-chemin entre le populationnel et l'individuel. Pour les loups, on parlerait de meute.

2.3.2 Analyse comparative

L'analyse comparative vise à explorer le paramètre *DistanceInteraction* afin de mesurer les effets du changement d'échelle sur le comportement global du modèle à base agents et sur ses résultats. Pour cela, nous utilisons le modèle originel de Lokta-Volterra comme expérience témoin. Par ailleurs, nous assimilons l'espace à un carré de 20 km de côté où vivent en moyenne 50 prédateurs et 150 proies. Ces conditions initiales ont été choisies arbitrairement afin de simuler un stock suffisant d'individus tout en conservant des temps de simulation raisonnable. A partir de ces conditions initiales, nous répétons, pour chaque *DistanceInteraction distance d'interaction*, un processus en trois étapes.

Etape 1 : Calibrer le modèle Lokta-Volterra Cette première étape de l'analyse vise à calibrer le modèle de Lokta-Volterra en déterminant les coefficients a,b,c et d à partir des conditions initiales. Etant donné que le point d'équilibre (150,50) satisfait les équations $\frac{dx}{dt} = 0$ et $\frac{dy}{dt} = 0$, nous en déduisons que $150 = \frac{c}{d}$ et $50 = \frac{a}{b}$. Ainsi, nous déterminons les paramètres suivants :

$$a = 0.05, \quad b = 0.001, \quad c = 0.03\ , \quad d = 0.0002$$

Etape 2 : Déterminer les paramètre du modèles multi-agents Cette deuxième étape réalise un transfert d'échelle visant à convertir les paramètres du modèle macro (a,b,c et d) en paramètres pour le modèle micro (a_{micro},b_{micro},c_{micro} et d_{micro}) en connaissance de la topologie spatiale et de la distance d'interaction. En d'autres termes, cela revient à décomposer, par exemple, le facteur b en trois éléments : une topologie (fixée), une distance (fixée) et b_{micro} (à calculer, b_{micro} dans notre exemple correspond à ϵ dans la figure 3.7).

Les paramètres a et c sont des facteurs où l'espace et l'interaction entre les individus n'interviennent pas. C'est pourquoi, nous déduisons que $a_{micro} = a$ et $c_{micro} = c$. Quant-aux facteurs b et d, ils sont intimement lié à une composante spatiale, notamment la distance d'interaction. Ils ne peuvent pas être déterminés par un calcul directe car l'hétérogénéité spatiale doit nécessairement être prise en compte. Nous avons alors développé un modèle de calibration qui par simulations successives calcule b_{micro} et d_{micro} à partir de b, d et de la topologie de l'espace. Ce modèle s'appuie sur l'algorithme suivant :

1. Charger le monde à simuler en utilisant les données disponibles, notamment le système d'information géographique
2. Positionner 150 proies et 50 prédateurs en tenant compte des contraintes spatiales (la topologie par exemple)
3. Pour chaque proie X_i calculer $NombreInteractions$ tel que $NombreInteractions$ est le nombre de prédateurs situés à une distance inférieure à $DistanceInteraction$ de X_i.
4. Calculer un taux d'interaction avec l'équation 3.2.

$$tauxInteraction = \frac{\sum_{i=1}^{NombreProies} NombreInteractions(X_i)}{NombreProies * NombrePredateurs} \tag{3.2}$$

   Répéter suffisamment les étapes 2, 3 et 4 afin de minimiser l'erreur. Conserver l'ensemble des valeurs $tauxInteraction$ dans une liste $listeTauxInteraction$
5. Calculer b_{micro} et d_{micro} tel que $b_{micro} = \frac{b}{tauxInteraction}$ et $b_{micro} = \frac{d}{tauxinteraction}$

Etape 3 : Simuler Il s'agit d'exécuter le modèle multi-agent en utilisant les paramètres précédemment calculés (a_{micro},b_{micro},c_{micro} et d_{micro}) et de comparer les résultats avec ceux produits par le modèle macroscopique.

Afin de tester nos hypothèses de départ, nous avons établi un plan d'expériences en faisant varier le paramètre $DistanceInteraction$ de 200 m à 20 km avec un pas de 500 m pour $DistanceInteraction < 4000$ et avec un pas de 2000 pour les valeurs supérieures. Chaque simulation a été répétée 30 fois avec 30 graines différentes. Compte tenu du nombre de simulations à réaliser (510 soit 17 X 30) qui pour chacune d'elle dure environ 10 minutes, nous avons utilisé le Mésocentre de calcul de l'Université de Franche-Comté.

2.3.3 Discussion

L'objectif du plan d'expériences présenté dans la section précédente est de comparer les résultats du modèles macroscopique à ceux produits par le modèle microscopique positionné à ses différentes échelles. La figure 3.8 est une première esquisse des résultats obtenus après simulation [5].

5. L'ensemble des résultats sera présenté dans un article en préparation

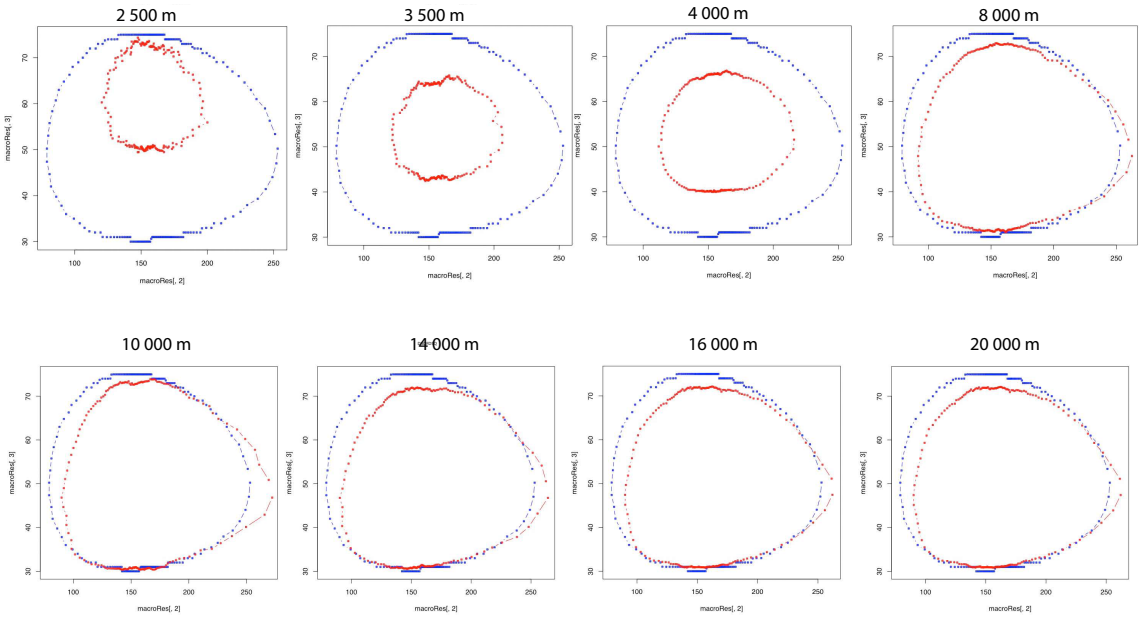


Figure 3.8 – Diagramme de phase obtenus après l'exploration du paramètre $DistanceInteraction$ avec : en abscisse le nombre de prédateurs, en ordonnées le nombre de proies ; en rouge les résultats du modèle agents pour une $DistanceInteraction$ donnée ; et en bleu les résultats du modèle de Lokta-Volterra. On notera une forte similitude entre la dynamique des deux modèles aux différentes échelles mais une divergence apparait lorsque la distance d'interaction est trop faible (environ 3 km).

Au regard des résultats présentés par la figure 3.8, on observera 3 phases différentes en fonction du niveau d'échelle :

— $DistanceInteraction \geq 8\ km$ – une forte similarité du comportement des deux modèles, aussi bien au niveau de l'amplitude des oscillations qu'au niveau du point moyen ;

— $3km \leq DistanceInteraction < 8\ km$ – une similarité décroissante, le point moyen reste inchangé mais les amplitudes des oscillations sont réduites pour le modèle macroscopique ;

— $DistanceInteraction < 3\ km$ – une similarité faible, le point moyen se décale peu à peu et les amplitudes des oscillations sont réduites pour le modèle macroscopique ;

Afin de compléter ces résultats, nous allons mener une analyse plus approfondie et de nouvelles simulations. Elles pourront certainement expliquer les raisons de ces bifurcations dans les dynamiques observées. Ces dernières semblent néanmoins être occasionnées par une évolution de la couverture de l'union des zones d'interaction. L'ensemble des résultats de ce travail préliminaire seront présentés dans un article en préparation.

Au delà de l'intérêt purement théorique, ce travail présente un enjeu majeur afin de permettre des changements dynamiques d'échelle en fonction des besoins de la simulation et de l'utilisateur. Les dynamiques et interactions observées ne sont généralement pas uniformément réparties dans l'espace. Ainsi certaines zones peu utilisées de l'espace pourraient se contracter et évoluer sur la base d'un modèle équationnel rapide à exécuter ; pendant que d'autres zones, où un focus est nécessaire, se déploient dynamiquement afin d'exécuter un modèle descriptif. Il s'agit d'une piste que j'ai impulsé dans le cadre du projet MetaFish du réseau MAPS.

3 Un investissement nécessaire dans la pluridisciplinarité

Concevoir un environnement tel que nous l'avons imaginé dans la section précédente ne peut se réaliser sans des actions effectives dans différents champs disciplinaires. Afin de faire suite aux deux cas d'étude identifiés dans le premier chapitre, nous nous reposerons sur deux projets du même domaine, à savoir les projets Camisole et MarrakAir.

3.1 Projet Camisole

Porteuse : Laetitia Bernard – Financement : Fond de recherche pour la biodiversité

Un rapport de la FAO, publié en octobre 2009 ("Le défi spécifique à l'Afrique subsaharienne"), dresse une image très pertinente de la situation et des perspectives de l'agriculture en Afrique Subsaharienne. Ce rapport fait état du caractère à la fois vulnérable de l'agriculture et pourtant porteur d'un énorme potentiel pour la croissance globale du continent africain. Cette vulnérabilité a deux origines principales : (i) l'accès à l'eau est conditionné par la pluviométrie si bien que L'agriculture est très sensible au

changement climatique ; (ii) la majorité des agriculteurs sont de petits exploitants qui ne peuvent fertiliser leur cultures autrement que par les produits d'origines diverses (résidus de cultures, fumiers, composte...).

