

Dossier d'HDR

Habilitation à Diriger des Recherches

Université de Montpellier, LIRMM

Campagnes de printemps 2019-2020

**Modélisation participative et simulation interactive
pour accompagner la gestion des communs**

Pierre Bommel

chercheur au CIRAD, UPR Green, Montpellier, France

chercheur associé au CATIE, Turrialba, Costa Rica

HDR soutenue le 22 avril 2020, devant le jury composé de :

- Marie-Paule BONNET, directrice de recherche à l'IRD (présidente du jury)
- Marco JANSSEN, Professor at Arizona State University (rapporteur)
- Nigel GILBERT, Professor at University of Surrey (rapporteur)
- Éric RAMAT, professeur à l'Université du Littoral – Côte d'Opale (rapporteur)
- Jean-Pierre BRIOT, directeur de recherche at CNRS, LIP6 (examineur)
- Moira ZELLNER, Associate Professor at University of Illinois at Chicago (examinatrice)
- Martine ANTONA, chercheure au CIRAD (examinatrice)
- Fabien MICHEL, maître de conférence HDR au LIRMM (réfèrent)
- David CROOKALL, professeur à l'Université Côte d'Azur (invité)

22 avril 2020

Table des matières

1. Introduction : à la recherche d'un fil conducteur.....	4
2. Contexte : la modélisation participative pour l'apprentissage social et la gestion des ressources renouvelables.	6
2.1. L'unité GREEN propose une approche originale de la viabilité.....	6
2.2. ComMod, la Modélisation d'Accompagnement.....	9
3. La modélisation multi-agent pour simuler les socio-éco- systèmes.....	12
3.1. Les écoles de pensée en sociologie.....	12
L'individualisme méthodologique.....	12
Le holisme méthodologique	13
Les dépendances réciproques	14
L'habitus.....	15
3.2. Positionnement des SMA vis-à-vis des écoles de pensée en sociologie ..	15
4. Cormas, une plateforme de modélisation en appui à l'approche ComMod	21
4.1. Origines et spécificités de Cormas.....	21
4.2. Pourquoi Smalltalk ?	22
4.3. Structure et fonctionnement de Cormas.....	23
4.4. Vraiment des agents ?	27
4.5. Gestion du temps et des interactions	30
4.6. Du modèle au jeu et du jeu au modèle.....	33
4.7. Modèles de simulation à base d'agents hybrides.....	35
5. Les évolutions de la plateforme Cormas.....	39
5.1. Des développements orientés vers la conception et l'utilisation de modèles hybrides	39
5.2. Aide à la conception d'un modèle	41
5.3. Point de vue et multi fenêtrage.....	44
5.4. Interaction avec la simulation.....	47
5.5. Exploration de modèles.....	48
5.6. Simulations distribuées	50
5.7. Diagramme d'activités exécutable	51
5.8. La rétro-simulation pour voyager dans le temps.....	52
6. Modèles développés avec Cormas.....	54
6.1. Liste des modèles développés	54
6.2. <i>SequiaBasalto</i> : adaptation des éleveurs aux changements climatiques en Uruguay	58
6.3. <i>VarzeaViva</i> : défense d'un territoire amazonien	61

7. Sessions de formation.....	66
8. Projet de recherche.....	68
8.1. Une recherche ciblée sur “Les Communs” : ce qui nous lie.....	68
La tragédie des communs, un modèle hégémonique.....	68
Des expériences de la Tragédie des Communs à travers le jeu Fishbanks.....	70
Des alternatives réelles pour “Gouverner les Communs”	71
Conclusion : vers une recherche pour accompagner la gestion collective des communs	72
8.2. Développer des outils pour accompagner la gestion des communs.....	75
Cormas in 10 years!.....	75
Cormas Pharo.....	77
8.3. UML, le langage de la modélisation pour l’interdisciplinarité	79
8.4. Simulation et théâtre-forum : Et si j’avais agi autrement ?	80
8.5. Conclusion : Transmettre	81
Références.....	82

Résumé des thèmes et du projet de recherche

Chercheur au CIRAD depuis 2001, mes recherches s'orientent vers la modélisation participative. Cela consiste à mettre en place des démarches prospectives appuyées par des modèles conçus et utilisés de façon collective. Il s'agit de concevoir (1) des outils et des méthodes pour faciliter la conception collaborative de modèles multi-agents, et (2) des outils pour permettre d'interagir avec une simulation afin d'influer sur les dynamiques simulées.

Je suis responsable de la plateforme Cormas qui a le triple rôle i) d'objet de recherche pour aider à la conception participative de modèles et améliorer leurs usages via la simulation interactive, ii) d'outil opérationnel sur le terrain et dans les projets, et iii) de support de transmission dans les formations. Je coordonne l'évolution de Cormas qui réclame de nouveaux développements informatiques pour qu'elle soit opérationnelle dans des contextes variés (gestion du land-use, de l'hydrologie, des aquifères, gestion de troupeaux, ...). D'un point de vue technique, l'intégration d'éditeurs de diagrammes UML vise à faciliter et accélérer la conception et l'implémentation de modèles. Le volet simulation permet de traiter des dynamiques des systèmes sociaux et écologiques, en réfléchissant notamment à la mise en place et l'utilisation de nouveaux outils pour des simulations interactives (simulation distribuée, asymétrie d'information, manipulation des agents, rétro-simulation, analyse de sensibilité, ...).

Au-delà des outils, mes expériences sur le terrain alimentent des réflexions sur la manière d'animer des ateliers de modélisation avec les acteurs et sur le rôle de la modélisation comme objet privilégié de l'interdisciplinarité. Face aux démarches prospectives traditionnelles, mes travaux visent à comprendre les avantages et les contraintes d'une prospective à base de simulateur. Je contribue alors aux questions déontologiques sur la manière d'engager les acteurs, et sur la responsabilité sociale et politique de l'animateur. Au sein de l'UR Green du CIRAD, je contribue aux réflexions sur des enjeux tels que l'analyse des tensions entre conservation de l'environnement et développement, ainsi que le rôle de l'action collective.

Plutôt que de proposer des solutions de développement clé en main, l'approche ComMod dans laquelle je m'inscris, peut jouer un rôle majeur pour aider un collectif à gérer ses ressources. En réfléchissant sur le contexte de son intervention et en essayant de comprendre les jeux de pouvoir, le modélisateur peut, dans certaines circonstances, favoriser l'émergence d'une vision partagée entre les acteurs sur leur propre socio-éco-système. Le modèle sert ainsi d'outil de médiation et sa projection sur le long terme peut changer les perceptions sur les pratiques individuelles et collectives. Ce rôle de *catalyseur* de la démarche peut alors amener les acteurs à établir leurs propres règles collectives pour une gestion viable de leurs communs.

Mémoire d'HDR

Modélisation participative et simulation interactive pour accompagner la gestion des Communs

1. Introduction : à la recherche d'un fil conducteur

Les travaux de recherche que j'ai menés ont commencé avant la soutenance de ma thèse en juin 2009. Car il faut comprendre que mon parcours académique n'a pas été un long fleuve tranquille, mais qu'il a effectué de nombreux détours à travers différentes disciplines.

Après mes classes prépa en vétérinaire puis mes premières années universitaires en biologie, j'ai commencé à découvrir la modélisation lors de mon DEA de bio-mathématiques à Lyon. Au cours de cette année, j'ai aussi été initié à la modélisation multi-agent lors de mon stage effectué à l'Orstom (IRD). Il s'agissait de réfléchir à la notion de validation d'un modèle de la pêche artisanale au Sénégal développé par Jean Le Fur (Le Fur et Bommel 1998). De mon point de vue, c'est à ce moment qu'a vraiment débuté ma recherche. Car la gestion des ressources naturelles est un sujet brûlant, spécialement dans le contexte actuel, et la validation des modèles de simulation reste un sujet controversé qui demande un recul épistémique. Après mon DEA, j'ai pu continuer ces réflexions par des vacances effectuées à l'Orstom et à l'INRA. C'est sous la direction de Sylvie Lardon que j'ai été initié à la recherche en géographie des territoires et dynamiques agricoles. J'ai alors découvert les notions de "points de vue" sur l'espace, le fait que nous percevons différemment un même paysage et la manière dont nos "cartes mentales" évoluent. Quelques éléments de ces réflexions ont été traduits en modèles (Bommel et al. 2000 ; Lardon et al. 2000) et sont depuis présents dans la plateforme Cormas (Le Page et al. 1999).

Après un DESS en informatique, j'ai initié une première thèse sous la direction de Jacques Ferber au LIRMM. Pour financer ce travail, j'avais alors créé avec un ami une start-up pour développer une plateforme d'accueil de jeux vidéo massivement en ligne. Conçue pour l'édition de jeux, cette plateforme s'appuyait sur le paradigme multi-agent et sur la notion de simulation distribuée interactive. Le système prédominant de l'époque inspiré du système X-Window, reposait sur une architecture Client / Serveur, et nous avons élaboré un système alternatif robuste de type peer-to-peer, implémenté sur la plateforme MadKit (Michel, Bommel, et Ferber 2002). Lors de mon engagement au Cirad en 2001, j'ai dû arrêter cette thèse (et la start-up) pour m'investir sur d'autres sujets. De mon point de vue, c'est véritablement à ce moment que je suis rentré pleinement dans le monde de la recherche en intégrant l'unité de recherche Green et en retrouvant avec joie des problématiques de gestion des ressources naturelles.

Le CIRAD est à mes yeux un organisme de recherche sans équivalent, qui offre la possibilité de mener des recherches interdisciplinaires sur des problèmes concrets de développement. En

charge du développement de Cormas (la plateforme de modélisation de l'UR GREEN), j'ai également été appelé à travailler sur des études de cas concrets en Afrique du Sud (Erasmus, Van Jaarsveld, et Bommel 2002) et à la Réunion (Farolfi et al. 2003), et sur une thématique nouvelle pour moi : l'économie de l'environnement. En parallèle, je me suis beaucoup investi dans la formation à la modélisation multi-agent destinée à des thématiciens souvent novices en informatique. Avec mes collègues, j'ai aussi participé au montage du réseau ComMod (Companion Modeling, Modélisation d'accompagnement, Barreteau et others 2003; Bousquet 2005; Étienne 2011) en réfléchissant à la manière d'adapter les outils et les démarches pour proposer une modélisation participative appliquée aux socio-écosystèmes (SES). Ce nouveau domaine de recherche qui vise au final à l'apprentissage social, touche à la fois à des aspects purement techniques qu'à des questions d'ordre éthique et de posture du chercheur en modélisation.

Riche de ces diverses expériences, j'ai repris ma thèse de doctorat sur un nouveau sujet. Il ne s'agissait pas d'une thèse classique, mais plutôt d'analyser mes travaux antérieurs en proposant un cadre méthodologique pour aborder la modélisation multi-agent de façon plus rigoureuse dans des contextes variés de coopération pour le développement. On comprendra donc que ma recherche a débuté bien avant cette seconde thèse qu'il faut plutôt voir comme une synthèse de mes travaux au CIRAD, à la fois sur le terrain et pour enseigner la modélisation.