Les enjeux de ce projet sont donc de comprendre dans un premier temps le rôle de la biodiversité des microorganismes du sol dans la fourniture des services de production végétale, recyclage des nutriments et séquestration du carbone et la sensibilité de cette relation face aux changements globaux dans les sols d'Afrique de l'Ouest et de Madagascar. Le deuxième enjeu de ce projet est de réaliser un modèle qui intègre cette relation tripartite entre changements globaux, biodiversité microbienne et services écosystémiques. Il s'agit d'établir un modèle multi-échelles qui reproduira la dynamique et l'interaction de quelques fonction du sol (recyclage des nutriments et la séquestration du carbone) face, en premier lieu, aux apports en matière organique, et face au changement climatique ensuite. Cette étude est menée dans les sols d'Afrique de l'Ouest et de Madagascar.

Comme nous avons pu le voir, nombreux sont les modèles qui se focalisent sur un processus écosystémique particulier indépendamment des autres tels que les modèles de développement racinaire [70], de priming effect [44] de bioturbation [17], d'écologie des communautés [49] ou d'écoulement de l'eau [77, 4].

Ainsi, à partir d'un Système d'Information Géographique et de données de terrain (données granulométriques, biomasse, etc), nous souhaitons construire des sols virtuels reposant sur l'approche APSF. Ces sol virtuels se verront complétés par des modèles représentatifs de quelques processus du sol (décomposition de la matière organique, infiltration des nutriments, bioturbation et développement racinaire).

Afin de mener à bien ce projet tout en contribuant à l'environnement COMODOS, nous développerons les axes de travail suivant :

— *Plugin de couplage spatial Comodos* – il s'agira d'enrichir le *noyau de simulation* de GAMA par un plugin permettant de manipuler des structures spatiales APSF. Une réflexion en amont sera réalisé afin de définir un cadre générique qui sera dérivé en fonction du cas d'étude. Ce cadre reposera sur les agents holoniques et les développements réalisés dans la thèse d'Ines Hassoumi [55]

— *Calibration automatique à partir de données de texture* – Il s'agira de terminer les travaux engagés avec Sophie Leguédois visant à produire un générateur automatique d'arbre de canevas à partir de données de terrain.

— *Coupler les modèles précités* – Je souhaite m'appuyer sur les prédispositions du langage intégré à GAMA (sa syntaxe orientée utilisateur, sa flexibilité et son caractère évolutif) et sur les fonctionnalités déjà opérantes dans GAMA (ex. plugin de simulation numérique) pour coupler les modèles précités. Cela, permettra d'identifier les manques de la plate-forme COMODOS quant au couplage de modèles et enrichir ainsi le plugin COMODOS.

3.2 Projet MarrakAir

Porteur : Mohamed Ait Babram –Financement : Université Cadi Ayyad

Les sociétés subissent de profondes mutations, aussi bien dans leur organisation (mobilité professionnelle croissante, flexibilité,...) que dans leurs mentalités et modes de déplacement. Ces évolutions majeures, notamment au Sud où la croissance des villes est fulgurante, se traduisent inévitablement par une croissance des besoins de mobilité, de plus en plus intenses, mais également plus diversifiés, plus évolutifs, plus changeants.

Les infrastructures et les politiques de transport d'hier deviennent aujourd'hui caduques. Les citadins sont aujourd'hui confrontés à un accroissement des difficultés de circulation rendant la ville moins accessible et plus hostile à ses habitants (pollution, nuisance sonores,...). Ouvrir l'espace urbain au plus grand nombre tout en assurant la durabilité des villes et des espaces reste donc à la fois un enjeu de société et un objectif d'aménagement difficile à atteindre.

Même si les fonctions de la ville sont définies une à une, leur enchevêtrement rend difficile d'en optimiser une sans modifier voire dénaturer l'efficacité d'une autre. C'est pourquoi, la définition d'une politique qui fait consensus ne peut se réaliser : (i) sans tenir compte de la diversité des acteurs locaux, des dynamiques environnementales et des processus sociaux ; (ii) et sans évaluer, *a priori*, leur impact sur le territoire.

Dans ce contexte nous souhaitons mettre en place un démonstrateur reposant sur :
- *un modèle d'écologie urbaine* mettant en évidence l'effet du trafic et des politiques d'aménagement sur la pollution de l'air ;
- *une interface connectée* conçue pour les opérationnels afin de contrôler et de piloter ce modèle ;
- *des capteurs* permettant le comptage routier.

Il s'agira d'un démonstrateur à réalité augmentée, qui permettra aux utilisateurs opérationnels, d'interagir avec une simulation au moyen d'une tablette tactile et de visualiser, en temps réel, l'impact écologique de ces actions sur une maquette de Marrakech, une carte imprimée en 3 dimensions.

Un modèle de trafic, développé par Justin Emery [40] (Théma – Université de Bourgogne) existe. Il repose sur la plate-forme GAMA. A l'origine développé pour la ville de Dijon, il a été modifié et est aujourd'hui appliqué à la ville de Marrakech. A partir de données ponctuelles de comptage, ce modèle est en mesure de répartir le trafic sur l'ensemble du réseau routier d'une ville.

A l'image du projet Camisole, ce projet en contribuera sans aucun doute à l'environnement COMODOS, notamment en développant les axes suivants :
- *Interface asymétrique* – Il s'agira de développer une interface didactique sur un client mobile tel qu'une tablette tactiles. Cette tablette sera interconnectée au modèle de trafic précité via le protocole MQTT. L'interface créée devant être simple, peu d'actions seront nécessaires : supprimer des routes, modifier les vitesses, etc. La difficulté sera de construire une interface suffisamment modulaire pour être

facilement modifiable. Par contre, une réflexion sera portée sur la création d'un module (une bibliothèque) pour assurer l'interopérabilité entre un objet connecté et GAMA.

— *Capteurs* – Nous souhaitons connecter au modèle des capteurs permettant le comptage de véhicules. Les données acquises seront injectées en temps réel dans la simulation. Pour cela nous nous reposerons sur la technologie Raspery que nous maîtrisons ou nous nous reposerons sur un compteur de trafic urbain tel que le MX 300 proposé par la société MAGSYS [6]. Côté plate-forme des améliorations devront être apportées afin d'assurer une synchronisation entre le capteur et GAMA, notamment la synchronisation temporel.

Les projets Camisole et MarrakAir contribueront indéniablement aux objectifs fixés dans COMODOS. Ils tentent de répondre à quelques uns des verrous scientifiques identifiés, mais pas à tous. Ils entre dans une logique *transdisciplinaire* visant (i) à se nourrir de problématiques concrètes, (ii) à profiter de l'expertise de groupes scientifiques établis et (iii) à mutualiser l'activité de recherche et ses développements, pour construire au fil de l'eau l'environnement COMODOS.

4 Conclusion

COMODOS introduit une approche originale qui favorise l'échange tout au long du processus de modélisation-simulation. Le modèle est placé au centre de la discussion, il s'agit de l'objet manipulé et simulé par tous. Il est alors le fruit d'interaction complexes entre les participants. Il se construit par itérations successives et rapides ("essai-erreur") afin de favoriser l'interactivité et la découverte de la modélisation par les non initiés.

Pour la réalisation d'un tel projet, il est nécessaire de porter une réflexion sur plusieurs thèmes : l'approche de modélisation ; la simulation massive ; et les transferts d'échelle.

Le couplage et plus exactement le couplage spatialisé semble être une approche parfaitement adaptée pour assurer la médiation entre les acteurs de la modélisation. Il offre une représentation concrète du système complexe modélisé. Les systèmes multi-agents rendent dynamique cette représentation par le couplage de modèles et leurs interactions indirectes via l'Environnement.

Au delà des aspects représentations, cette approche met un pied à l'étrier dans le domaine du calcul haute performance. La distribution des plans d'expériences et la distribution des simulations sont deux approches complémentaires qui présentent un intérêt majeur pour la plate-forme COMODOS. Elles favoriseront respectivement l'optimisation de scénarios aidant à la décision et la création de modèles plus ambitieux en améliorant l'interactivité. Néanmoins, de nombreuses innovations restent à découvrir dans le domaine de la simulation à base d'agent, notamment pour la gestion du temps et de la concurrence. Mais peut-etre qu'avant de vouloir distribuer à tout prix le modèle, ne serait-il pas

6. site web :http ://www.magsys.net

judicieux de le simplifier dynamiquement ? Les techniques de transfert d'échelle peuvent nous aider et nous conduire à des résultats passionnants.

Chapitre 4

Conclusion

L'image du chercheur solitaire capable de collecter des données, de conceptualiser des modèles explicatifs et de les opérationnaliser sur des outils informatiques, cède le pas à celle du groupe pluridisciplinaire comprenant typiquement des thématiciens, des informaticiens, des mathématiciens et des opérationnels. Pour ces groupes, le modèle (ou la simulation) est à la fois : (i) la raison première de leur regroupement, (ii) l'objectif collectif à atteindre, (iii) mais aussi et surtout le support de leur travail collectif.

L'activité modélisation-simulation d'un système complexe est de fait un processus distribué où se confrontent des manières de penser, des idées et des enjeux afin d'aboutir à la co-construction de modèles communs qui sont exécutés, analysés ou explorés. Mais cette confrontation doit être environnée dans un cadre conceptuel et logiciel qui permet de magnifier les expériences de chacun et de simplifier autant que possible la technicité des mathématiques et de l'informatique.

Les nombreuses expériences de modélisation montrent que le couplage de modèles tiendra une place de plus en plus importante dans le processus de modélisation-simulation des systèmes complexes. En effet, l'ambition dans les projets s'accroit ; la liste des thématiques engagées dans chacun d'eux ne cessent de s'allonger. C'est pourquoi, la capitalisation, la participation d'experts, la co-modélisation et le calcul intensif deviennent une nécessité.

Ainsi, je propose une approche originale appelée COMODOS qui allie couplage de modèles, la participation et le calcul intensif. Cette approche place l'espace réel au centre du couplage en définissant des structures multi-échelle le conceptualisant en fonction d'un domaine d'application. Il est selon moi crucial de conserver une proximité avec le sujet de l'étude afin de favoriser la discussion.

COMODOS est un collecticiel à destination des acteurs d'un projet de modélisation-simulation (du modélisateur confirmé à l'opérationnel). Ces acteurs s'organisent en deux principaux groupes pluridisciplinaires : le groupe de conception qui interagit via l'interface web de la plate-forme ; et le groupe d'aide à la décision qui se rassemble en un même lieu et s'appuie sur la version *standalone*.

Le groupe d'aide à la décision se réunit afin d'identifier des scénarios pertinents par des sessions de jeux sérieux. Ces scénarios sont ensuite optimisés par le groupe de conception pour aider à la décision.

Le groupe de conception s'intéresse à l'élaboration du modèle, à son analyse et à l'exploration de scénarios d'aide à la décision. Par une calibration, les structures multi-échelles deviennent alors un espace virtuel média de discussion, mais aussi facteur de couplage permettant aux membres du groupe de positionner des sous-modèles. Ces derniers interagissent alors par stigmergie. Dans COMODOS, la conception de modèles s'appuie sur un processus à cycle rapide permettant d'utiliser une approche de modélisation "essaie-erreur" plus ludique.

Les groupes de conception et d'aide à la décision s'appuient massivement sur la simulation du modèle pour tester, analyser et explorer. C'est pourquoi il est important de rendre transparent l'accès aux ressources de calcul haute performance.

Nombre de travaux dans la littérature ont porté sur l'exploration et la simulation distribuée, d'autres sur la participation. Nombre d'entre eux ont abouti à la création de plates-formes qui sont pour certaines d'entre elles des références. Ainsi, COMODOS n'est pas une plate-forme "nouvelle" il s'agit d'un agglomérat d'outils existants avec en son centre la plate-forme de simulation GAMA. Aux extrémités, nous nous appuierons sur des environnement comme : OpenMole pour la distribution des plans d'expériences, GRADEA pour leur construction et PAMS pour la partie collecticiel.

La création d'un tel environnement de modélisation-simulation soulève de nombreux verrous scientifiques dans le domaine des systèmes complexes. Nous en avons cité trois (l'approche de modélisation, la simulation massive et les transferts d'échelles) qui s'intéressent en particulier à faciliter la participation dans la modélisation. Mais cela va amener à d'autres recherches tout à fait intéressantes, notamment sur une introduction plus franche des capteurs dans la modélisation-simulation ou la mise en place d'une métrique permettant d'observer l'évolution des comportements pendant un jeu sérieux.

Ce projet s'appuie sur un existant solide basé sur des plates-formes et un réseau de scientifiques. Il est à noter qu'un tel projet ne peut se passer d'applications thématiques. Nous en avons identifiées deux pour l'exemple : Camisole et MarrakAir. Mais COMODOS sera construit à partir d'un ensemble de projets pluridisciplinaires qui s'appliquent indifféremment au Nord ou au Sud. Je travaille d'ores et déjà dans le domaine de l'écologie sur la pullulation des campagnols dans le Jura et en épidémiologie notamment sur les problématiques de la diffusion de la dengue en Asie du sud Est. Tous ces projets apportent leurs lots de questionnements qui par leur résolution, apporteront leurs petites pierres à l'édifice et contribueront *de facto* à COMODOS.

Chapitre 5

Curriculum Vitae

Nicolas Marilleau
Ingénieur de recherche
à l'Institut de Recherche
pour le Développement

UMI 209 UMMISCO
32 avenue Henri Varagnat
93143 Bondy Cedex

Fixe : +33 (0) 1 48 02 79 01
Mobile : +33 (0) 6 88 33 49 06
Courriel : nicolas.marilleau@ird.fr

1 Fiche synthétique

Thèmes scientifiques : Approches distribuées à base d'agent pour modéliser et simuler les systèmes complexes.
modélisation-simulation des complexes, Systèmes multi-agents, couplage de modèles simulations participatives, simulations distribuées, pluridisciplinarité

Laboratoires de rattachement :

- Chercheur au sein de l'Unité Mixte Internationale de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes (UMI 209 UMMISCO) – IRD / UPMC
- Chercheur associé au Département d'Informatique des Systèmes Complexes (DISC) – Institut Femto-st / Université de Bourgogne-Franche Comté

Expériences :

- Responsable du thème "modélisation à base d'agents " au sein de l'UMI UMMISCO
- Porteur/participant dans plusieurs projets de recherche nationaux et internationaux

- Participant actif des réseaux RNSC - MAPS (Modélisation Agent des Phénomènes Spatialisés) / SIMTOOLS
- Organisateurs d'événements scientifiques
  - 9 conférences ou workshop commisco 10...16, V2CS12, AAECS'09 , SFBT 13
  - 10 écoles de chercheurs Mimsco, Mimscop, EMMISCO, SmasHPC, PDI 10 ...16
  - Formateur ou conférencier invité
  - Atelier RNSC, ICSSA 2014, smart cities 2015, models 2015, JTD 2015
- Enseignement en master et école doctorale - France, Maroc, Sénégal, Cameroun, Vietnam, Suisse, Errasmus - Modélisation-simulation des systèmes complexes / programmation d'applications distribuées

Publications :

- 3 ouvrages dont 1 traduit en anglais,
- 2 numéros spéciaux,
- 13 chapitres,
- 7 articles de journal,
- 45 articles de colloque avec actes et comité de lecture

Encadrements

- 9 Doctorants (9 dont 3 soutenues)
- 16 Stages de Master
- 8 Projets tuteurés

Expertises

- Expert invité pour jury de master 2 à l'EPFL, Lausanne
- Thèses : 2 comités de thèse et 2 jurys
- Expert pour évaluation de projets nationaux
- Evaluateurs dans plusieurs journaux et conférences
- Ancien membres de la commission de recrutement de l'IRD

2 Activités d'animation et d'administration de la recherche

- Responsable du thème "modélisation à base d'agents" au sein de l'UMI UMMISCO
- Membre élu du CTS du campus IRD France Nord (membre suppléant)
- Membre élu du CHSCT du campus IRD France Nord (membre titulaire)
- Membre actif du réseau MAPS
- Coordination des formations au sein de Programme Doctoral International
- Responsable du site web de l'unité UMMISCO
- Ancien Membre élu de la Commission de recrutement CGRA 1 (2012–2015)

3 Projets de recherche

— Acteur – Agents Cognitifs Territorialisés pour l'Etude des dynamiques Urbaines et des Risques – Patrick Taillandier – ANR (2014 – 2019)
— Camisol – Laetitia Bernard / **Nicolas Marilleau** (WP leader) – FRB (2014 – 2019)
— COMMISCO (Conférence en modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes complexes) – **Nicolas Marilleau**/Christophe Cambier –IRD/ Seine-Saint-Denis (2012–2016)
— EPIS (Easy, Parallel and Interactive Sworm) – **Nicolas Marilleau** – IRD (2010-2011)
— FaceCave (Création d'un centre de compétences en calcul haute performance au Vietnam) – Jean Daniel Zucker, IRD – 2010
— Gen* (Génération de populations synthétiques spatialisées et socialement structurées pour la simulation sociale) – Alexis Drogoul – ANR (2013-2017)
— MAPS (Modélisation des phénomènes spatialisés) – MAPS team – RNSC (2009-2016)
— MIRO2(Modélisation Intraurbaine de Rythme Quotidien) – Arnaud Banos – ANR (2009-2013)
— MIRO3 (Modélisation Intraurbaine de Rythme Quotidien) – Arnaud Banos – Ministère du transport (2014 – 2015)
— MICROBES (Microbial Observatories for the Management of Soil Ecosystem Services in the Tropics) – Jean-Luc Chotte (2006-2010)
— Pamiope (PAysage & MIcroarthropodes de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement) – Sébastien Barot – (2012–2014)
— PAMS (Plate-forme collaborative d'aide à la modélisation-simulation) – **Nicolas Marilleau** – IRD (2007-2008)
— POFS (Portail cOllaboratif Francophone de Sensibilisation à la sécurité environnementale par la simulation) – **Nicolas Marilleau** – OIF (2010-2013)
— RIM (Réseau Interdisciplinaire de modélisation) – **Nicolas Marilleau** – IRD (2009-2010)
— TechnoSol – Sophie Leguedois/**Nicolas Marilleau** – RNSC (2010-2011)

4 Enseignements

4.1 Enseignements universitaires

— Cours Magistraux, Travaux Dirigés et Travaux pratiques, "Système multi-agent et Calcul haute performance ", Ecole doctoral SPIM à l'Université de Franche Comté, 2016
— Cours Magistraux, Travaux Dirigés et Travaux pratiques, "PAD : Programmation d'Application Distribué ", Master 2 d'informatique Option système distribué à l'Université de Franche Comté, 2009-2016

— Cours Magistraux, Travaux Dirigés et Travaux pratiques, "Modélisation-simulation agent des systèmes complexes ", Master 2 et Doctorat de mathématique, Université Cady Ayyad de Marrakech, 2009, 2010, 2011, 2013
— Cours Magistraux, Travaux Dirigés et Travaux pratiques, "Modélisation-simulation agent des systèmes complexes ", Master 2 et Doctorat de mathématique, Université UCAD (Dakar), 2010, 2011, 2013
— Cours Magistraux, Travaux Dirigés et Travaux pratiques, "Modélisation-simulation agent des systèmes complexes ",Doctoriales, 2010-2016
— Cours Magistraux, Travaux Dirigés et Travaux pratiques, "Modélisation-simulation agent", Licence 3- Université de Franche Comté, 2011-2016
— Cours Magistral, Institut de géographie, Ecole Doctorale, 2013-2015 , France
— Cours Magistral, Modélisation-Simulation participative des dynamiques urbaines, Erasmus, Suisse, 2013 2015
— Cours Magistraux, Travaux Dirigés et Travaux pratiques, "Model exploration and High performance computing", Universit des Sciences et Technique de Hanoi, Hanoi, 2013-2015

4.2 Tutoriaux

— Formateur et organisateur dans les formations du réseau "MAPS : Modélisation multi-Agent appliquée au Phénomènes Spatialisés", Ile d'Oléron, 2009–2015
— Formateur invité à l'école d'été à "Summer School SMA", Institut des Systèmes Complexes, Paris, Juillet 2011
— Formateur invité à "Ecole d'été Système Complexe", le Havre, juillet 2013
— Formateur et organisateur "Ecole Modélisation Informatique et Mathématique des Systèmes Complexes", Master 2 et Doctorat de l'université de Yaoundé, 2011
— Formateur et organisateur "Ecole de Modélisation Informatique et Mathématique des Systèmes Complexes de Pêcherie", Master 2 et Doctorat de informatique, UCAD-AIMS, 2012
— Formateur et organisateur "Ecole de Modélisation Informatique des Systèmes Complexes Ecologiques" , IRD, 2012
— Formateur invité aux "journées du Réseau National des Systèmes Complexes, Evian", octobre 2013
— Formateur invité aux "journées du Réseau National des Systèmes Complexes, Mulhouse", novembre 2014
— Formateur et organisateur "Ecole Simulation Multi-agents et Calcul Haute Performance", Université de Franche-Comté, 2014,2016
— Formateur invité à "ICCSA2014", le Havre, juillet 2014
— Formateur invité aux "journée de Tam Dao", juillet 2015
— Formateur "Formation GAMA-PAMS", Hanoi, 2009