Il faut aussi comprendre que l'unité de recherche Green est une unité réellement pluridisciplinaire et que la modélisation qui y est pratiquée oblige à travailler à plusieurs en intégrant diverses disciplines. Depuis 2001, j'ai ainsi côtoyé - avec bonheur - plusieurs collègues du CIRAD et d'autres institutions : économistes, géographes, vétérinaires, anthropologues du droit, hydrologues, pédologues, sociologues, politologues, agronomes, et quelques informaticiens ! J'ai également enseigné et mené des ateliers de modélisation dans plusieurs pays : France, Afrique du Sud, Egypte, Brésil, Bolivie, Argentine, Uruguay, Equateur, Colombie, Costa Rica, Nicaragua, Guatemala, Honduras, Salvador et République Dominicaine. Et les thèmes abordés ont été très variés : politiques publiques et dynamiques des paysages, gestion de l'eau, avancée des fronts de déforestation en Amazonie, impacts des filières avicoles, dynamiques socio-écologiques des varzeas, biodiversité et développement durable en Amazonie, accès à la terre et à l'eau dans les bassins périurbains, émergence de la quinoa dans le marché mondial, compétition élevage - soja, adaptation de l'élevage au changement climatique, sécheresse et qualité de l'eau, rouille du café... Avec tous ces thèmes, ces terrains, ces thématiques, comment voulez-vous trouver une cohérence !? Il m'est d'ailleurs arrivé plusieurs fois de me sentir schizophrène. Comme cette fois où, au sortir d'un entretien avec un éleveur de la Transamazonienne sur les systèmes de rotation des cultures, sur la qualité et la résistance des pâtures et les problèmes d'accès au marché, il a fallu répondre à des questions d'utilisateurs de Cormas sur la manière de parcourir des listes d'entités en Smalltalk !

Au-delà des disciplines aperçues, des thématiques abordées et des terrains étudiés, on devine néanmoins un fil conducteur. Car mes travaux ont toujours porté sur la modélisation participative. Afin d'accompagner la gestion des ressources renouvelables, j'ai souvent

essayé d'impliquer les acteurs locaux du développement lors de ces ateliers de modélisation. Mes questionnements ont alors porté sur l'intérêt ou non d'entamer une démarche de modélisation (ça ne fut pas toujours nécessaire), sur la définition des objectifs du modèle, sur le choix du type de modèle à mobiliser (SMA, System Dynamics, réseaux bayésiens, FCM...), sur la manière d'impliquer les acteurs dans la conception du modèle et dans l'analyse des simulations, et sur l'évaluation a posteriori de ces démarches. Aujourd'hui si la modélisation participative devient une approche à la mode (« a buzzword » diraient Voinov et Bousquet 2010), il semble pertinent d'en analyser les avantages et les inconvénients, d'en décrire les étapes et les postures à adopter, mais surtout d'en comprendre les tenants et les aboutissants pour un accompagnement effectif des acteurs. A l'instar de V. Grimm qui s'interroge pourquoi la modélisation individu-centrée n'a pas suffisamment enrichi l'écologie (Grimm 1999), on peut s'interroger sur le bien-fondé et l'efficacité des démarches participatives à base de modélisation SMA pour aider les acteurs à renforcer la viabilité de leurs socio-éco-systèmes (SES).

Ce manuscrit ne décrit donc pas l'itinéraire d'un parcours sinueux et original, mais cherche à proposer un cadre pour la modélisation participative. Car la modélisation des SES demande un véritable savoir-faire et le modélisateur qui est aussi un animateur des débats doit garder un regard critique sur les outils proposés et les démarches mises en œuvre.

2. Contexte : la modélisation participative pour l'apprentissage social et la gestion des ressources renouvelables

2.1. L'unité GREEN propose une approche originale de la viabilité

Entré au CIRAD en 2001, j'ai effectué toute ma carrière au sein de l'unité GREEN. Même si elle est considérée comme une petite unité composée de 18 chercheurs en moyenne, je ne m'y suis jamais senti à l'étroit. Car GREEN est avant tout une unité pluridisciplinaire qui a tenté dès ses débuts de promouvoir la collaboration entre les thématiques et l'interdisciplinarité.

Fondée en 1993 par Jacques Weber, économiste et anthropologue, GREEN (Gestion des REssources renouvelables, ENvironnement) cherche à aborder la gestion des ressources renouvelables par une posture résolument **interdisciplinaire** et non par une approche technicienne de l'agronomie. Dans son texte fondateur de l'unité, J. Weber explique que "*La recherche finalisée se doit de partir non de cadres disciplinaires mais de problèmes concrets qu'elle reformule en objets de recherche*" (Weber 1995). En prenant l'exemple du pastoralisme, il explique que son devenir est "*autant un problème de botanique et de zootechnie que d'ethnologie, de sociologie et de géographie*". Pour aborder ce genre de thématiques, il est donc préférable de déterminer collectivement les enjeux de la recherche, puis de solliciter après coup les spécialistes compétents, non pas pour que chacun donne son

avis sur la question de façon indépendante, mais pour trouver collectivement une nouvelle forme d'aborder le problème posé à travers un espace de dialogue qui facilite les débats.

Une recherche **impliquée**. Pour dépasser les disciplines universitaires, il est nécessaire de s'investir sur des questions concrètes en s'immergeant sur un terrain. Car, explique-t-il, *« l'une des causes vraisemblables d'échec des projets de développement est qu'ils reposent sur l'hypothèse qu'il serait possible d'initier, de l'extérieur, des changements de dynamique sociale dans des groupes humains, sur la base d'objectifs souvent sectoriels. Même lorsque la « participation » des populations est requise, même lorsqu'elle est obtenue, cette hypothèse nous semble conserver une part d'utopie »*. Car face aux nombreux défis de la sécurité alimentaire ou de la dégradation de l'environnement, la tendance dominante est de proposer des cadres de gestion des ressources conçus « d'en haut » soit par de grandes entreprises transnationales, soit par une administration de l'État ou soit par des experts d'organisations diverses.

C'est au contraire par les expériences menées sur le terrain et avec des acteurs, que s'élaborent les véritables questions de développement, au risque de réviser les objectifs initiaux. Il ne faut donc pas voir le projet comme un objectif de développement décidé de l'extérieur, mais plutôt comme une manière d'accompagner des changements d'organisation et de pratiques auprès des acteurs. Évidemment, *« à ce genre d'organisation du travail scientifique, chaque discipline perd quelque chose par rapport à ses propres critères d'excellence ; mais les résultats du travail collectif sont différents et plus riches que ne le serait une somme de travaux disciplinaires distincts »* (ibid.).

Pour mieux expliquer l'originalité et les fondements théoriques de l'UR GREEN, il convient de définir quelques concepts de base.

Tout d'abord qu'entend-on par **ressource renouvelable** ? L'Encyclopédie Universalis explique que les ressources naturelles correspondent aux *« diverses ressources minérales ou biologiques nécessaires à la vie de l'homme et à ses activités économiques »*. Il s'agit donc d'éléments présents dans la nature qui font l'objet d'une utilisation par les hommes et qui offrent une *valeur* effective pour les sociétés humaines : minerais, eau douce, poissons, bois de chauffage, énergie solaire... La notion de *ressource renouvelable* ajoute au concept précédent une dimension dynamique : son stock se reconstitue sur une période courte à l'échelle humaine. Ainsi le pétrole n'est pas classé comme ressource renouvelable car la transformation de la biomasse en pétrole s'est déroulée au cours de l'histoire géologique de la Terre. Certaines ressources que l'on pensait inépuisables (c'était le cas des stocks de poissons marins au XIX^{ème} siècle) peuvent s'épuiser avec leur surexploitation par l'homme (taux de régénération inférieur au taux de prélèvement).

En définissant l'environnement comme constitué de ce qui n'appartient à personne en particulier (Weber et Bailly 1993), l'accent est mis sur *« les relations entre les hommes à propos des choses »*. Or ces relations proviennent d'un **système de valeurs** propre à chaque société qui détermine par exemple *« que telle chose de la nature soit "utile" ou non, utilisée ou non, nuisible ou non, précieuse ou non »* (Weber, Betsch, et Cury 1990). C'est donc par un système de valeurs, et non par des besoins fondamentaux, que nos sociétés classifient ces

relations et qu'une ressource soit exploitée ou non. Il en va ainsi de la rareté d'un bien ou d'une ressource dont la valeur est déterminée par une sélection sociale (a « constitutional choice » selon Elinor Ostrom, 1990). D'ailleurs « si l'environnement non approprié a maintenant tant de valeur c'est qu'il est devenu un bien rare » (Durand et Antona 2013).

En économie, la gestion de telles ressources est souvent abordée en recherchant un **état d'équilibre** des stocks à exploiter rationnellement. Ces stocks sont alors représentés par des "boîtes noires" dont on étudie uniquement les entrées et les sorties sous la forme de flux de matière et d'énergie. Pour les économistes, le problème consiste alors à définir un taux optimal d'extraction afin d'en maximiser leur exploitation (le fameux MSY : Maximum Sustainable Yield, Schaefer 1954). Or cette façon de concevoir les ressources renouvelables, du moins pour les espèces vivantes, exclut les comportements de ces organismes et leurs interactions avec leur milieu. Soumises à la grande **variabilité** des facteurs biotiques et abiotiques, les êtres vivants ne sont pas indépendants, mais ils interagissent au sein d'un écosystème. Pourtant ces modèles de gestion se basent traditionnellement sur l'analyse d'une seule espèce isolée¹. S'ils intègrent rarement des facteurs abiotiques, ils ne prennent pas en compte l'influence des autres espèces présentes dans le milieu, ni l'impact de la diminution de la population ciblée sur la dynamique générale de l'écosystème. Reliée par des dépendances complexes, l'exploitation "optimale et durable" d'une espèce risque de conduire tôt ou tard à sa surexploitation. « À la recherche d'optimum, on préférera l'élaboration de stratégies adaptatives, tant aux variabilités naturelles qu'aux variabilités économiques » (Weber, 1995).

Le concept de **développement durable** trouve son origine dans ces modèles à boîtes noires représentant l'exploitation d'une ressource à l'équilibre. Ce concept qui a pris toute son importance avec le rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (WCED) de l'ONU, dit rapport Brundtland, 1987, explique que « *le développement durable est un développement qui répond aux besoins de la génération présente sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs* ». Il est bien question ici d'équilibre et de rendement soutenu. Cette conception du développement durable basé sur une vision de la nature comme stock à gérer à l'équilibre, conduit à concevoir ce développement en terme de préservation des milieux, de maintien et de restauration des équilibres. Le terme de développement durable est donc une notion polysémique et discutable, qui repose sur un parti pris idéologique et une vision du monde qui doivent être débattues (Daré et al. 2008).

A l'inverse, GREEN pose la question du développement en termes de gestion des interactions entre des variabilités économiques et sociales et des variabilités naturelles, tant dans l'espace que dans le temps. Les écosystèmes sont considérés comme le support de l'économie et de la société, l'économie s'inscrivant dans le champ social. Dans la lignée des travaux de Jean-

¹ Le modèle de Schaefer (1954) par exemple vise à calculer la quantité optimale de bateaux d'une pêcherie pour exploiter à son plus haut rendement une population isolée de poissons. Ce modèle ne prend pas en compte les facteurs environnementaux et leurs fluctuations, ni les relations trophiques de l'espèce ciblée avec les autres espèces de l'écosystème. Il s'agit donc d'un modèle proies-prédateurs un peu plus élaboré. Néanmoins, ce modèle a longtemps été utilisé par des agences de régulation pour prendre de décision sur les quotas d'exploitation transférables et les autorisations de pêches.

Pierre Aubin (1991) sur la « Théorie de la viabilité », cette vision du développement qualifié de « **viable** » s'écarte de l'image des trois piliers équivalents et substituables sur lesquels se fonde le concept de développement durable :

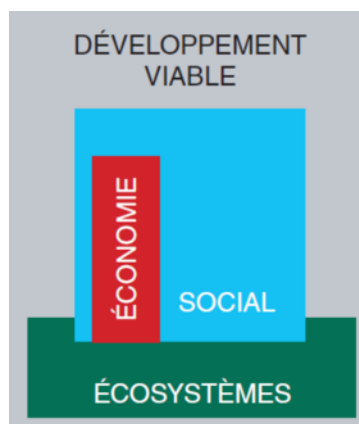


Figure 1 : Place de l'économie dans le développement viable, d'après J. Weber, Leçon inaugurale ESA

“La vie humaine sur terre peut survivre à un effondrement économique ou social, même très mal ; elle ne pourrait survivre à un effondrement des écosystèmes, qui nourrissent la société donc alimentent l'économie. La représentation en trois piliers veut laisser entendre que social, environnemental et économique seraient équivalents : il n'en est rien, les écosystèmes sont le système porteur de vie, les sociétés humaines en émergent et l'économie n'est constituée que des relations entre humains à propos des choses” (ibid.)