5 Encadrements

5.1 Doctorats

— Nguyen Trong Khanh, (50% – Dirs : Amal El Fallah Seghrouchni, Ho Tuong Vinh) "Elaboration d'un processus et conception des outils de support pour simulation collaborative", Université Paris 6, 2009-2011

— Sébastien Chipeau, (30% – Dir : Fabrice Bouquet ; Co-enc : Christophe Lang) " Génération automatique de systèmes multi-agents à partir de modèles de conception pour la simulation à large échelle de systèmes complexes" Université de Franche Comté, 2010-2013

— Ines Hassoumi, (40% – Dir : Jean-Daniel Zucker, Khaled Guedira ; Co-enc : Christophe Lang, Moncef Témani) "Couplage de modèles par les systèmes Multi-Agents", PDI, UPMC, 2010-2013, Tunisie-France

— Thé Nhan Ho (60% – Dirs : Jean-Daniel Zucker, Hong Quang Nguyen ; Co-enc : Laurent Philippe) "Exploration de modèle agent par des algorithmes parallèles d'exploration", AUF, UPMC, 2012-2016, Vietnam-France

— Justin Emery (30% – Dir : Thomas Thévenin ; Co-enc : Nadège Martini) "Reconstruire le trafic d'une ville à partir de données de comptage et d'un modèle à base d'agent", 2013-2016, Université de Bourgogne, Dijon

— Saad Toubhi (20% – Dirs : Hassan Hbid, Christophe Cambier ; Co-enc : Tri Nguyen Huu, Mohamed Babram) "Génération de trafic à partir de données de comptage", 2014-2017, UCA – UPMC, Maroc-France

— Ahmed Latabi (20% – Dirs : Hassan Hbid ; Co-enc : Tri Nguyen Huu, Mohamed Babram) " Démarche et outils de modélisation pour lié les données au modèle". UCA, Maroc

— Mciss Diallo (20% – Dirs : Alassane Bah, Christophe Cambier ; Co-enc : Bruno Bonté) "Conception et implémentation d'une société artificielle générique intégrée à la suite d'outils COOPLAAGE dédiée à la gestion de l'eau dans un bassin versant", 2015 – 2018, UCAD-UPMC, Sénégal-France

— Laurent Lucien (40% – Dirs : Laurent Philippe ; Co-enc : Christophe Lang) "Description et formalisation de la collaboration entre agent : application aux véhicules communicants", 2014 – 2017, Université de Franche-Comté, Cifre

5.2 Stages de master

— Romulad Poggo "Plate-forme collaborative", Stage Master 2, 2013-2014

— Jean-Remi Toguébaie "Calibration du modèle Sworm par simulation de Monté-Carlo", INRA, Univ de Clermont-Ferrand, 2011-2012

— Charles Thévenin "Modélisation Agent de l'évolution de la biodiversité en fonction de la dynamique paysagère", Master Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, UPMC, 2012

— Ho Thé Nhan "mise en place d'un service didactique et parallèle pour la réalisation ", Stage de Master IFI, Bondy
— Lang Kack Chien "Mise en place d'un webservice pour la soumission de simulation sur un cluster", Stage de Master IFI, Besançon
— Frédéric Spade "Mise à niveau d'une bibliothèque parallèle pour la simulation agent", Stage de MASTER 2, Yaoundé 1, Cameroun
— Kana Souna Mathias "Mise en place d'un portail pour la sécurité environnemental", Stage de MASTER 2, Yaoundé 1, Cameroun
— Nguyen Khanh Hoa "Evaluation et Amélioration de la plate-forme PAMS", Stage de Master 2, Institut de la Francophonie pour l'Informatique, 6 mois, 2009-2010
— Kevin Gonzalez "Amélioration d'une base de données d'images satellitaires", Stage d'IUT, Bondy
— Isabelle Duchet "Horloges synchronisé pour une simulation distribuée", Stage de Master EAD, Besançon
— Kana Souna Mathias "Mise en place d'un portail pour la sécurité environnemental", Stage de MASTER 2, Yaoundé 1, Cameroun
— Mainouna Diagne "Parallélisation du simulateur Sworm", Stage de Master 2, UCAD 2, Sénégal
— Sophie Noel "Traitement d'images satellitaire et de photographie Aérienne", Stage de Licence 3, IRD-Bondy, Université de Franche Comté, 6 mois, 2009
— David Russeau "Migration de l'environnement dans les SMA", Stage de Master 2, Université de Franche-Comté, 6 mois, 2009
— Inès Hassoumi "Mise en place et évaluation d'un algorithme de répartition de charge pour les plateformes de simulation distribuées basées sur les systèmes multi-ages", Stage de Master 2, Université de Franche-Comté, 6 mois, 2009

5.3 Projets tuteurés

— Justin Bonnet, Cannelle Le Roy, "Implémentation d'une politique de répartition de charge sur un simulateur distribué orienté agent", Projet tuteuré de Master 2, Université de Franche-Comté, 2009
— Ho The Nhan, "Développement de l'interfaçage multiple dans la plateforme de simulation collaborative PAMS Application à la simulation participative", TPE, Institut de la Francophonie pour l'Informatique, 2009-2010
— LE Nguyen Tuan Thành, "Etude des Outils de Modélisation Graphique Collaborative – Application à la modélisation des comportements d'agents", TPE, Institut de la Francophonie pour l'Informatique, 2009-2010
— Ho The Nhan, "Mise en place d'une interface de soumission de simulation sur cluster", Prestation, Institut de la Francophonie pour l'Informatique, 2010-2011, Vietnam
— LE Nguyen Tuan Thành, "Etude des Outils de Modélisation Graphique Collaborative – Application à la modélisation des comportements d'agents", Prestation, Institut de la Francophonie pour l'Informatique, 2010, Vietnam

— Vincent Hazenfratz et Vincent Marechal "Développement d'un simulateur de patrouille robotisé avec RAFALE-SP", Projet, 2010, Besançon
— Quoc Khai NGUYEN "développement d'un pluging gama implémentant l'algorithme de Dikjstra sur GPU", TPE, iFI, 2012-2013

6 Bibliographie

6.1 Ouvrages et numéros spéciaux

1. Bah, Alassane, and **Nicolas Marilleau**. *"Modélisation et Complexité"*. Edited by A Bah and **Nicolas Marilleau**. Vol. 10. Studia Informatica Universalis 1. Herman, 2012.
2. Banos, Arnaud, Christophe Lang, and **Nicolas Marilleau**, eds. *"Agent-Based Spatial Simulation with NetLogo : Introduction and Bases"*. Wiley-ISTE, 2015.
3. Banos, Arnaud, Christophe Lang, and **Nicolas Marilleau**, eds. *"Simulation À Base D'agent Avec Netlogo"*. Vol. 1. ISTE, 2015.
4. Bouquet Fabrice, Lang Christophe, and Marilleau Nicolas. *"V2CS : Validation to Complex Systems"*. Studia informatica, Herman., 2015.
5. Sheeren, David, Nicolas Becu, Marion Amalric, Arnaud Banos, Nathalie Corson, and **Nicolas Marilleau**. *"Recueil de Fiches Pédagogiques Du Réseau MAPS"*, 2014.

6.2 Chapitres d'ouvrage (13 publications)

1. Amalric, Marion, Sébastien Caillault, Nathalie Corson, Patrice Langlois, Claude Monteil, **Nicolas Marilleau**, and David Sheeren. *Fiche Pédagogique Modèle Proie-Prédateur."*, 2014.
2. Amblard, Frédéric, Eric Daudé, Benoit Gaudou, Arnaud Grignard, Guillaume Hutzler, Christophe Lang, N Marilleau, Jean-Marc Nicod, David Sheeren, and Patrick Taillandier. *"Introduction À Netlogo."*. In Simulation À Base D'agent Avec Netlogo, 71–110. ISTE, 2015.
3. Amblard, Frédéric, Eric Daudé, Benoit Gaudou, Arnaud Grignard, Guillaume Hutzler, Christophe Lang, N Marilleau, Jean-Marc Nicod, David Sheeren, and Patrick Taillandier. *"Introduction to Netlogo."*. In Simulation À Base D'agent Avec Netlogo, 71–110. ISTE, 2015.
4. Banos, Arnaud, Annabelle Boffet-Mas, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, and Thomas Thévenin. *"MIRO, Des Trajectoires Individuelles À La Ville En Mouvement."* In Modéliser La Ville : Formes Urbaines et Politiques de Transport, 216–45. Trans Flash, Bulletin d'information des déplacements urbains départementaux et régionaux, 2010.

5. Banos, Arnaud, Annabelle Boffet-Mas, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, and Thomas Thévenin. *"Simuler La Mobilité Urbaine Quotidienne : Le Projet MIRO."* In Mobilités Urbaines et Risques Des Transports - Approches Géographiques, edited by Arnaud Banos and Thomas Thévenin, 51–86, 2010.
6. Banos, Arnaud, Philippe Caillou, Benoit Gaudou, and **Nicolas Marilleau**. *"Exploration de Modèles Agent."* In Simulation À Base D'agent Avec Netlogo, 111–59. ISTE, 2015. Becu, Nicolas, Frédéric Amblard, Nicolas brax, Benoit Gaudou, and **Nicolas Marilleau**. *"How to Involve Stakeholders in the Modeling Process."* In Simulation À Base D'agent Avec Netlogo, ISTE., 199–223, 2015.
7. Becu, Nicolas, Frédéric Amblard, Nicolas brax, Benoit Gaudou, and **Nicolas Marilleau**. *"Vers Des Modèles Multi-Acteurs."* In Simulation À Base D'agent Avec Netlogo, ISTE., 199–223, 2015.
8. Bouquet, Fabrice, Sébastien Chipeaux, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, and Patrick Taillandier. *"Introduction À L'approche Agent."* In Simulation À Base D'agent Avec Netlogo, 13–34. ISTE, 2015.
9. Bouquet, Fabrice, David Sheeren, Nicolas Becu, Benoit Gaudou, C Lang, **Nicolas Marilleau**, and Claude Monteil. *"Description Formalisms in Agent Models."* In Description Formalisms in Agent Models, ISTE., 29–73, 2015.
10. Bouquet, Fabrice, David Sheeren, Nicolas Becu, Benoit Gaudou, C Lang, **Nicolas Marilleau**, and Claude Monteil. *"Formalismes de Description Des Modèles."* In Simulation À Base D'agent Avec Netlogo, ISTE., 35–69, 2015.
11. Gaudou, Benoit, **Nicolas Marilleau**, and Tuong Vinh Ho. *"Toward a Methodology of Collaborative Modeling and Simulation of Complex Systems."* In Intelligent Networking, Collaborative Systems and Applications, 27–53. Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Papier invité suite à Incos, Base ISI)
12. Laville, Guillaume, Christophe Lang, Bénédicte Herrmann, Laurent Philippe, Kamel Mazouzi, Franche-Comte Computing Center, and **Nicolas Marilleau**. *"Implementing Multi-Agent Systems on GPU."* In Designing Scientific Applications on GPUs, 415–40, 2013. (Papier invité, Base ISI)

6.3 Articles de revue indexés dans des bases internationales ou par l'AERES (7 publications)

1. Blanchart, Eric, **Nicolas Marilleau**, J-L Chotte, Alexis Drogoul, Edith Perrier, and Ch Cambier. *"SWORM : An Agent-Based Model to Simulate the Effect of Earthworms on Soil Structure.* European Journal of Soil Science 60, no. 1 (2009) : 13–21. (Impact Factor : 2.649 – Top 10 en 2012 , Base ISI)
2. Fosset, Pierre, Arnaud Banos, Elise Beck, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, Arnaud Piombini, et al. *"Exploring Intra-Urban Accessibi-*

lity and Impacts of Pollution Policies with an Agent-Based Simulation Platform : GaMiroD. Systems 4, no. 1 (2016) : 5. doi :10.3390/systems4010005. (Base DBLP)

3. Lammoglia, Adrien, Didier Josselin, and **Nicolas Marilleau**. *"Some Propositions to Find Optimal Conditions to Simulate a Flexible Transport Using an Agent-Based Model.* Cybergeo : European Journal of Geography, 2015. (Base AERES)
4. Laville, Guillaume, Christophe Lang, Bénédicte Herrmann, Laurent Philippe, Kamel Mazouzi, and **Nicolas Marilleau**. *"MCMAS : A Toolkit for Developing Agent-Based Simulations on Many-Core Architectures.* Multiagent and Grid Systems 11, no. 1 (2015) : 15–31. (Impact Factor : 0.33, base ISI)
5. **Marilleau, Nicolas**, Christophe Cambier, Alexis Drogoul, J-L Chotte, Edith Perrier, and Eric Blanchart. *"Multiscale MAS Modelling to Simulate the Soil Environment : Application to Soil Ecology.* Simulation Modelling Practice and Theory 16, no. 7 (2008) : 736–45 (Impact Factor : 1.421 ; base ISI).
6. **Marilleau, Nicolas**, Christophe Lang, Pascal Chatonnay, and Laurent Philippe. *"RAFALE-SP : A Methodology to Design and Simulate Geographical Mobility.* Stud. Inform. Univ. 10, no. 1 (2012) : 38–76. (Base DBLP)
7. Thierry, Hugo, David Sheeren, **Nicolas Marilleau**, Nathalie Corson, Marion Amalric, and Claude Monteil. *"From the Lotka–Volterra Model to a Spatialised Population-Driven Individual-Based Model.* Ecological Modelling 306 (2015) : 287–93. (Impact factor : 2.725 ; Base ISI)

6.4 Articles de conférences avec actes et comité de lecture (45 publications)

6.4.1 Publications en informatique en conférences indexées dans une base de données internationales et par l'AERES

1. Blanchart, Eric, Christophe Cambier, Clive Canape, Benoit Gaudou, T-N Ho, T-V Ho, Christophe Lang, Fabien Michel, **Nicolas Marilleau**, and Laurent Philippe. *"EPIS : A Grid Platform to Ease and Optimize Multi-Agent Simulators Running.* In Advances on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems, 129–34. Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Base ISI)
2. Nicolas Bécu, Marion Amalric, Brice Anselme, Elise Beck, Xavier Bertin, Etienne Delay, Nathalie Long, Corinne Manson, **Nicolas Marilleau**, Cécilia Pignon-Mussaud and Frédéric Rousseaux *"Participatory simulation of coastal flooding : building social learning on prevention measures with decision-makers"*. International Environmental Modelling and Software, Toulouse, 2016
3. Chipeaux, Sébastien, Fabrice Bouquet, Christophe Lang, and **Nicolas Marilleau**. *"Modelling of Complex Systems with AML as Realized in MIRO Project.* In Proceedings of the 2011 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology-Volume 03, 159–62. IEEE Computer Society, 2011. (Base IEEE Explore)

4. Drogoul, Alexis, Edouard Amouroux, Philippe Caillou, Benoit Gaudou, Arnaud Grignard, **Nicolas Marilleau**, Patrick Taillandier, Maroussia Vavasseur, Duc-An Vo, and Jean-Daniel Zucker. *"Gama : A Spatially Explicit, Multi-Level, Agent-Based Modeling and Simulation Platform.* In Advances on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, 271–74. Springer Berlin Heidelberg, 2013. (Base DBLP)
5. Drogoul, Alexis, Edouard Amouroux, Philippe Caillou, Benoit Gaudou, Arnaud Grignard, **Nicolas Marilleau**, Patrick Taillandier, Maroussia Vavasseur, Duc-An Vo, and Jean-Daniel Zucker. *"GAMA : Multi-Level and Complex Environment for Agent-Based Models and Simulations.* In Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1361–62. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2013. (base ACM)
6. Hassoumi, Ines, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, Moncef Temani, Khaled Ghedira, and Jean Daniel Zucker. *"Toward a Spatially-Centered Approach to Integrate Heterogeneous and Multi-Scales Urban Component Models.* In Advances on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, 81–86. Springer Berlin Heidelberg, 2012. Taux : 30
7. Ho The-Nhan, **Nicolas Marilleau**, Laurent Philippe, Hong-Quang Nguyen, and Jean-Daniel Zucker. *"A Grid-Based Multistage Algorithm for Parameter Simulation-Optimization of Complex System.* In Computing and Communication Technologies, Research, Innovation, and Vision for the Future (RIVF), 2013 IEEE RIVF International Conference on, 221–26. IEEE, 2013. (Base ISI)
8. Laville, Guillaume, Kamel Mazouzi, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, Bénédicte Herrmann, and Laurent Philippe. *"MCMAS : A Toolkit to Benefit from Many-Core Architecure in Agent-Based Simulation.* In Euro-Par 2013 : Parallel Processing Workshops, 544–54. Springer Berlin Heidelberg, 2013. (Base ISI)
9. Laville, Guillaume, Kamel Mazouzi, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, and Laurent Philippe. *"Using GPU for Multi-Agent Multi-Scale Simulations.* In Advances in Intelligent and Soft Computing, 197–204, 2012. (Base ISI)
10. Laville, Guillaume, Kamel Mazouzi, Christophe Lang, Laurent Philipppe, and **Nicolas Marilleau**. *"Using GPU for Multi-Agent Soil Simulation.* In Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP), 2013 21st Euromicro International Conference on, 392–99. IEEE, 2013. (Base ISI)
11. Laatabi A, **Nicolas Marilleau**, T Nguyen-Huu, H Hbid, MA Babram. *Formalizing Data to Agent Model Mapping Using MOF : Application to a Model of Residential Mobility in Marrakesh* In Agent and Multi-Agent Systems : Technology and Applications, vol 58, pp. 107-117, Springer, Spain 2016 (Base ISI)
12. Lucien Laurent, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau** and Laurent Philippe : *"Multiagent Hybrid Architecture for Collaborative Exchanges between Communicating Vehicles in an Urban Context.* ANT/SEIT, 695-699, Spain, 2016 (Base ISI)

Marilleau, Nicolas. *"An Agent Based Meta-Model for Urban Mobility Modeling.* In Distributed Frameworks for Multimedia Applications, 2005. DFMA–05. First International Conference on, 168–75. IEEE, 2005. (Base IEEE Explore)

13. **Marilleau, Nicolas**, Christophe Cambier, Alexis Drogoul, Jean-Luc Chotte, Edith Perrier, and Eric Blanchart. *"Environnement Multi-Échelles À Base de Fractales Pour La Modélisation Agent D'écosystèmes.* In JFSMA, 23–32, 2008. (Base DBLP)
14. **Marilleau, Nicolas**, Christophe Lang, Pascal Chatonnay, and Laurent Philippe. *"A Meta-Model of Group for Urban Mobility Modeling.* In Active Media Technology, 2005.(AMT 2005). Proceedings of the 2005 International Conference on, 397–400. IEEE, 2005. (Base IEEE Explore)
15. **Marilleau, Nicolas**, Christophe Lang, Pascal Chatonnay, and Laurent Philippe. *"An Agent Based Framework for Urban Mobility Simulation.* In Parallel, Distributed, and Network-Based Processing, 2006. PDP 2006. 14th Euromicro International, 7 pp. IEEE, 2006. (Base IEEE explore)
16. **Marilleau, Nicolas**, Christophe Lang, Pascal Chatonnay, and Laurent Philippe. *"Cognitive Perception in RAFALE-SP Methodology.* In Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2005 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, International Conference on, 2 :594–99. IEEE, 2005. (Base ISI)
17. Nguyen, Trong Khanh, Gaudou, Benoit, Tuong Vinh Ho, and **Nicolas Marilleau**. *"Introduce Collaboration in Methodologies of Modeling and Simulation of Complex Systems.* In Intelligent Networking and Collaborative Systems, 2009. INCOS'09. International Conference on, 1–8. IEEE, 2009. (Base ISI)
18. Nguyen, Trong Khanh, **Nicolas Marilleau**, and Tuong Vinh Ho. *"Pams–a New Collaborative Framework for Agent-Based Simulation of Complex Systems.* In Intelligent Agents and Multi-Agent Systems, 287–94. Springer Berlin Heidelberg, 2008. (Bases ISI)
19. Nguyen, Trong Khanh, **Nicolas Marilleau**, Tuong Vinh Ho, and Amal El Fallah. *"Method Supporting Collaboration in Complex System Participatory Simulation.* In Proceedings of the Fourth Symposium on Information and Communication Technology, 61–70. ACM, 2013. (Bases ACM)
20. Nguyen, Trong Khanh, **Nicolas Marilleau**, Tuong Vinh Ho, and Amal El Fallah. *"New Protocol Supporting Collaborative Simulation.* In Proceedings of the Second Symposium on Information and Communication Technology, 137–45. ACM, 2011. (Bases ACM)
21. Nguyen, Trong Khanh, **Nicolas Marilleau**, Tuong Vinh Ho, and Amal El Fallah Seghrouchni. *"A Meta-Model for Specifying Collaborative Simulation.* In Computing and Communication Technologies, Research, Innovation, and Vision for the Future (RIVF), 2010 IEEE RIVF International Conference on, 1–4. IEEE, 2010. (Base IEEE Explore)