Pour aborder la gestion viable des ressources, GREEN a établi deux axes de recherche, le premier sur les processus de décision et le second sur les modes d'appropriation. La décision est vue comme le résultat d'un processus d'interaction entre des acteurs individuels et collectifs ayant des représentations et des « poids » différents dans la négociation. La notion de "mode d'appropriation" se décline en cinq niveaux : (i) le « système de valeurs » que les sociétés donnent aux ressources ; (ii) les usages possibles des ressources ; (iii) les modalités d'accès et de contrôle aux ressources (accès libre ou régulé selon une grande diversité de règles) ; (iv) la transférabilité des droits d'accès ; et enfin (v), la façon dont les ressources sont réparties au sein du groupe : partage égalitaire, ou en fonction du statut social, ou dans les sociétés occidentales, selon les lois du marché (Weber et Revéret 1993).

2.2. ComMod, la Modélisation d'Accompagnement

"Il faut bien reconnaître que, sur bien des points, les paysans savent mieux l'économie politique que les économistes et les gouvernants". Léon Walras

La démarche classique de modélisation consiste à concevoir un modèle, à l'adapter à une réalité à l'aide de données de calibrage, puis à le valider sur d'autres jeux de données. A partir de là, on considère alors le modèle comme un outil d'aide à la décision (Bart 1995; Rykiel Jr 1996; Balci 1998). Cependant il faut rester circonspect sur cette notion. Car le danger est grand de manipuler les opinions. Le commanditaire d'une modélisation peut toujours s'appuyer sur les résultats du modèle quand ceux-ci vont dans la direction qu'il souhaite prendre ou à l'opposé, en critiquer les faiblesses lorsque les résultats sont en contradiction avec une décision qu'il a déjà prise (Boussard, Gérard, et Piketty 2005).

Car un modèle n'est pas neutre : il est le produit de notre interprétation du monde, qui donne sens comme l'ont montré de nombreux travaux en psychologie (Piaget 1968; Watzlawick 1978) mais aussi en neurologie (Damasio 1999). Quel que soit le type de modèle descriptif ou explicatif que nous souhaitons développer, quel que soit notre niveau d'implication dans la problématique, la neutralité n'est pas atteignable. Il faut exclure l'**illusion d'objectivité** de la modélisation et "convenir que toute représentation est partisane, non pas par oubli du modélisateur, mais délibérément" (Le Moigne 1977). Tout en croyant s'abstraire du monde par le biais de son modèle, "*le chercheur fait partie de la boucle sociale et ne peut s'en distinguer. La tentation est grande, et cette tentation est valable pour chacun de nous, de penser qu'il est possible de s'abstraire du contexte et d'évaluer quelque chose indépendamment de nous*" (Ferber et Guérin 2003). Tout spécialement dans le domaine social et l'étude des comportements humains, affirmer son objectivité et sa neutralité est pour un modélisateur la porte ouverte à toutes sortes de manipulations (Mullon 2005; Daré et al. 2010).

Alors comment arriver à prendre des décisions mettant en œuvre des êtres humains dont les représentations seront nécessairement différentes de celles du décideur ? Comment se sortir du piège éternel de ses propres projections ? Car les décisions sont fréquemment "le résultat d'un processus d'interaction entre des acteurs individuels et/ou collectifs ayant des représentations et des « poids » différents dans la négociation" (Weber et Bailly, 1993). Pour gérer des ressources renouvelables de façon durable et équitable, la décision est rarement le résultat d'un seul décideur mais plutôt la conséquence de choix collectifs par les acteurs.

Une solution réside dans un autre type de confrontation à la réalité, une autre forme de simulation dans laquelle les acteurs se mettent en situation et agissent en jouant leur propre rôle ou en prenant celui des autres afin de prendre en considération le point de vue et les motivations de chacun. C'est l'objet de la démarche ComMod (pour *Companion Modelling* en anglais, ComMod 2005).

A l'inverse d'une approche classique d'aide à la décision, l'objectif de la démarche ComMod n'est pas de proposer des solutions expertes « clés en main », mais d'accompagner les acteurs pour enrichir le processus de décision collective. Face à des socio-écosystème (SES) complexes et dynamiques, soumis à de multiples usages, la démarche cherche à faire expliciter les différents points de vue et les critères subjectifs de chacun. L'approche consiste alors à concevoir un modèle partagé qui intègre les diverses représentations. Pour faciliter ce processus collectif, ComMod s'appuie sur des outils de modélisation participative, sur la simulation interactive, les jeux de rôle et leur débriefing. La simulation et le jeu favorisent une prise de distance sur une réalité trop prégnante. Ce recul autorise alors des discussions sur des sujets parfois conflictuels, voire tabous (D'Aquino et al. 2003). Co-construit avec les acteurs, le modèle devient ainsi un objet de médiation, favorisant la résolution des conflits et la décision collective. ComMod est donc une méthode d'**apprentissage social** (Le Page 2017) qui enrichit progressivement les connaissances en partageant et en confrontant les représentations de chacun.

Avant mon arrivée au Cirad, le réseau ComMod s'était structuré autour d'un groupe de chercheurs issus de diverses institutions mais majoritairement de l'UR Green. Ils ont publié

une première charte précisant les principes fondateurs pour la mise en place de la modélisation d'accompagnement. Cette charte a d'abord été publiée en anglais dans la revue *JASSS* sous le titre « Our Companion Modelling Approach » (Barreteau et others 2003). Puis la revue *Natures Sciences Sociétés* en a édité une version française (ComMod, 2005). Elle précise que l'objectif de ComMod est double. Le premier consiste à comprendre des environnements complexes en situation d'incertitude, c'est-à-dire de :

- produire des connaissances sur un enjeu de développement,
- mieux comprendre la place et le rôle des acteurs dans les processus,
- co-construire des indicateurs pertinents pour tous.

Grâce aux aspects ludiques de la démarche, le deuxième objectif est d'aider à la prise de décision collective, c'est-à-dire de :

- débloquer des situations de non-dit entre les acteurs,
- faciliter les échanges en favorisant la reconnaissance mutuelle des points de vue,
- éclairer les enjeux du collectif,
- faciliter et enrichir le processus de décision.

Au-delà de la production de connaissances individuelles et collectives, il s'agit de faire évoluer les représentations préexistantes de chacun pour, parfois, provoquer des changements dans la façon d'agir et d'interagir, voire même de modifier les organisations d'acteurs.

Une réédition de la charte ([Collectif ComMod] Bousquet et al. 2009) à laquelle j'ai participé, met davantage l'accent sur la posture du "commodien" plutôt que sur la démarche, en précisant le positionnement de la modélisation d'accompagnement vis-à-vis de référents théoriques (courants de pensée en sciences de la complexité, théorie des conventions, apprentissage social, sciences de la communication, jeux de pouvoir et médiation, etc.). Comme je l'ai suffisamment affirmé dans ma thèse, cet article souligne qu'un modèle n'est pas neutre. Il positionne alors la démarche ComMod dans le courant de l'épistémologie *constructiviste*² (Berger et Luckmann 1966, Searle 1995). En questionnant si ComMod est « une méthode pour aider un collectif à résoudre un problème, ou pour augmenter la capacité des acteurs à adopter des protocoles d'interactions pour favoriser une gestion adaptative ? », cet article conclue que « le rôle de celui ou de ceux qui initient une démarche ComMod est d'aider à la constitution progressive d'un groupe qui prendra en charge ce problème plutôt que de bien identifier un groupe et de l'amener à résoudre ce problème » (ibid.).

² Le sens commun véhicule l'idée que notre perception du monde est donnée par la nature des choses. Mais avec Jean Piaget (1968), les constructivistes estiment que les représentations de chacun ne sont pas une simple copie de la réalité, mais une *reconstruction* de celle-ci. Ils ont montré que l'impression d'évidence procède plutôt d'une construction cognitive et implicite de la part de l'observateur. La compréhension, constamment renouvelée, s'élabore à partir de représentations plus anciennes qui sont restructurées, en interne, au fur et à mesure des informations reçues. Ces constructions sont à la fois issues et constitutives du système de représentation propre à la culture à laquelle appartient l'acteur (Friedberg, 1992, cité dans Bousquet et al. 2009).

La première partie de ma thèse de doctorat développe ces aspects épistémologiques pour aborder la question de la validation des modèles.

Dans ce but, la modélisation d'accompagnement se propose de regarder le modèle comme un objet intermédiaire, comme un **tiers médiateur**³. En reprenant les mots de Jacques Weber, on comprend alors que « le médiateur ne recherche pas le consensus, considéré comme un équilibre instable et peu durable. Il a pour mission de faire émerger un agrément sur des objectifs de très long terme, à partir duquel les enjeux présents pourront être discutés » (Weber, 1996).

3. La modélisation multi-agent pour simuler les socio-éco-systèmes

"Il ne s'agit pas d'opposer un holisme global en creux au réductionnisme systématique ; il s'agit de rattacher le concret des parties à la totalité. Il faut articuler les principes d'ordre et de désordre, de séparation et de jonction, d'autonomie et de dépendance, qui sont en dialogique (complémentaires, concurrents et antagonistes) au sein de l'univers."

Edgar Morin - Le besoin d'une pensée complexe (1966-1996,
La passions des idées, magazine litt., hors-série, déc 1996)

3.1. Les écoles de pensée en sociologie

A l'inverse des modélisations plus classiques basées sur des systèmes d'équations différentielle, la modélisation multi-agent propose un paradigme dit "bottom-up" qui permet d'articuler deux niveaux : celui des agents et celui du système complet. Cette façon de penser un système social s'inscrit dans un débat sociologique bien plus ancien qui cherche à comprendre les choix décisionnels des individus ancrés dans leur société. Voici un bref aperçu de ces écoles de pensée.

L'individualisme méthodologique

Pour analyser des faits sociaux, Raymond Boudon (1934-2013) (à la suite de Max Weber 1864-1920) développe l'individualisme méthodologique dans lequel il définit que les faits sociaux découlent des actions des individus, décidées et effectuées selon leurs propres valeurs. La sociologie de Weber, dite sociologie "compréhensive" consiste donc à comprendre les motivations qui poussent les individus à agir dans un sens plutôt que dans un autre. Pour les tenants de ce courant de pensée, les individus possèdent leur libre arbitre.

La méthode vise donc à expliquer les phénomènes sociaux en deux étapes :

1. « une étape d'explication qui consiste à montrer que ces phénomènes sociaux sont la résultante d'une combinaison ou d'une agrégation d'actions individuelles ;

³ « La médiation est une méthode de négociation qui amène une tierce partie neutre afin de faciliter les accords entre les participants ; cela permet de traduire les vues de chacun sur les enjeux et problèmes afin qu'elles soient comprises » (ibid.).

2. une étape de compréhension qui consiste à saisir le sens de ces actions individuelles, et plus précisément à retrouver les bonnes raisons pour lesquelles les acteurs ont décidé de les effectuer » (Boudon et Fillieule 2012).

Les interactions entre les individus aboutissent à des effets difficilement prévisibles : des phénomènes émergents que l'on peut décrire par l'apparition d'un ordre supérieur résultant des actions individuelles chaotiques. Par exemple, la recherche par chacun de son intérêt personnel dans un système de marchés permettrait de satisfaire les besoins de l'ensemble.