22. Pretre, Vincent, Christophe Lang, Jc Lapayre, and **Nicolas Marilleau**. *"A Video Transmission Framework Using Components and Multi-Agent Systems.* In Distributed Frameworks for Multimedia Applications, 2006. The 2nd International Conference on, 1–7. IEEE, 2006. (Base IEEE Explore)
23. Trong, Khanh Nguyen, Benoit Gaudou, Tuong Vinh Ho, and **Nicolas Marilleau**. *"Application of Pams Collaboration Platform to Simulation-Based Researches in Soil Science : The Case of the Micro-Organism Project.* In Computing and Communication Technologies, 2009. RIVF'09. International Conference on, 1–8, 2009. (Base ISI)
24. Philippon Damien , Alexis Drogoul, **Nicolas Marilleau**, Benoit Gaudou, Marc Choisy, Patrick Taillandier, Quang T. Chi. *"Exploring trade and health policies influence on Dengue spread with an Agent-Based Model"* In Multi-Agent-Based Simulation Workshop, Singapour, 2016 (Base ISI)
25. Taillandier Patrick, Arnaud Banos, Alexis Drogoul, Benoit Gaudou, *Nicolas Marilleau*, and Quang Chi Truong. *"Simulating Urban Growth with Raster and Vector models : A case study for the city of Can Tho, Vietnam"*. In ABMUS, Singapour, 2016 (Base ISI)

6.4.2 Publications pluridisciplinaires en conférences avec actes et comités de lecture

1. Banos, Arnaud, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, and Thomas Thévenin. *"Simulating the Swarm City : A MAS Approach.* In CUPUM'05 Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, 1–17, 2005. Best award
2. Banos, Arnaud, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, and Thomas Thévenin. *"Modéliser et Simuler –La Fourmilière Urbaine– Par Les Systèmes Multi-Agent.* In Colloque SAGEO, 1–21, 2005.
3. Banos, A, and **Nicolas Marilleau**. *"MIRO Team : Improving Individual Accessibility to the City : An Agent-Based Modelling Approach.* In Proc. Of ECCS, Bruxelles, 2012. Banos, Arnaud, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, **Nicolas Marilleau**, and Thomas Thévenin. *"Une Approche Multi-Agents de La Ville En Mouvement.* In Colloque SMAGET, 1–17, 2005.
4. Beurier, G, C Cambier, N Marilleau, E Perrier, and R Duponnois. *"Agent-Based Models to Address the Spatial Complexity of Biological and Physical Interactions in Soils.* In EGU General Assembly Conference Abstracts, 11 :12598, 2009.
5. Chardonnel, Sonia, Thomas Thévenin, Arnaud Banos, **Nicolas Marilleau**, and Christophe Lang. *"Exploring Activities for Simulating Everyday Rythms and Routines in French Urban Areas."* In Association of American Geographers Conference,2013.
6. Emery, Justin, **Nicolas Marilleau**, Thomas Thevenin, and Nadège Martiny. *"Du Comptage Ponctuel À L'affectation Par Simulation Multi-Agents : Application À*

La Circulation Routière de La Ville de Dijon. In Conférence Internationale de Géomatique et D'analyse Spatiale (SAGEO), CD-ROM, 2014.

7. Emery, Justin, **Nicolas Marilleau**, Nadège Martiny, and Thomas Thevenin. *"L'apport de La Simulation Multi-Agent Du Trafic Routier Pour L'estimation Des Émissions Automobiles.* Besancon, 2015.
8. Emery, Justin, Joseph Boyard-Micheau, **Nicolas Marilleau**, Nadège Martiny, Thomas Thévenin, and others. *"Exploitation of Traffic Counting Data for Traffic Study in Urban Areas : From Traffic Assignment to Simulation Model Validation.* In 18th European Colloquium in Theoretical and Quantitative Geography (ECTQG), 2013.
9. Josselin, Didier, Adrien Lammoglia, and **Nicolas Marilleau**. *"Using a Multi-Agent-System to Assess the Sensitivity of a Flexible Transport.* In Transport Research Arena (TRA) 5th Conference : Transport Solutions from Research to Deployment, 2014.
10. Lammoglia, Adrien, **Nicolas Marilleau**, and Didier Josselin. *"How to Assess the Robustness of a Flexible Transport Using an Agent Based Model : Some Observations on Optimal Conditions of Simulation,* 2011.
11. Leguedois, Sophie, Eric Blanchart, **Nicolas Marilleau**, Christophe Cambier, Yvan Capowiez, Jérôme Cortet, Edith Perrier, and Christophe Schwartz. *"SWORM : Un Outil Pour La Modélisation Du Système Complexe Sol-Macrofaune. Vers Une Application Pour L'optimisation Des Techniques de Réhabilitation de Sol Par Construction.* In 1. Conférence Modélisation Mathématique et Informatique Des Systèmes Complexes CoMMISCo'10. 2010-10-112010-10-13, Bondy, FRA, 2010.
12. Leguédois, Sophie, **Nicolas Marilleau**, Christophe Cambier, Yvan Capowiez, Jérôme Cortet, Robin Duponnois, Edith Perrier, et al. *"A 3D Multi-Scale Virtual Structure to Model and Simulate Concurrent Processes of Soil Evolution.* In 4. International Congress Eurosoil 2012-Soil Science for the Benefit of Mankind and Environment. 2012-07-022012-07-06, Bari, ITA, 2012.
13. Leguedois, Sophie, **Nicolas Marilleau**, Jean Rémi TOGUEBAYE, Nouhou-Salifou Jangorzo, Françoise Watteau, and Christophe Schwartz. *"Évaluation Du Modèle APSF Pour Représenter La Structure Des Sols et Sa Dynamique.* In 1. Journées Matériaux Numériques. De La Numérisation Au Comportement. 2013-02-122013-02-14, Loches, FRA, 2013.
14. **Marilleau, Nicolas**, Christophe Lang, Pascal Chatonnay, and Laurent Philippe. *"Un Méta-Modèle À Base D'agents Pour Modéliser La Mobilité Urbaine.* In 3 Éme Conférence International : SETIT, Tunisie, 2005.
15. **Marilleau, Nicolas**, Christophe Lang, and Patrick Giraudoux. *"Modélisation Agents Des Phénomènes Écologiques Spatialisés.* In Journées de Modélisation Biomathématique de Besançon, 2015.
16. **Marilleau, Nicolas**, Hong Quang NGUYEN, Jean-Daniel Zucker, and others. *"Couplage D'algorithmes D'optimisation Par Un SMA Pour L'exploration Distri-*

buée de Simulateurs Complexes : Application À L'épidémiologie. In Conférence D'informatique En Parallélisme, Architecture et Système 2014, 2014.

17. **Marilleau, Nicolas**, Thomas Thévenin, Arnaud Banos, S Chardonnel, C Lang, and A Boffet-Mas. *"Génération D'emplois Du Temps Individuels Pour Une Simulation Multi-Agents Des Mobilités Urbaines Quotidiennes.* In Actes Du Colloque SAGEO, 2006.
18. Thévenin, Thomas, Sonia Chardonnel, Arnaud Banos, **Nicolas Marilleau**, Christophe Lang, and others. *"From the Household Survey to an Individual Activity Program : A MAS Approach.* In Association of American Geographers Conference, 2006.
19. Trong, Khanh Nguyen, Tuong Vinh Ho, **Nicolas Marilleau**, and Benoit Gaudou. *"PAMS-Môi Truong Cong Tác Cho Mô Hình Hóa Các He Thong Phuc Tap."* The Fourth National Symposium Fundamental and Applied Information Technology Research, 2009, 1–8.

Bibliographie

[1] Frédéric Amblard and Denis Phan. Modélisation et simulation multi-agents. *Science informatique et SHS*, 2006.

[2] Jean-Philippe Antoni and Gilles Vuidel. Mobisim : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines. *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, pages 50–77, 2010.

[3] Michel Armatte. La notion de modèle dans les sciences sociales : anciennes et nouvelles significations. *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences*, 172, 2005.

[4] Jeffrey G Arnold, Daniel N Moriasi, Philip W Gassman, Karim C Abbaspour, Michael J White, Raghavan Srinivasan, Chinnasamy Santhi, RD Harmel, Ann Van Griensven, Michael W Van Liew, et al. Swat : Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4) :1491–1508, 2012.

[5] Muhammad Usman Awais, Wolfgang Mueller, Atiyah Elsheikh, Peter Palensky, and Edmund Widl. Using the hla for distributed continuous simulations. In *Modelling and Simulation (EUROSIM), 2013 8th EUROSIM Congress on*, pages 544–549. IEEE, 2013.

[6] Robert Axelrod. Advancing the art of simulation in the social sciences. In *Simulating social phenomena*, pages 21–40. Springer, 1997.

[7] Tristan Babey, Jean-Raynald De Dreuzy, Marc Pinhiero, Patricia Garnier, Laure Vieublé, and Alain Rapaport. Modeling the impact of heterogeneous spatial distribution of soil microbes on pesticide biodegradation at the centimeter scale. In *American Geophysical Union Fall Meeting (AGU 2015)*, 2015.

[8] Arnaud Banos. *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et SHS*. PhD thesis, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 2013.

[9] Arnaud Banos, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, Nicolas Marilleau, and Thomas Thévenin. Simulating the swarming city : a mas approach. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*, pages 29–30, 2005.

[10] Arnaud Banos, Nathalie Corson, Benoit Gaudou, Vincent Laperrière, and Sébastien Rey Coyrehourcq. Coupling micro and macro dynamics models on networks : Application to disease spread. In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 19–33. Springer, 2015.

[11] Arnaud Banos, Christophe Lang, and Nicolas Marilleau. *Simulation spatiale à base d'agents avec NetLogo 1 : introduction et bases*. iste-editions, 2015.

[12] Arnaud Banos, Nicolas Marilleau, MIRO Team, et al. Improving individual accessibility to the city. In *Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012*, pages 989–992. Springer, 2013.

[13] N. Becu, F. Amblard, N. Brax, B. Gaudou, and Nicolas Marilleau. Vers des modèles multi-acteurs. In *Simulation spatiale à base d'agents avec NetLogo 1 : introduction et bases*, pages 201–225. ISTE, 2015.

[14] Nicolas Becu, Nathalie Frascaria-Lacoste, and Julie Latune. Experiential learning based on the newdistrict asymmetric simulation game : results of a dozen gameplay sessions. In *Hybrid Simulation & Gaming in the Networked Society : The 46th ISAGA Annual Conference 2015*, 2015.

[15] JE Bergez, F Garcia, and H Raynal. Record : an integrated framework to build, evaluate and simulate cropping systems. In *Agro2010'the 11th ESA Congress. Agropolis International Editions, Montpellier*, pages 929–930, 2010.

[16] Eric Blanchart, Christophe Cambier, Clive Canape, Benoit Gaudou, T-N Ho, T-V Ho, Christophe Lang, Fabien Michel, Nicolas Marilleau, and Laurent Philippe. Epis : a grid platform to ease and optimize multi-agent simulators running. In *Advances on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*, pages 129–134. Springer, 2011.

[17] Eric Blanchart, Nicolas Marilleau, J-L Chotte, Alexis Drogoul, Edith Perrier, and Ch Cambier. Sworm : an agent-based model to simulate the effect of earthworms on soil structure. *European Journal of Soil Science*, 60(1) :13–21, 2009.

[18] J. Blot, C. Pierdet, Rajaonarivo L., Cambier C., and al. Impact of climate and urban changes on health risk : presentation of a research methodology on the spread of dengue in phnom penh (cambodia) and can tho (vietnam). In *SEAGA international conference, Geography that matters*, 2014.

[19] Sergiy Bogomolov, Marius Greitschus, Peter G Jensen, Kim G Larsen, Marius Mikučionis, Thomas Strump, and Stavros Tripakis. Co-simulation of hybrid systems with spaceex and uppaal. In *Proceedings of the 11th International Modelica Conference, Versailles, France, September 21-23, 2015*, volume 118, pages 159–169. Linköping University Electronic Press, 2015.

[20] Pierre Bommel, Nicolas Bécu, Christophe Le Page, and François Bousquet. an agent-based simulation platform for coupling human decisions with computerized dynamics. In *the 46th ISAGA conference*, pages 6.18.3 – 6.18.27, 2015.

[21] François Bousquet, Innocent Bakam, Hubert Proton, and Christophe Le Page. Cormas : common-pool resources and multi-agent systems. In *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*, pages 826–837. Springer, 1998.

[22] Nicolas Bécu, Marion Amalric, Brice Anselme, Elise Beck, Xavier Bertin, Etienne Delay, Nathalie Long, Corinne Manson, Nicolas Marilleau, Cécilia Pignon-Mussaud, and Frédéric Rousseaux. Participatory simulation of coastal flooding : building social learning on prevention measures with decision-makers. In *8th International Congress on Environmental Modelling and Software*, Toulouse, France, 2016. a paraître.

[23] Benoît Calvez and Guillaume Hutzler. Automatic tuning of agent-based models using genetic algorithms. In *Proceedings of the 6th international conference on Multi-Agent-Based Simulation*, MABS'05, pages 41–57. Springer, 2006.

[24] Clara Champagne, David G Salthouse, Richard Paul, Van-Mai Cao-Lormeau, Benjamin Roche, and Bernard Cazelles. Structure in the variability of the basic reproductive number (r0) for zika epidemics in the pacific islands. *bioRxiv*, page 064949, 2016.

[25] Laetitia Chapel, Guillaume Deffuant, Sophie Martin, and Christian Mullon. Defining yield policies in a viability approach. *Ecological Modelling*, 212(1) :10–15, 2008.

[26] LS Chin, DJ Worth, C Greenough, S Coakley, M Holcombe, and M Gheorghe. Flame-ii : a redesign of the flexible large-scale agent-based modelling environment. Technical report, Technical report, 2012.

[27] Sébastien Chipeaux. *Génération automatique de systèmes multi-agents à partir de modèle pour la simulation de systèmes complexes géographiques à entités mobiles - Application au projet Micro 2.* PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2013.

[28] Simon Coakley, Marian Gheorghe, Mike Holcombe, Shawn Chin, David Worth, and Chris Greenough. Exploitation of high performance computing in the flame agent-based simulation framework. In *High Performance Computing and Communication & 2012 IEEE 9th International Conference on Embedded Software and Systems (HPCC-ICESS), 2012 IEEE 14th International Conference on*, pages 538–545. IEEE, 2012.

[29] Nicholson Collier and Michael North. *Repast HPC : A platform for large-scale agentbased modeling.* Wiley, 2011.

[30] Nicholson Collier, Jonathan Ozik, and Charles M Macal. Large-scale agent-based modeling with repast hpc : A case study in parallelizing an agent-based model. In *European Conference on Parallel Processing*, pages 454–465. Springer, 2015.

[31] Collectif ComMod. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures Sciences Sociétés*, 13(2) :165–168, 2005.

[32] Patrick Coquillard, David RC Hill, and T Sime-Ngando. *Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets*. Masson Paris, 1997.

[33] G. Deffuant, A. Banos, D. Chavalarias, C. Bertelle, N. Brodu, P. Jensen, A. Lesne, J.P. Müller, E. Perrier, and F. Varenne. Visions of complexity. New challenges for revisited Laplace's demon. *Natures Sciences Sociétés*, 23(1) :42–53, 2015.

[34] Guillaume Deffuant, Arnaud Banos, David Chavalarias, Cyrille Bertelle, Nicolas Brodu, Pablo Jensen, Annick Lesne, Jean-Pierre Müller, Édith Perrier, and Franck Varenne. Visions de la complexité. le démon de laplace dans tous ses états. *Natures Sciences Sociétés*, 23(1) :42–53, 2015.

[35] Pierre Delattre. Recherches interdisciplinaires. *Encyclopaedia Universalis*, 9 :1261–1266, 1984.

[36] Hadja Maïmouna Diagne. Distribution de l'application sworm. Master's thesis, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 2010.

[37] Alexis Drogoul, Edouard Amouroux, Philippe Caillou, Benoit Gaudou, Arnaud Grignard, Nicolas Marilleau, Patrick Taillandier, Maroussia Vavaseur, Duc-An Vo, and Jean-Daniel Zucker. GAMA : multi-level and complex environment for agent-based models and simulations (demonstration). In *international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 1361–1362, United States, 2013.

[38] B. Edmonds and S. Moss. "from kiss to kids : An" anti-simplistic" modeling approach". In *MABS 2004*, pages 130–144, 2004.

[39] Clarence A Ellis, Simon J Gibbs, and Gail Rein. Groupware : some issues and experiences. *Communications of the ACM*, 34(1) :39–58, 1991.

[40] Justin Emery, Nicolas Marilleau, Nadège Martiny, Thomas Thévenin, Julien Villery, and AASQA Atmosf ?air Bourgogne. L ?apport de la simulation multi-agent du trafic routier pour l ?estimation des pollutions atmosphériques automobiles. In *Douzièmes Rencontres de Théo Quant*, 2015.

[41] Michel Étienne. *La modélisation d'accompagnement : une démarche participative en appui au développement durable*. Editions Quae, 2010.

[42] Jacques Ferber. *Multi-agent systems - an introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley-Longman, 1999.

[43] Nils Ferrand, Stefano Farolfi, Géraldine Abrami, and Derick Du Toit. Wat-a-game : sharing water and policies in your own basin. In *Learn to Game, Game to Learn ?, International Simulation And Gaming Association 40th Annual Conference*. Citeseer, 2009.

[44] Sébastien Fontaine and Sébastien Barot. Size and functional diversity of microbe populations control plant persistence and long-term soil carbon accumulation. *Ecology Letters*, 8(10) :1075–1087, 2005.

[45] Pierre Fosset, Arnaud Banos, Elise Beck, Sonia Chardonnel, Christophe Lang, Nicolas Marilleau, Arnaud Piombini, Thomas Leysens, Alexis Conesa, Isabelle Andre-Poyaud, et al. Exploring intra-urban accessibility and impacts of pollution policies with an agent-based simulation platform : Gamirod. *Systems*, 4(1) :5, 2016.

[46] Martin Fowler. *Domain-specific languages*. Pearson Education, 2010.

[47] Fanny Gascuel, Marc Choisy, Jean-Marc Duplantier, Florence Débarre, and Carine Brouat. Host resistance, population structure and the long-term persistence of bubonic plague : contributions of a modelling approach in the malagasy focus. *PLOS Comput Biol*, 9(5) :e1003039, 2013.

[48] Michael J. Gibson, Edward C. Keedwell, and Dragan A. Savi ? An investigation of the efficient implementation of cellular automata on multi-core {CPU} and {GPU} hardware. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 77 :11 – 25, 2015.

[49] Jean-Marc Ginoux. *Stabilité de Systèmes Dynamiques Chaotiques et Variétés Singulières*. PhD thesis, Université du Sud Toulon Var, 2005.

[50] Volker Grimm, Uta Berger, Donald L DeAngelis, J Gary Polhill, Jarl Giske, and Steven F Railsback. The odd protocol : a review and first update. *Ecological modelling*, 221(23) :2760–2768, 2010.

[51] P.M. Groffman and C.G. Jones. Soil processes and global change : will invertebrates make a difference ? In D.C. Coleman and P.F. Hendrix, editors, *Invertebrates as webmasters in ecosystems*, pages 313–326. CABI Publishing, Wallingford, 2000.

[52] H Morales Grosskopf, JF Tourrand, D Bartaburu, F Dieguez, P Bommel, J Corral, E Montes, M Pereira, E Duarte, and P Hegedus. Use of simulations to enhance knowledge integration and livestock producers ? adaptation to variability in the climate in northern uruguay. *The Rangeland Journal*, 37(4) :425–432, 2015.

[53] Inès Hassoumi. *Approche multi-agents de couplage de modèles pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux : application à l'aménagement urbain de la ville de Métouia. (Coupling multi-agent based approach for modeling spatial complex systems : application to urban planning of the city of Metouia)*. PhD thesis, Pierre and Marie Curie University, Paris, France, 2015.

[54] Inès Hassoumi. *Coupling multi-agent based approach for modeling spatial complex systems : application to urban planning of the city of Metouia.* Theses, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, January 2015.

[55] Inès Hassoumi, Christophe Lang, Nicolas Marilleau, Moncef Temani, Khaled Ghédira, and Jean-Daniel Zucker. Toward a spatially-centered approach to integrate heterogeneous and multi-scales urban component models. In *Advances on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems - 10th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, PAAMS 2012, Salamanca, Spain, 28-30 March, 2012*, pages 81–86, 2012.

[56] Everton Hermann, Bruno Raffin, François Faure, Thierry Gautier, and Jérémie Allard. Multi-gpu and multi-cpu parallelization for interactive physics simulations. In *European Conference on Parallel Processing*, pages 235–246. Springer, 2010.

[57] Emmanuel Hermellin and Fabien Michel. Toward a methodology for developing mabs using gpu programming. In *To appear in Proceedings of the 15th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2016), Singapore, May 9-13, 2016*, page full paper. IFAAMAS, 2016.