C'est sur ce point qu'est fondée la « fable des abeilles » publiée en 1714 par Mandeville. Elle illustre cette déconnexion entre les activités individuelles et les mécanismes collectifs. Mandeville, considéré comme le précurseur du libéralisme économique, affirme que contrairement aux idées répandues, les "vices privés" comme l'égoïsme contribuent à la richesse des nations, alors que la vertu condamne une population à la pauvreté. Friedrich Hayek, Nobel d'économie en 1974 et partisan de la déréglementation et de la privatisation, reprend ces idées pour expliquer à sa façon les lois du marché : "*[...] dans l'ordre complexe de la société, les résultats des actions des hommes sont très différents de ce qu'ils ont voulu faire, et les individus, en poursuivant leurs propres fins, qu'elles soient égoïstes ou altruistes, produisent des résultats utiles aux autres qu'ils n'avaient pas prévus et dont ils n'ont peut-être même pas eu connaissance ; en fin de compte, l'ordre entier de la société, et même tout ce que nous appelons la culture, est le produit d'efforts individuels qui n'ont jamais eu un tel but, mais ont été canalisés à cette fin par des institutions, des pratiques, et des règles qui n'ont jamais été délibérément inventées, mais dont le succès a assuré la survie et le développement*" (Hayek 1966). Ce sont encore ces mêmes idées qui font dire à Milton Friedman (Nobel d'économie en 1976) que "*l'ordre économique est une émergence, c'est la conséquence non intentionnelle et non voulue des actions d'un grand nombre de personnes mues par leurs seuls intérêts*" (Friedman 1981). Pour les tenants du libéralisme économique, les interventions de l'état ne font qu'entraver les "mécanismes harmonieux" à l'œuvre.

Si l'individualisme méthodologique est souvent associé au courant libéral car mobilisé par de nombreux économistes néolibéraux, il faut souligner qu'il s'agit avant tout d'une démarche explicative pour rendre compte de phénomènes collectifs à partir des seules actions et attitudes individuelles. Sur le principe, cette démarche n'impose donc aucun modèle pour le comportement des individus. Elle n'oblige aucunement à concevoir les acteurs comme des « homo economicus » uniquement guidés par la maximisation d'une fonction d'utilité.

Le holisme méthodologique

Une société existe par la somme des individus qui la composent. Certes, mais pour les sociologues holistes, la société dépasse ses composantes : elle commande à ses parties. Pour les tenants de l'holisme méthodologique radical, l'individu ne détermine pas la société, mais il est au contraire totalement déterminé par la société. Il est manipulé, conditionné par les structures de la société et ne possède pas de libre arbitre. Ainsi en caricaturant, le délinquant ne peut pas changer et devenir honnête, car son milieu social le détermine à devenir délinquant. Les individus sont animés par des déterminismes sociaux issus de leurs groupes sociaux, des pratiques sociales et des représentations collectives. Ainsi on ne pourrait pas

comprendre le comportement d'un individu sans prendre en compte son groupe social, sa famille, les coutumes et traditions de la communauté à laquelle il appartient.

Emile Durkheim (1858-1917), fer de lance de ce courant (même si le terme « holisme » a été introduit plus tard), cherche à établir une sociologie scientifique en évitant de considérer les motivations psychologiques des individus. Pour Durkheim, la tâche du sociologue est de s'abstraire des préjugés en allant au-delà du sens commun qui n'a pas de valeur scientifique. Chaque fait social doit être étudié selon "Les règles de la méthode sociologique". Emile Durkheim définit les faits sociaux comme "*des manières d'agir, de penser, et de sentir qui présentent cette remarquable propriété qu'elles existent en dehors des consciences individuelles. Non seulement, ces types de conduites ou de pensées sont extérieurs à l'individu mais ils sont doués d'une puissance impérative et coercitive, en vertu de laquelle ils s'imposent à lui, qu'il le veuille ou non*".

Durkheim prend l'exemple du suicide qu'il considère comme un fait social à part entière (Durkheim 1897). Au lieu de tenter une explication relevant de l'intime et du psychique de l'individu qui passe à l'acte, Durkheim étudie les taux de suicides en fonction des déterminants sociaux. Il montre par les statistiques que le suicide intervient lors d'un défaut d'intégration à une communauté : les individus suicidaires ne sont pas suffisamment rattachés aux autres. En les intégrant, la société, la religion, la famille, la communauté les protègent en leur interdisant moralement de se suicider. Dans certaines situations politiques ou de troubles publics, les taux de suicide ont tendance à diminuer, car alors les individus se mobilisent autour de grands enjeux nationaux qui ravivent le sentiment d'appartenance à une société.

Par conséquent, si la psychologie donne une interprétation spécifique à chaque cas de suicide, l'approche sociologique explique les régularités des taux de suicide. « *Ainsi, puisque les causes diffèrent selon qu'il s'agit d'individus ou de phénomènes collectifs, il faut bien admettre l'existence d'une indépendance ou d'une incommensurabilité méthodologique des explications des phénomènes macrosociaux et des explications des phénomènes individuels. Cette indépendance est le point central de l'approche holiste durkheimienne* » (Magni-Berton 2008).

Les dépendances réciproques

D'autres sociologues cherchent à dépasser la dichotomie entre les deux courants de pensée en sociologie (holiste et individualiste). Dans *La Société des individus* (1991), Norbert Elias (1897-1990) considère que la société n'est ni un ensemble indépendant qui prédéterminent les comportements individuels, ni la simple résultante de leurs actions. Il explique que les phénomènes sociaux résultent de l'interaction entre des individus à l'intérieur de jeux dont les règles sont fixées. L'individu possède alors bien son libre arbitre, mais ses actions sont influencées par celles des autres. Il s'agit donc de dépendances réciproques. La similitude de la vie sociale avec un jeu découle du fait que toute action engendre une réaction de la part d'autres individus : « *Comme au jeu d'échecs, toute action accomplie dans une relative indépendance représente un coup sur l'échiquier social, qui déclenche infailliblement un contrecoup d'un autre individu (sur l'échiquier social, il s'agit en réalité de beaucoup de*

contrecoups exécutés par beaucoup d'individus) limitant la liberté d'action du premier joueur. » (ibid.).

Dans cette même volonté de dépasser la dichotomie holisme – individualisme, la théorie de la structuration d'Anthony Giddens vise à articuler les relations entre les individus et les structures sociales, sans donner de primauté à un courant de pensée plutôt qu'à l'autre. Selon Giddens, ni l'analyse macrosociologique, ni l'analyse microsociologique, ne suffisent. Les actions individuelles et les structures sociales ne peuvent pas être analysées séparément. C'est au contraire la « dualité de la structure », le lien entre société et individus qui constitue un élément fondamental de la théorie sociale (Giddens 1984). L'individu a donc une identité propre, mais il s'inscrit dans un milieu de relations sociales qui lui transmettent des valeurs, un schéma de comportements : un *habitus* social.

L'habitus

Pour Pierre Bourdieu (1930-2002), la place de chacun dans la société conditionne un comportement type. Chaque individu intériorise inconsciemment un *habitus* : une manière d'être, des valeurs et des goûts. Cet habitus est acquis et déterminé à partir de la situation sociale de l'individu, c'est-à-dire à partir de son environnement économique, social et culturel. Dit autrement, notre condition sociale oriente complètement nos goûts ou notre *système de valeurs* (cf. Weber, Betsch, et Cury 1990). Si Bourdieu accepte à la marge une certaine autonomie de l'individu qui peut évoluer, ses goûts et ses comportements dépendent de sa condition sociale et influent sur ses choix et ses orientations. Chez Bourdieu, la notion d'habitus fait le lien entre l'individu et la société : « Parler d'habitus c'est poser que l'individuel, et même le personnel, le subjectif, est social, collectif. L'habitus est une subjectivité socialisée. » (Magni-Berton 2008). En dépit des caractéristiques propres à chacun, les régularités observées en matière de goûts individuels témoignent de l'appartenance à une catégorie socioprofessionnelle. En affirmant que « tout est social », Pierre Bourdieu fait le pari que tout peut faire l'objet d'une explication sociologique (ibid.).

En cela il se rapproche d'une sociologie holistique plus radicale que Durkheim. Pour ce dernier, la sociologie obéit à ses propres lois. Même si elles émergent des comportements individuels, elles ne peuvent cependant pas être expliquées par l'étude des individus. « Malgré la contingence des choix individuels, une régularité sociale émerge : c'est là précisément la légitimité de la sociologie » (Magni-Berton 2008).

Dans le cas de Bourdieu, le holisme méthodologique est plus radical car il affirme que l'on peut expliquer les comportements individuels par le tout. « Ainsi, ce ne sont pas les goûts individuels qui expliquent l'ordre social, mais l'ordre social qui explique les goûts individuels » (ibid.).

3.2. Positionnement des SMA vis-à-vis des écoles de pensée en sociologie

Le modèle multi-agent comme métaphore sociale semble d'un grand intérêt (Livet, Phan, et Sanders 2014 en font une revue approfondie). En particulier, l'articulation entre le niveau

individuel et le niveau collectif permet d'aborder les changements d'échelle dont la prise en compte semble indispensable pour comprendre certains phénomènes. La réalisation de mondes artificiels dans lesquels des agents interagissent et évoluent, ouvre des possibilités d'investigation indéniables. On définit alors les SMA comme des "approches constructivistes"⁴ qui permettent de reconstruire le comportement global du système en ne s'intéressant qu'aux comportements des individus. Ainsi, dans "Growing Artificial Societies", le fameux livre d'Epstein et Axtell (1996) qui fait date au sein de la communauté en simulation multi-agent, les auteurs montrent qu'il est possible d'expliquer de nombreux concepts venant des sciences sociales à partir de simulations basées sur des modèles relativement simples⁵. Ils posent ainsi le problème : « *How does the heterogeneous micro-world of individuals behaviors generate the global macroscopic regularities of the society?* ». Une des raisons du succès de *Sugarscape* réside dans la simplicité du modèle et dans la relative facilité d'en reproduire les résultats⁶. On peut alors décrire la relation micro / macro par le schéma suivant :

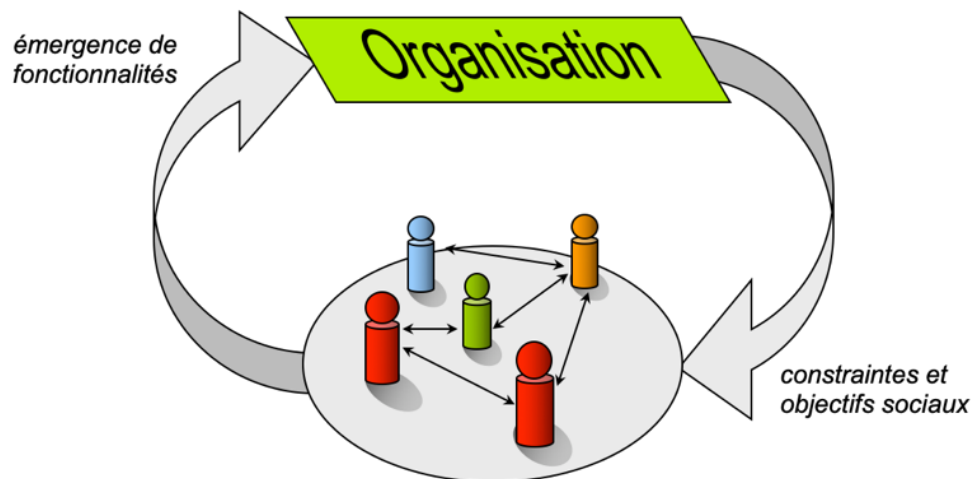


Figure 2: La relation micro-macro dans les systèmes multi-agents, adapté de (Ferber 1995)⁷

⁴ A ne pas confondre avec le Constructivisme, courant de penser en épistémologie que je présente rapidement page 11 (note 2) et de façon plus approfondie dans mon doctorat (chapitre 2).