[58] S. Hiwa, T. Hiroyasu, and M. Miki. Hybrid optimization using direct, ga, and sqp for global exploration. In *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, pages 1709–1716, 2007.

[59] The Nhan Ho. *Exploration et apprentissage parallélisée de paramètres de la simulation multiagents haute performance de systèmes complexes pour l'aide a la décision environnementale.* PhD thesis, UPMC, Paris, 2016.

[60] Diederik Jacques, Fréderic Gérard, Uli Mayer, Jirka Simunek, and Bertrand Leterme. Generic reactive transport codes as flexible tools to integrate soil organic matter degradation models with water, transport and geochemistry in soils. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 18, page 14182, 2016.

[61] DS Jenkinson and LC Parry. The nitrogen cycle in the broadbalk wheat experiment : a model for the turnover of nitrogen through the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(4) :535–541, 1989.

[62] Jean-Daniel Kant. *MÉMOIRE D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES.* PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2015.

[63] Leslie Lamport. Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system. *Communications of the ACM*, 21(7) :558–565, 1978.

[64] Guillaume Laville. *Exécution efficace de systèmes Multi-Agents sur GPU.* PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2014. Thèse de doctorat dirigée par Philippe, Laurent Informatique Besançon 2014.

[65] Guillaume Laville, Kamel Mazouzi, Christophe Lang, Laurent Philippe, and Nicolas Marilleau. Using GPU for Multi-agent Soil Simulation. In *PDP 2013, 21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Computing*, pages 392–399, Belfast, Ireland, 2013. IEEE Computer Society Press.

[66] Alfred J Lotka. Elements of physical biology, reprinted 1956 as elements of mathematical biology, 1924.

[67] Nicolas Marilleau, Christophe Cambier, Alexis Drogoul, J-L Chotte, Edith Perrier, and Eric Blanchart. Multiscale mas modelling to simulate the soil environment : Application to soil ecology. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(7) :736–745, 2008.

[68] Nicolas Marilleau, Christophe Lang, Pascal Chatonnay, and Laurent Philippe. Rafale-sp : a methodology to design and simulate geographical mobility. *Stud. Inform. Univ.*, 10(1) :38–76, 2012.

[69] Dominique Masse, Christophe Cambier, Alain Brauman, Saïdou Sall, Komi Assigbetse, and Jean-Luc Chotte. MIOR : an individual-based model for simulating the spatial patterns of soil organic matter microbial decomposition. *European Journal of Soil Science*, 58(5) :1127–1135, 2007.

[70] K Mayer, R Amos, S Molins, and Frederic Gerard. Reactive transport modeling in variably saturated media with min3p : Basic model formulation and model enhancements. *Groundwater Reactive Transport Models*, pages 186–211, 2012.

[71] Amina Ameur Medjbeur, Sophie Leguedois, Nicolas Marilleau, Nicolas Bredèche, and Françoise Watteau. Modélisation en 3d de la structure d ?un sol : Analyse de sensibilité et évaluation de l ?approche apsf. In *12. Journées d'Etude des Sols (JES)*, page np, 2014.

[72] Gerard Meurant. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic press, 2012.

[73] Fabien Michel. *Approches environnement-centrées pour la simulation de systèmes multi-agents. Pour un déplacement de la complexité des agents vers l'environnement.* PhD thesis, Université de Montpellier, 2015.

[74] Edgar Morin. Sur l ?interdisciplinarité. *Bulletin interactif du Centre international de recherches et études transdisciplinaires*, 2(2), 1994.

[75] Jean-Pierre Muller. La notion de cadre conceptuel de modélisation : penser la place des ontologies dans le processus de modélisation. In *16èmes Journées de Rochebrune. Rencontres Interdisciplinaires sur les Systèmes Complexes Naturels et Artificiels "Ontologie et dynamique des systèmes complexes, perspectives interdisciplinaires"*, page 11, Rochebrune, France, 2009.

[76] James D Murray. Mathematical biology i : An introduction, vol. 17 of interdisciplinary applied mathematics, 2002.

[77] Susan L Neitsch, JR Williams, JG Arnold, and JR Kiniry. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Technical report, Texas Water Resources Institute, 2011.

[78] Trong Khanh Nguyen, Nicolas Marilleau, and Tuong Vinh Ho. Pams–a new collaborative framework for agent-based simulation of complex systems. In *Pacific Rim International Conference on Multi-Agents*, pages 287–294. Springer, 2008.

[79] Trong Khanh Nguyen, Nicolas Marilleau, Tuong Vinh Ho, and Amal El Fallah. Method supporting collaboration in complex system participatory simulation. In *Proceedings of the Fourth Symposium on Information and Communication Technology*, pages 61–70. ACM, 2013.

[80] Khanh Nguyen Trong. *Elaboration d ?un processus et conception d ?outils pour introduire la collaboration dans la simulation.* PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2013.

[81] Basarab Nicolescu. La transdisciplinarité. *Monaco : Editions du Rocher*, 1996.

[82] Basarab Nicolescu. La transdisciplinarité. *Monaco : Editions du Rocher*, 1996.

[83] Michael J North, Nicholson T Collier, Jonathan Ozik, Eric R Tatara, Charles M Macal, Mark Bragen, and Pam Sydelko. Complex adaptive systems modeling with repast simphony. *Complex adaptive systems modeling*, 1(1) :1, 2013.

[84] M.J. North, N.T. Collier, and J.R. Vos. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 16(1) :1–25, 2006.

[85] Michel Occello, Jean-Luc Koning, and Christophe Baeijis. Conception des système multi-agent : quelques éléments de réflexion méthodologique. *Technique et science informatique*, 20(2) :233–263, 2001.

[86] Marc Pansu, P Bottner, and L Sarmiento. Micro-organismes et matière organique du sol (modèle momos) : bilan de 20 ans de modélisation basée sur le traçage isotopique in situ. *Etude et Gestion des Sols*, 16 :213–232, 2009.

[87] Edith Perrier, Nigel Bird, and Michel Rieu. Generalizing the fractal model of soil structure : The pore–solid fractal approach. *Geoderma*, 88(3) :137–164, 1999.

[88] Damien Philippon, Marc Choisy, Alexis Drogoul, Benoit Gaudou, Nicolas Marilleau, Patrick Taillandier, and Quang Chi Truong. Exploring trade and health policies influence on dengue spread with an agent-based model. In *7th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation*, pages 84–98, Singapore, 2016.

[89] Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement (Paris). and Leo Apostel. *L Interdisciplinarité : problèmes d'enseignement et de recherche dans les Universités (rapport fondé sur les résultats d'un séminaire organisé par le CERI en collab. du Ministère de l'Education National à l'Université de Nice du 7 au 12 sept. 1970.* Organisation de coopération et de développement économique, 1972.

[90] DS Powlson, P Smith, and JU Smith. Evaluation of soil organic matter models. nato ansi series. *Global Environmental Change*, 38, 1996.

[91] Gauthier Quesnel, Raphaël Duboz, David Versmisse, and E Ramat. Devs coupling of spatial and ordinary differential equations : Vle framework. *OICIMS*, 5 :281–294, 2005.

[92] Daniel Reed. Parallel discrete event simulation : The chandy-misra approach. In *SCS Multiconference on Distributed Simulation*, pages 8–13, 1988.

[93] Romain Reuillon, Mathieu Leclaire, and Sebastien Rey-Coyrehourcq. OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer Systems*, 29(8) :1981–1990, oct 2013.

[94] Alban Rousset, Bénédicte Herrmann, Christophe Lang, Laurent Philippe, and Hadrien Bride. Using nested graphs to distribute parallel and distributed multi-agent systems. In *international conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing (PDP2016).* Conference Publishing Services (CPS), 2016.

[95] C Sanogo, S Ben Miled, and N Raissi. Viability analysis of multi-fishery. *Acta biotheoretica*, 60(1-2) :189–207, 2012.

[96] Bruno Sareni. *Multimodal optimization methods related to numerical modeling in electromagnetics.* Theses, Ecole Centrale de Lyon, January 1999.

[97] Clara Schmitt. *Modeling settlements systems dynamics : from SimpopLocal to SimpopNet.* Theses, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, February 2014.

[98] David Sheeren, Nicolas Becu, Marion Amalric, Arnaud Banos, Nathalie Corson, and Nicolas Marilleau. Recueil de fiches pédagogiques du réseau maps, 2014.

[99] S K Smit and A E Eiben. Comparing parameter tuning methods for evolutionary algorithms. In *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pages 399–406. IEEE, 2009.

[100] Forrest J Stonedahl. *Genetic Algorithms for the Exploration of Parameter Spaces in Agent-Based Models.* PhD thesis, NORTHWESTERN UNIVERSITY, 2011.

[101] Patrick Taillandier. GAMAGraM : Modélisation Graphique sous GAMA. In *Masyco 2013*, France, 2013.

[102] Hugo Thierry, David Sheeren, Nicolas Marilleau, Nathalie Corson, Marion Amalric, and Claude Monteil. From the lotka-volterra model to a spatialised population-driven individual-based model. *Ecological Modelling*, 306 :287 – 293, 2015. Special Issue : Ecological Modelling for Ecosystem Sustainability : Selected papers presented at the 19th {ISEM} Conference, 28-31 October 2013, Toulouse, France.

[103] Jean-Pierre Treuil, Alexis Drogoul, and Jean-Daniel Zucker. Modélisation et simulation à base d'agents. *Exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques. Dunod*, 2008.

[104] Franck Varenne, Marc Silberstein, Sébastien Dutreuil, and Philippe Huneman. *Modéliser et simuler : épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*. Ed. Matériologiques, 2014.

[105] V. Volterra. Une théorie mathématique de la lutte pour la vie. *Scientia*, 21(41) :33, 1927.

[106] Vito Volterra. Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together. *J. Cons. Int. Explor. Mer*, 3(1) :3–51, 1928.

[107] Barbara Walkiewicz. L ?interdisciplinarité dans la traduction spécialisée. *Studia Romanica Posnaniensia*, 43(1) :125–141, 2016.

[108] Uri Wilensky and William Rand. *An introduction to agent-based modeling : modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. MIT Press, 2015.

[109] Yonghong Yan and Barbara Chapman. Comparative study of distributed resource management systems–sge, lsf, pbs pro, and loadleveler. Technical report, University of Houston, 2008.

[110] Bernard P Zeigler. Hierarchical, modular discrete-event modelling in an object-oriented environment. *Simulation*, 49(5) :219–230, 1987.

[111] Bernard P Zeigler, Yoonkeon Moon, Doohwan Kim, and George Ball. The devs environment for high-performance modeling and simulation. *IEEE Computational Science & Engineering*, 4(3) :61–71, 1997.