⁵ Pour étudier les interactions directes et indirectes entre agents, les auteurs se basent sur un modèle de dynamiques des populations : Sugarscape. Il est basé sur la distribution spatiale de ressources en sucre et en épices qui se renouvellent selon des règles simples. Des agents appelés "Citizen" utilisent ces ressources. Dans les simulations de base, les agents perçoivent et se déplacent vers les meilleurs endroits pour collecter du sucre qu'ils absorbent pour contrer les effets de leur catabolisme. Le monde virtuel que les auteurs ont développé permet d'expérimenter diverses hypothèses sur l'apparition de structures sociales émergentes telles que les phénomènes de migrations, les échanges commerciaux, les crises et les guerres. A travers des représentations simples, les auteurs cherchent donc à expliquer des phénomènes sociaux complexes : « *Artificial society modeling allows us to "grow" social structures in silico demonstrating that certain sets of microspecifications are sufficient to generate the macrophenomena of interest. Indeed, it holds out the prospect of a new, generative, kind of social science* » (ibid.)

⁶ Néanmoins plusieurs tentatives de réplcation ont montré les difficultés d'en reproduire les résultats (Lawson et Park 2000; Meurisse 2004; Michel 2004; Bigbee, Cioffi-Revilla, et Luke 2007; Axelrod 2003) difficultés qui s'avèrent souvent liées à la gestion du temps (cf. chap. 4.5).

⁷ Ce graphe résume de façon claire et synthétique le paradigme multi-agent. Néanmoins, je lui reproche un défaut : le retour (feed-back) de l'organisation vers les agents s'exprime uniquement en termes de contraintes sociales. Or, les organisations et la société véhiculent d'autres valeurs comme les alertes, le langage, la culture, qui imprègnent tout individu. Ce sont dans ce cas des retours positifs du social sur l'agent. Comme l'expliquent (Maturana et Varela 1994) « *le système social humain amplifie la créativité individuelle de ses composants,*

“Toute la puissance des SMA résulte de cette boucle : les agents agissent de manière autonome dans un espace contraint par la structure de la société dans laquelle ils évoluent, cette structure résultant elle-même des comportements de ces agents. On se trouve donc là dans une boucle de dépendance entre agents et société d’agent, entre niveaux micro et macro, entre individu et collectif qui se trouve finalement au cœur de la problématique des systèmes complexes dans les sciences humaines et sociales. [...] Ce n’est donc pas un hasard si les SMA apparaissent comme un outil majeur pour modéliser des sociétés”. (Ferber 2006)

Les débats entre les écoles de pensées rapidement exposés dans le chapitre précédent visent à comprendre le choix décisionnel des individus ancrés dans leur société : en forçant le trait, agissons-nous par liberté individuelle ou par déterminisme social ? L’individu prime sur le groupe (individualisme méthodologique) ou au contraire, le groupe prime sur l’individu (holisme méthodologique) ?

Au regard de ce rapide panorama, on peut au premier abord positionner la modélisation à base d’agent comme un paradigme issu de l’*individualisme méthodologique*. La plupart des modèles SMA développés (avec Cormas mais également la majorité de ceux développés avec d’autres plateformes) peuvent s’inscrire à première vue dans ce cadre, sans pour autant partager les opinions politiques des tenants du libéralisme économique.

Par exemple, un modèle proie-prédateur spatialisé s’attache à décrire des comportements simples et “individualistes” d’agents, sans décrire les règles sociétales qui les contraignent ou les enrichissent. Les simulations laissent alors apparaître l’émergence de fluctuations des populations. Ici le niveau macro apparaît spontanément. Le “poids de la société” ne détermine pas les comportements des individus : chaque agent garde son libre arbitre et n’est pas manipulé par son appartenance à un groupe. Néanmoins les actions des uns contraignent la survie des autres. La capture d’une proie par un prédateur impacte directement la dynamique des proies et indirectement la survie des autres prédateurs en réduisant le stock de proies. De même, une zone surpâturée impacte un agent herbivore : les actions cumulées des autres l’affectent indirectement (c’est-à-dire via l’environnement). Et lui-même contribue sans le vouloir à cette situation (« La tragédie des communs » (Hardin 1968) repose sur ce principe et nous y reviendrons au chapitre 8, "Projet de recherche").

Ce constat n’empêche pas de considérer que la manière de décrire un modèle et de concevoir le comportement de ses agents (la proie broute et le prédateur chasse) découle d’une façon particulière de voir le monde. C’est alors le regard du modélisateur que l’on peut considérer comme déterminé par son groupe social. Car, comme l’exprime P. Descola “*tout discours sur la nature est un discours sur la société*”. Le regard que l’on porte sur le monde n’est pas neutre, mais est au contraire déjà imprégné de notre culture, de notre langue, de notre histoire et de notre milieu social. Cette interrogation sur le regard du modélisateur peut sembler exagérée dans le cas d’une modélisation d’un proie-prédateur, mais elle doit être considérée avec attention dès lors qu’on s’attache à décrire des agents humains.

En sciences sociales, la simulation multi-agent reste encore peu appréciée malgré des appels à l’« urgence » de la modélisation en sociologie (Manzo 2007, 2014b). Dans leur analyse de la revue JASSS (*Journal of Artificial Societies and Social Simulation*), Squazzoni et Casnici

dans la mesure où le système existe au service de ses composants ». Les auteurs nomment « *couplage de troisième ordre* », ces relations entre les individus et l’organisation.

(2013) montrent que les articles de la revue ont plus d'impacts en informatique, en physique et en écologie qu'en sciences sociales. "Cela confirmerait le fait que la simulation sociale n'est pas encore reconnue comme une activité pertinente pour les sciences sociales" (ibid.). En France, ce n'est qu'en 2014 que la *Revue française de sociologie* a publié un numéro spécial intitulé « La simulation multi-agents : principes et applications aux phénomènes sociaux » (Manzo 2014a). Mais cet effort n'a pas beaucoup fait changer les lignes. Comme l'expliquent Bruno Latour et ses collègues,

« Simuler l'émergence de macro-structures à partir de micro-interactions n'a jamais été une stratégie de recherche optimale, ni sur le plan méthodologique ni politique. [...] Des études empiriques montrent que, contrairement à ce que supposent la plupart des simulations sociales, l'action collective ne prend pas naissance au niveau micro des atomes individuels et ne finit pas dans un niveau macro des structures stables. Au lieu de cela, les actions se répartissent dans des réseaux complexes et hétérogènes qui se replient et se déploient en créant des différences mais pas des discontinuités » (trad. de Venturini, Jensen, et Latour 2015).

Au mieux, les modèles multi-agents simples (KISS) permettent de mettre à l'épreuve des modèles implicites, à l'exemple du modèle de ségrégation de Schelling (la ségrégation résulterait de décisions individuelles qui ne visent pas la ségrégation). En revanche, « lorsque cette approche cherche à expliquer le réel en complexifiant les modèles, elle se heurte à des objections qui me semblent pour le moment rédhitoires » (Jensen 2015).

Il faut reconnaître que peu de modèles à base d'agents reposent sur la formalisation du déterminisme social dans lesquels les agents intérioriseraient des codes sociaux (cas du modèle *Dricol*) ou le concept d'habitus de Bourdieu (cas du modèle d'échange de dons, Alam, Hillebrandt, et Schillo 2005)⁸. Des architectures de type BDI pourraient mettre en œuvre de tels principes, mais peu de modèles décrivent des mécanismes d'intériorisation de codes sociaux.

Il existe néanmoins une littérature sur ce sujet dont Neumann (2013) en fait la revue. En décrivant comment les contraintes sociales sont prises en compte dans les simulations multi-agents, il fait l'inventaire des différents modèles qui traitent des normes sociales, de leur diffusion et de leur internalisation par les agents. Il montre que seule l'élaboration d'agents cognitifs permet d'aborder ces questions et de « mieux comprendre le fonctionnement et les effets des contraintes normatives en matière de comportement »⁹. Il rappelle le caractère pionnier des travaux de Conte et Castelfranchi (1995) dans ce domaine mais souligne le manque de modèles traitant des phénomènes de socialisation. En reconnaissant l'utilité des SMA, il conclue que « *There is, however, still a lot to do with regard to achieving a comprehensive understanding of how actors produce, and are at the same time a product of social reality. [...], it has to be decided whether an antagonism individual and society is assumed or not. This is the question, whether the social macro-level is perceived as action constraint or as enabling action selection* » (Neumann 2013).

⁸ On verra que Cormas offre des outils permettant d'aborder la notion d'habitus, non pas du côté agent, mais plutôt pour les utilisateurs de la plateforme pour les simulations interactives (cf. chap. 5.3).

⁹ Deffuant et al. (2003) expliquent que les modèles compliqués ne sont pas nécessairement plus réalistes que les modèles simples. Ils ajoutent que les architectures de type BDI très souvent utilisées pour modéliser des agents cognitifs ne s'appuient pas forcément sur des bases scientifiques robustes et qu'elles ne dérivent ni des préceptes des neurosciences, ni de la psychologie et ni de la philosophie.

Malgré tout, on peut admettre avec (Venturini, Jensen, et Latour 2015) que les simulations sociales ne peuvent pas traduire les mécanismes subtils qui conduisent à l'émergence de normes communes et à l'établissement de comportements sociaux. Car expliquent-ils, les liens familiaux, la réputation, la compassion, ou les expressions faciales sont essentiels dans les relations humaines. Puisque ces subtilités ne peuvent pas être capturées par des modèles conceptuels, les simulations sociales basées sur les SMA ne semblent pas adaptées pour révéler la complexité des systèmes sociaux (ibid.).

Je souscris entièrement à l'idée qu'il n'est pas envisageable de reproduire la totalité des facultés humaines dans un modèle multi-agent. J'y souscris tellement que, dans l'état actuel des techniques et des connaissances, il me semble vain de vouloir reproduire les comportements cognitifs humains et ceux de nos sociétés. Nous ne pouvons pas proposer un modèle dont le "degré de complexité requis" (Erceau 1995) atteigne celui d'une organisation humaine. Face à un tel système, nous sommes simplement incapables d'opposer un modèle cognitif ayant un degré de complexité équivalent (Bradbury 2002).

Pour autant, je ne rejette pas l'utilisation de la modélisation pour comprendre les organisations humaines. Car l'objectif n'est pas de copier un système social pour en prédire l'évolution, mais bien d'utiliser des outils pour tester des hypothèses sur une réalité. Quelle que soit sa complexité, un modèle reste une représentation abstraite et provisoire d'une réalité incommensurablement plus complexe. D'ailleurs il ne s'agit pas d'une limitation technique. Chercher à opposer un modèle équivalent à une organisation humaine, c'est penser que nous pouvons proposer un modèle *neutre* d'une complexité comparable à la *réalité*, comme si cette réalité nous était donnée de façon objective. Comme souligné dans nos formations, un modèle n'est qu'un outil pour essayer de comprendre un phénomène ; une manière de mettre à l'épreuve nos représentations d'un système en poussant la logique jusqu'à ses conséquences extrêmes. Lors des ateliers de terrain avec les acteurs, il est nécessaire au préalable de démystifier les outils en indiquant que les modèles ne sont que des *béquilles* pour aider à penser.

En l'état, le paradigme multi-agent ne permet donc pas de décider si c'est l'individu qui devance le groupe (individualisme méthodologique) ou au contraire, le groupe qui prime sur l'individu (holisme méthodologique)¹⁰. Mais il permet dans le meilleur des cas d'aborder les interactions bidirectionnelles en essayant de comprendre comment les agents produisent et sont en même temps le produit d'une réalité sociale (Deffuant, Moss, et Jager 2006).

Cette boucle de dépendance entre niveau micro et macro se trouve au cœur du paradigme multi-agent. Et lorsque des propriétés émergentes d'un SMA deviennent observables, lorsqu'elles vont dans le sens d'une organisation nouvelle (un *pattern*, tel que le chemin observé des fourmis entre la fourmilière et la nourriture), on parle alors de mécanismes d'*auto-organisation* (Holland 1995). Un système auto-organisé repose sur sa capacité à produire spontanément et sans contrôle externe une nouvelle organisation du groupe d'agents et de l'environnement.

¹⁰ Et ça ne sera pas l'objectif de mes futures recherches !

On peut parfois voir cette organisation comme une entité à part entière avec ses propres règles qui influence et dirige les comportements de ses composants (contraintes, règles conventionnelles, etc.). En s'interrogeant sur les "croyances sociales", A. Orléan (2004) définit le groupe comme un objet social : une entité abstraite dotée d'une autonomie propre par rapport aux individus qui la compose. Il prend l'exemple de la phrase suivante : « le marché croit que cette devise est sous-évaluée ». Evidemment, le marché financier en tant que tel n'a pas la faculté de croire. Mais il a une existence propre qui dépasse la simple composition des agents économiques : « du point de vue historique et social, les collectivités ne sont justement pas des collections d'individus, puisque leur identité n'est pas fixée par une liste d'individus » (Descombes 1996). Les marchés ne peuvent être réduits à l'ensemble des agents qui y participent à un moment donné mais ils perdurent malgré le flux d'agents qui en sortent ou qui y entrent. "Cette structure sociale complexe est ainsi porteuse d'un sens qui se maintient dans le temps indépendamment des agents qui y participent et qui dépasse leur dimension individuelle" (ibid.).

En fonction de la façon dont on perçoit une organisation, on pourra alors la représenter comme la résultante des interactions entre les entités ou si on lui reconnaît une certaine autonomie par rapport à ses constituants, on pourra la réifier, c'est-à-dire la modéliser comme un agent. Entre ces deux façons de prendre en compte les propriétés des phénomènes émergents, Nigel Gilbert propose que « les institutions, en tant que caractéristiques de niveau macro, soient identifiées par leurs membres et soient utilisées par eux pour justifier leurs propres actions, reproduisant ainsi ces mêmes caractéristiques" (Gilbert 1996).

Mais de manière générale (et c'est ce que nous préconisons dans nos cours), le modélisateur, lors de la conception d'un SMA, doit s'attacher à ne représenter que les comportements individuels, puis à laisser apparaître, grâce au rôle du temps et des interactions, l'émergence de phénomènes globaux. En ce sens, les modèles SMA s'inscrivent dans le cadre de l'*individualisme méthodologique*, même s'il faut souligner que ce n'est pas pour défendre les conclusions des tenants du libéralisme économique¹¹.

Pour conclure, soulignons qu'un des principes à la base des SMA est l'interaction : interaction des agents entre eux, et interaction avec l'environnement ou une entité d'ordre supérieur. On peut alors considérer que le paradigme multi-agent s'inscrit aussi dans l'école de pensée des "*dépendances réciproques*" de Norbert Elias. Si chaque agent possède bien son

¹¹ Sur ce point, J. Weber avait développé un petit modèle didactique afin de démontrer qu'une économie dérégulée ne s'autorégule pas d'elle-même, contrairement à ce qu'affirment la métaphore de la "main invisible" d'Adam Smith et les discours dominants des néolibéraux. Les agents de son modèle (*PlotsRental*) sont des agriculteurs qui possèdent des parcelles inégalement réparties sur un territoire. Plus les distances entre parcelles sont élevées, plus leur productivité baisse. Afin de réduire ces distances, ils cherchent à s'échanger des parcelles entre eux. Deux modalités d'échanges sont alors testées : 1) le mode "gré à gré" qui aboutit à une affaire conclue dès qu'elle s'avère avantageuse pour les deux agents et 2), le mode "centralisé" dans lequel un commissaire reçoit toutes les offres d'échanges possibles puis après les avoir triées par niveau d'intérêts, renvoie les plus intéressantes aux agriculteurs concernés. A l'inverse des échanges de gré à gré, le mode centralisé aboutit évidemment à un réagencement optimal des parcelles. Pour parvenir à un résultat semblable en mode non-centralisé, « il faudrait imaginer des raffinements qu'on peut assimiler à des mécanismes régulateurs » (Le Page et Barreteau 2013).

libre arbitre, ses actions sont influencées par celles des autres. Une action peut engendrer une réaction de la part d'autres agents, comme c'est le cas dans de nombreux modèles multi-agents.

Avant de refermer cette partie, je souhaite rappeler les travaux de Francisco Varela et Humberto Maturana, pionniers des sciences cognitives, qui, dans « L'arbre de la connaissance » étudient l'organisation des systèmes vivants, des plus simples aux plus complexes. En présentant le concept de "couplage de troisième ordre" qui décrit les relations entre les individus et l'organisation, ils expliquent dans la lignée du Constructivisme que l'acte cognitif n'est pas le simple miroir d'une réalité objective externe, mais plutôt un processus actif, enraciné dans notre structure biologique, par lequel nous créons notre monde d'expérience :

« Le monde que chacun peut voir n'est pas le monde mais un monde que nous faisons émerger avec les autres. [...] Nous autres êtres humains ne sommes des êtres humains que par le langage. Parce que nous avons le langage, il n'y a pas de limite à ce que nous pouvons écrire, imaginer, et raconter. Ainsi le langage imprègne toute notre ontogenèse d'individus : depuis la marche jusqu'à nos positions politiques. [...]

L'esprit n'est pas quelque chose qui se trouve à l'intérieur de mon cerveau. La conscience et l'esprit appartiennent au domaine du couplage social » (Maturana et Varela 1994)

4. Cormas, une plateforme de modélisation en appui à l'approche ComMod

4.1. Origines et spécificités de Cormas

Développer des outils de modélisation pour traiter des interactions entre les acteurs et les ressources d'un SES a semblé indispensable dès les débuts de l'unité Green (cf. chap. 2). Mais étant donné les orientations de ses axes de recherche, l'unité Green n'a pas souhaité utiliser les outils classiques de l'économie qui cherchent à maximiser une utilité sous contraintes et qui raisonnent sur des flux à l'équilibre (cf. chap. 2.1). Les choix se sont donc rapidement tournés vers la modélisation multi-agent car ce paradigme semble plus à même de traiter des relations homme-nature-société comme expliqué au paragraphe 3.2 (page 15). En évitant les hypothèses de dynamiques à l'équilibre et en raisonnant sur la relation local-global, les SMA permettent d'aborder la gestion des ressources renouvelables selon une perspective interdisciplinaire.

Ainsi, dès l'origine de l'unité de recherche, François Bousquet, Innocent Bakam et Hubert Proton (ces derniers étant à l'époque étudiants en informatique) ont élaboré une première version de la plateforme Cormas. Déjà, son nom fait référence à la gestion des ressources communes : CORMAS est l'acronyme de « COMmon-pool Resources and Multi-Agent Systems ». Il s'agit donc d'une plateforme de modélisation et de simulation multi-agent dédiée préférentiellement à la gestion des ressources renouvelables.

A l'instar de *Sugarscape* (Epstein et Axtell 1996), les principes qui ont guidé le développement de Cormas se fondent sur un méta-modèle simple proposant des entités spatiales sur lesquelles se positionnent des ressources et des agents capables de percevoir localement leur environnement. Cormas est destiné à faciliter la conception de SMA, ainsi que le suivi et l'analyse des simulations. En effet, le but d'un SMA est de comprendre comment des entités indépendantes peuvent interagir, se coordonner et co-évoluer, tout en produisant des effets sur le système.

Cormas, logiciel gratuit et open-source, fut mis à disposition à partir du site web cormas.cirad.fr. Une première version a été publiée dès 1998 (Bousquet et al. 1998). Il fut rapidement utilisé par une communauté internationale de chercheurs souhaitant étudier les relations entre les sociétés et leur environnement. En 2012, nous avons publié dans JASSS un article précisant le rôle de Cormas dans le développement et le renforcement d'une communauté de pratique (Le Page, Becu, et al. 2010). Car parmi les plateformes de simulation génériques existantes, Cormas occupe une place réduite mais originale et dynamique. Grâce à un forum électronique¹² mais surtout grâce aux formations que nous organisons régulièrement dans différents pays (cf. chap. 7), un collectif d'utilisateurs s'est progressivement constitué. Ceci a facilité le partage d'idées, de pratiques et de connaissances. Aujourd'hui, il existe une véritable communauté de pratique dont les membres sont particulièrement intéressés par la simulation participative basée sur les agents.

4.2. Pourquoi Smalltalk ?

Cormas fut implémentée en Smalltalk, l'un des premiers langage purement orienté objet¹³. Il utilise VisualWorks (une implémentation de Smalltalk développée initialement au Xerox PARC, puis par ParcPlace Systems et enfin repris par Cincom) (Brauer 2015), un langage de programmation mais aussi un environnement de développement interactif (IDE) lui-même écrit en Smalltalk. Au lieu de proposer un langage de script comme c'est le cas de plusieurs plateformes (programmées en Java, Netlogo et Gama utilisent réciproquement Logo et GAML), l'utilisateur de Cormas doit programmer son modèle en Smalltalk. Il bénéficie ainsi de toutes les fonctionnalités offertes par Smalltalk, ce qui lui ouvre un espace de potentialités beaucoup plus riche que les autres plateformes du marché.

Pourtant Smalltalk est largement perçu comme un langage moribond d'une époque révolue. Il n'en est rien car c'est un langage d'une grande qualité et d'une rare élégance. En dépit de sa conception remarquable, il continue d'évoluer. C'est un langage de programmation orienté objet, réflexif et dynamiquement typé. Smalltalk vise la simplicité et l'efficacité : tout est objet et sa syntaxe tient sur une carte postale ; toutes les méthodes sont publiques, les attributs privés et l'héritage est simple. Comme pour Lisp ou Java, la gestion de la mémoire est automatique par ramasse-miettes (garbage collector).

¹² Aujourd'hui le forum (cormas@cirad.fr) contient 337 abonnés.

¹³ Successeur de Simula, c'est Alan Kay, l'un des fondateurs de la programmation objet, qui créa avec ses collègues la première version de Smalltalk-72. Adele Goldberg et Dan Ingalls ont ensuite conçu et développé Smalltalk-76 et 80.

Plus qu'un langage, Smalltalk est aussi un système immersif, qui permet l'introspection, la réification et l'intercession¹⁴, ce qui favorise le prototypage rapide de modèles. La puissance de son débogueur permet à un modélisateur de vérifier finement le fonctionnement de son modèle, mais aussi de modifier le code directement, même lors de l'exécution d'une simulation. D'ailleurs le débogage d'un programme est un processus d'apprentissage en soi qui plonge le développeur au cœur de sa simulation et offre une vision plus palpable de son fonctionnement. Lorsqu'un bug arrête l'exécution du programme ou lorsque l'on place un point d'arrêt, une fenêtre d'inspecteur (le débogueur) s'ouvre et fournit des indications pour comprendre le problème. Depuis cette fenêtre, il est alors possible de naviguer dans le code, de suivre l'évolution des objets, de modifier ou de créer une méthode, puis de reprendre le flot d'exécution là où il s'était arrêté. Certains appellent cela la méthode « edit and continue » au lieu de la traditionnelle méthode « edit, compile and run ». Je préfère « Live coding » et « direct model checking ». C'est souvent la méthode que j'utilise pour développer mes modèles directement à partir du débogueur.

Smalltalk est donc un langage efficace pour enseigner la programmation et les concepts objets à des personnes novices en informatique. C'est un excellent langage pour prototyper rapidement un modèle et vérifier son fonctionnement.

4.3. Structure et fonctionnement de Cormas

Depuis mon arrivée à l'UR Green, je suis responsable du développement informatique de la plateforme Cormas, ainsi que de l'animation du site web associé et de la liste des utilisateurs. Mais mes collègues Christophe Le Page et François Bousquet participent également aux activités de développement. De plus, Nicolas Bécu (CNRS) et Bruno Bonté (IRSTEA) ont également contribué à développer la plateforme. Nous formons donc une petite équipe qui travaille de manière plus ou moins régulière pour faire évoluer Cormas.

Contrairement au développement classique des logiciels informatiques, la philosophie d'évolution de Cormas a consisté à agréger des fonctionnalités nouvelles en fonction des besoins rencontrés au cours des différents projets et des demandes des utilisateurs. Dans l'article fondateur (Bousquet et al. 1998), l'interface principale de Cormas était celle présentée sur la figure suivante :

¹⁴ On parle aussi de langage réflexif, qui permet l'*introspection* (pour inspecter et analyser n'importe quel objet du système), et l'*intercession*, qui permet de modifier depuis le langage lui-même sa sémantique et son comportement. En Smalltalk, les classes et les méthodes sont des objets comme les autres. Il est non seulement possible comme en Java d'accéder aux informations que représentent ces entités mais aussi de modifier et de créer dynamiquement des instances de ces classes (ce qui n'est pas possible en Java) (Ducasse 1997). C'est donc un méta-programme capable de manipuler d'autres programmes dont lui-même.

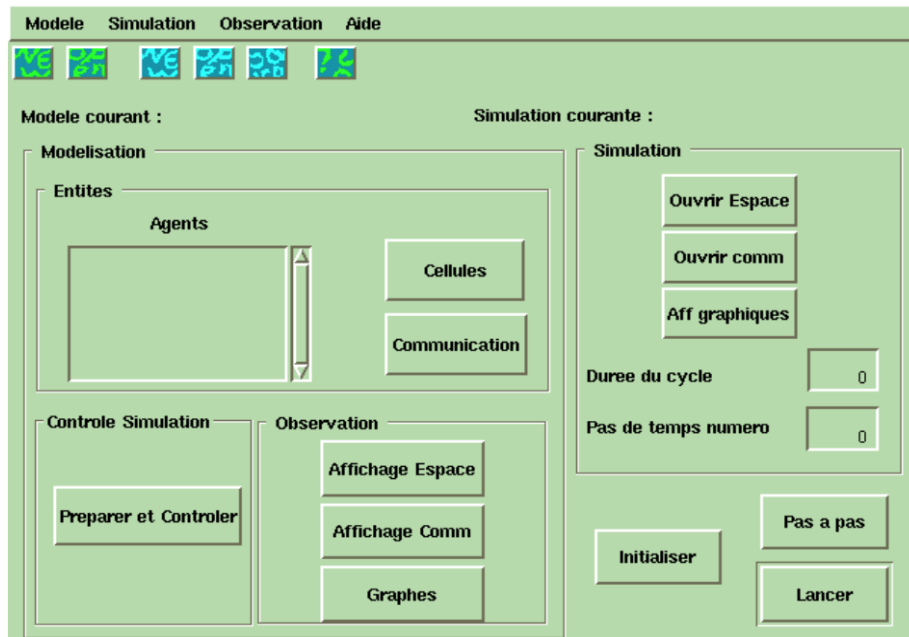


Figure 3 : Première interface de Cormas

Sur cette interface, on devine déjà deux concepts importants : (1) l'application du pattern MVC¹⁵ qui distingue le Modèle (les entités) de son observation (View) et du Contrôle, et (2) une structure qui sépare les entités en agents, cellules spatiales et canaux de communication. Toutefois cette organisation des entités a ensuite été modifiée pour reposer sur un schéma simple proposé par J. Ferber dans son livre précurseur (Ferber, 1995) qui résume les principaux concepts d'un SMA :

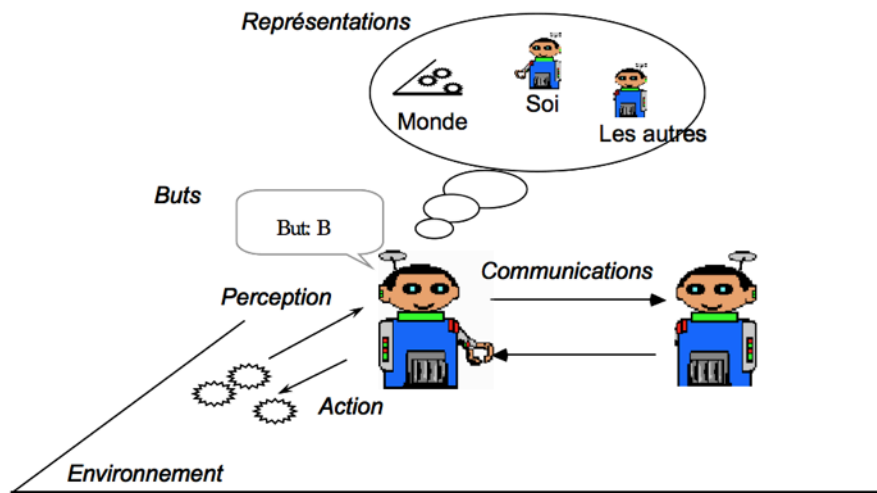


Figure 4 : Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents et objets du monde, d'après (Ferber, 1995).

¹⁵ MVC, pour Modèle-Vue-Contrôleur, est un pattern d'architecture de logiciel qui spécifie une séparation claire entre le code du modèle et la façon de le visualiser et de le manipuler. Ce modèle d'architecture a été conçu en 1979 par Trygve Reenskaug, qui travaillait alors sur la conception de Smalltalk avec Alan Kay, Dan Ingals, Ted Kaehler, Adele Goldberg au Palo Alto Research Center de Xerox.

Cette description a influencé le développement de Cormas dont la structure, encore actuellement, organise les entités en trois catégories : 1) les entités spatiales, 2) les entités sociales (les agents) et 3) les entités passives, telles que présentées sur l'interface de la première version disponible au téléchargement (Figure 5).

Cormas est un *framework* qui propose des classes prédéfinies et un ensemble d'outils de visualisation. Cela signifie que le modélisateur implémente son modèle en spécialisant certaines classes prédéfinies. Elles contiennent des attributs et des méthodes génériques qui peuvent être réutilisés par les classes spécialisées. Principalement, trois types d'entités génériques sont disponibles : "agent social", "entité spatiale" et "entité passive". Ainsi, pour créer un Ruminant par exemple, le modélisateur peut le définir comme un sous-type d'*AgentLocation*. Au cours d'une simulation, chaque nouvelle instance de cet agent sera automatiquement enregistrée par l'organisateur de la simulation (le Scheduler). Elle sera également en mesure de se déplacer sur l'espace et de percevoir ses voisins en appelant les méthodes génériques (*#moveTo:* et *#perceive*) définies au niveau de la superclasse *AgentLocation*. Le diagramme de classe (fig. 6) présente comment un modèle simple ECEC¹⁶ avec deux types d'entités (*VegetationUnit* et *Forager*) peut s'insérer dans Cormas.

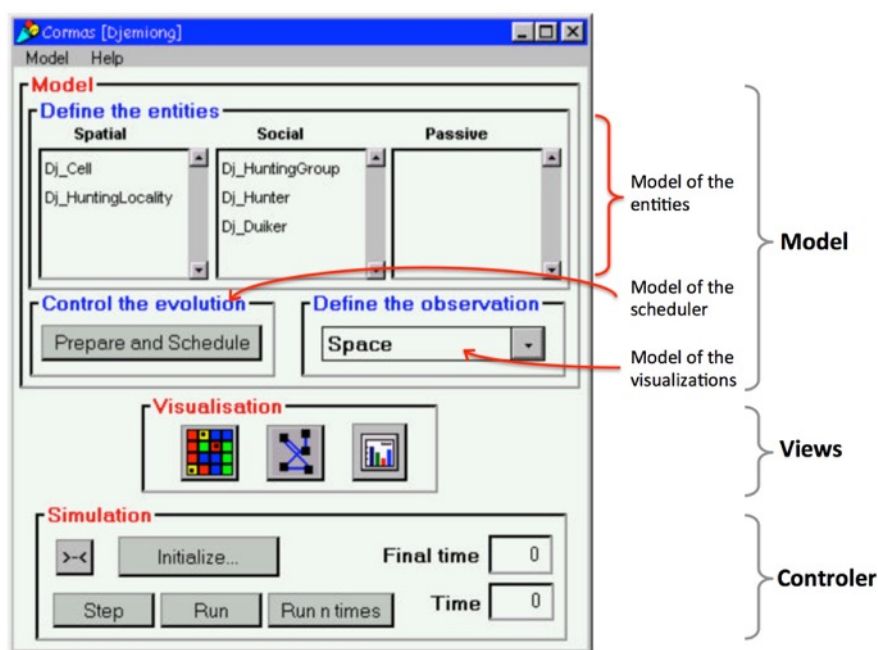


Figure 5 : Interface de Cormas, version 2, publique, qui force le concepteur d'un modèle à distinguer les entités du monde (Model), de la façon de les voir (Views) et de les activer (Controller).

¹⁶ Conçu par (Pepper et Smuts 2000), ECEC a été répliqué dans Cormas. Il s'agit d'un modèle-école pour expliquer le fonctionnement d'un SMA. En montrant une simulation pas à pas, les personnes non-initiées aux SMA en saisissent rapidement les mécanismes. Pourtant malgré sa simplicité, ses résultats de simulation ne sont pas triviaux. On peut le comparer à des modèles classiques de l'écologie : le modèle de Lotka-Volterra ou le modèle de Gause (principe d'exclusion compétitive).

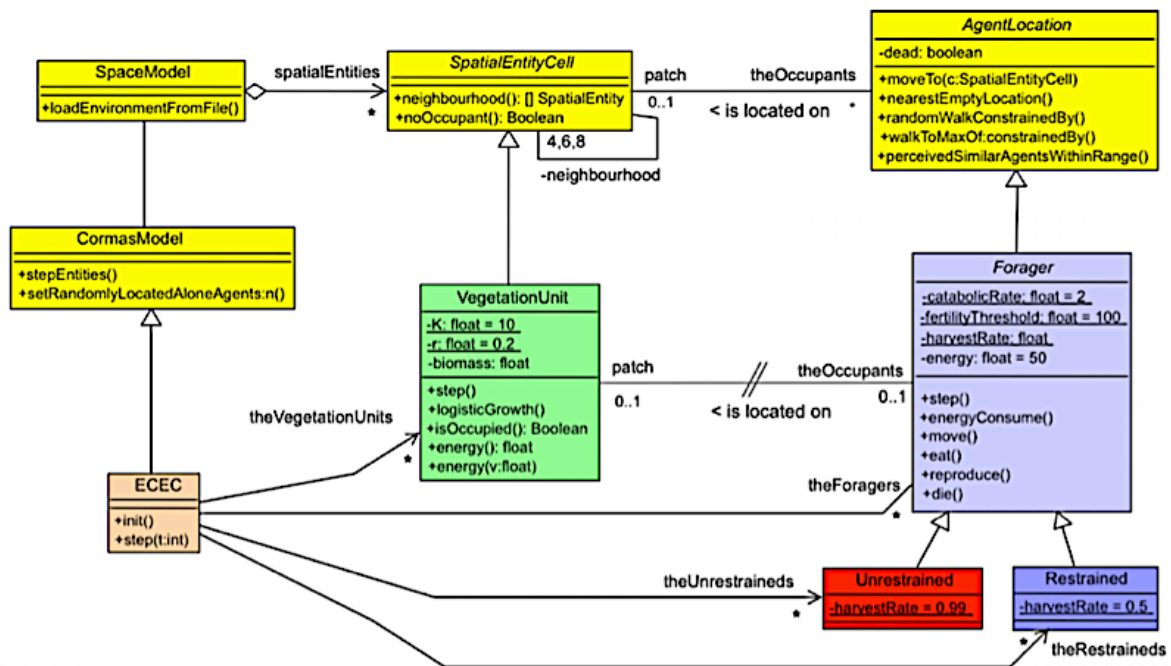


Figure 6 : Diagramme de classes présentant comment les classes du modèle ECEC s’insèrent dans le framework Cormas (classes jaunes).

La classe *Forager* (Ruminant) hérite de méthodes utiles prédéfinis dans sa superclasse telle que *#nearestEmptyLocation* ou *#moveTo*: qui permettent à une instance de *Forager* de percevoir les places libres autour de lui et de se déplacer à un endroit donné. Ces méthodes génériques peuvent ensuite être réutilisés dans la méthode *#step* de l’agent pour spécifier son comportement journalier.

CormasModel est l’ordonnanceur abstrait du modèle. Il doit gérer la dynamique globale de la simulation. Ici, il est spécialisé par la classe *ECEC* (automatiquement définie lors de la création du modèle ; elle porte le nom du modèle) qui peut réutiliser de nombreuses méthodes prédéfinies pour instancier l’état initial d’une simulation et pour activer les entités. Pour cela, l’ordonnanceur contient trois attributs, chacun contenant une liste des instances des trois classes concrètes du modèle (les classes vertes, rouges et violettes sur la Figure 6). Ces attributs sont définis automatiquement lors de la création des classes du modèle et les listes des instances sont mises à jour automatiquement à la fin de chaque pas-de-temps d’une simulation (en enlevant les agents morts et en ajoutant les nouveaux).

L’avantage d’utiliser une plateforme est que le modélisateur est libéré de nombreuses contraintes de codage. Comme Cormas est conforme à l’architecture MVC, cela permet de se concentrer uniquement sur son sujet sans se soucier des accessoires qui viennent avec un simulateur. Après avoir codé les agents et les autres entités de son modèle, le modélisateur doit simplement indiquer la façon dont les entités sont activées par l’ordonnanceur. Enfin, il peut spécifier la façon dont il veut visualiser les entités et les indicateurs de son modèle (Figure 5). Pour cette phase, plusieurs interfaces sont disponibles qui évitent de coder l’affichage du modèle et les courbes des variables. On peut ainsi affecter une couleur ou un gradient de couleurs pour la valeur d’un attribut ou d’une opération d’une entité spatiale, et une figure ou une image à un agent. A l’inverse d’autres plateformes telles que Netlogo qui

oblige de définir la couleur ou l'image des entités dans le code du modèle, ce parti pris de séparer clairement le code du modèle de sa visualisation et de sa manipulation est une spécificité de Cormas. Outre le fait qu'elle polarise l'attention uniquement sur les entités, elle offre aussi une diversité d'utilisations d'un même modèle : changement de point de vue, zoom, distribution, asymétrie d'information, manipulation des agents, etc. (cf. chapitre suivant).

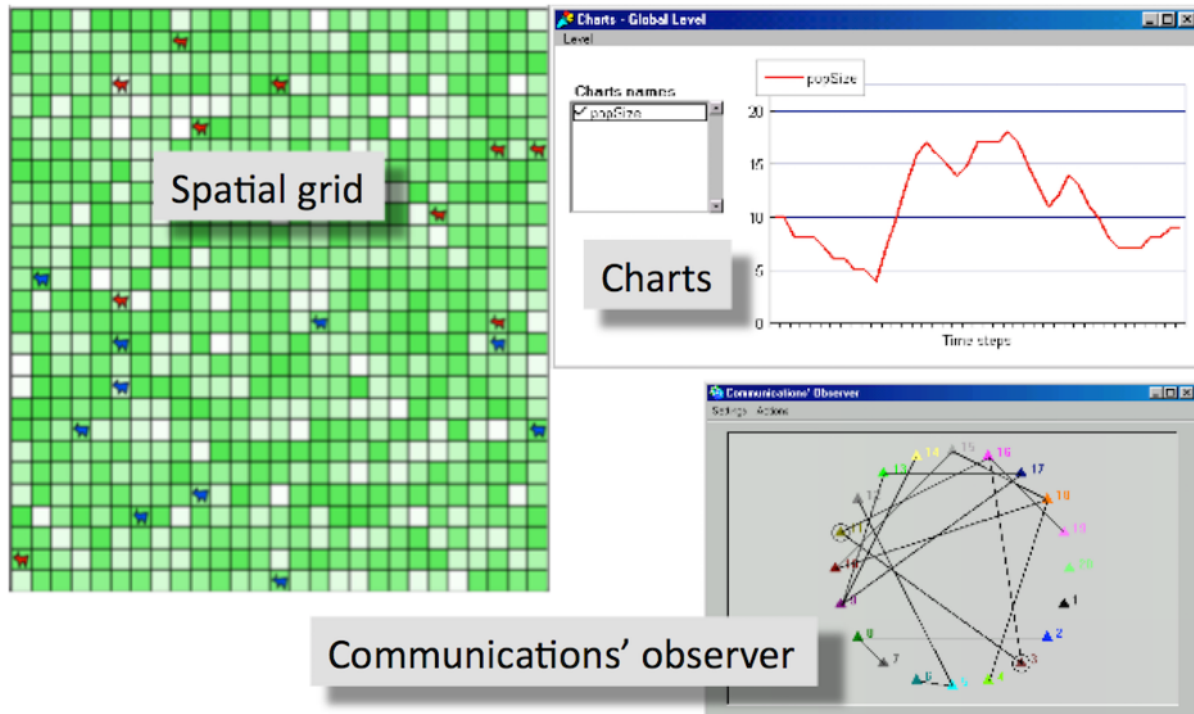


Figure 7 : Trois manières de visualiser une simulation dans Cormas

4.4. Vraiment des agents ?

Afin de visualiser les réseaux de communication entre les agents (cf. "Communications' observer" de la figure ci-dessus), Cormas propose la classe *AgentComm* qui lui associe une *MailBox* et un canal de communication (*Channel*). Sans bloquer l'agent émetteur lors de l'envoi d'un message, le canal est chargé de transmettre ce dernier aux boîtes des destinataires de façon asynchrone (envoi immédiat) ou synchrone (délivré en fin de step).

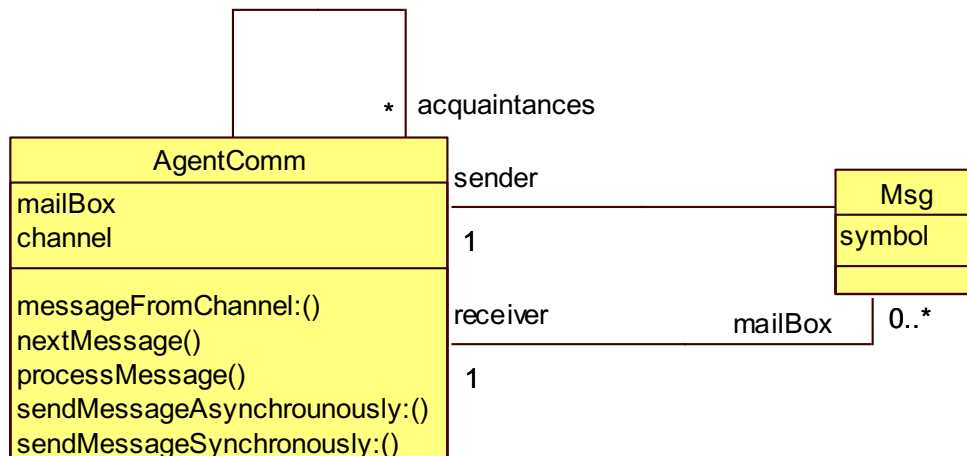


Figure 8 : Diagramme de classes de l'agent communicant

Dans l'idée de répondre à la question posée par Drogoul, Vanbergue, et Meurisse (2003) « où sont les agents ? », ces mécanismes avaient aussi été conçus pour renforcer ce qui distingue les agents des objets : le concept d'autonomie, de réification d'envoi de message, d'asynchronisme, de conversation et d'actes de langage, etc. Or la gestion de conversations entre agents n'est techniquement pas facile à garantir. Pour des agents autonomes, threadés ou distants¹⁷, l'enchaînement des messages nécessite des règles pour faire en sorte de produire une "discussion" cohérente et suivre son déroulement au cours du temps. Plusieurs tentatives de normalisation de la communication inter-agents ont ainsi été proposées telles que ACL (*Agent Communication Languages* qui précise un ensemble d'intentions appelées performatifs d'un message : affirmation, question, commande, ...) ou KQML (*Knowledge Query and Manipulation Language*, qui repose sur un protocole pour l'échange d'information), ou encore CNP (*Contract Net Protocol* pour les réseaux contractuels).

Cherchant à promouvoir le développement des SMA, la FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) spécifie des standards pour favoriser l'interopérabilité des applications, des services et des équipements informatiques basés sur le paradigme agent (*Physical* rappelle que les agents peuvent éventuellement être humains). En 1999, la FIPA a défini un ACL moins ambigu grâce à un langage sémantique formel SL (*Semantic Language*) associé à un protocole de communication de haut niveau pour la résolution de problèmes distribués tels que le commerce électronique. Les ACL définissent donc un cadre normalisé d'interactions. Ils sont principalement utilisés par l'industrie pour garantir le déroulement d'une conversation et faciliter l'interopérabilité entre systèmes hétérogènes.

Or ce domaine d'application n'est pas celui recherché par les utilisateurs de Cormas. Jusqu'à présent, ils n'essaient pas de faire communiquer des agents entre différents modèles implémentés sur différentes plateformes. Dans leur grande majorité, les modèles développés

¹⁷ Des techniques permettant à des programmes informatiques de s'échanger des informations existent déjà depuis quelques années comme RPC (Remote Procedure Call, le plus ancien protocole pour appeler des procédures à distance), RMI (Remote Method Invocation, mécanisme d'invocation de méthodes sur des objets Java distants) et CORBA (Common Object Resource Broker Architecture, proche de RMI et disponible pour de nombreux langages de programmation). Mais ces techniques permettent juste d'invoquer des méthodes distantes. Elles ne gèrent pas le suivi d'une discussion.

avec Cormas n'utilisent pas de protocole de communication prédéfini et le package *AgentComm-Msg-Channel* (Figure 8) ne fut utilisé que pour un ou deux modèles¹⁸.

En se demandant où sont les agents, (Drogoul, Vanbergue, et Meurisse 2003) constatent que les notions d'autonomie, de proactivité et d'interaction censées caractérisées les agents restent à « un niveau très métaphorique, mais ne sont pas traduites en propriétés computationnelles ». En regrettant aussi ce manque d'autonomie, J. Ferber déplore l'appauvrissement des idées initiales qui animaient les pionniers des concepts objets :

« La notion d'objet en génie logiciel apportait tout un ensemble de concepts, de technologies et de méthodologies. Il est apparu alors que dans bon nombre de cas, les enjeux initiaux des objets, et notamment ici aussi le concept d'autonomie, n'avaient pas vraiment trouvé de réelles solutions technologiques. Les langages objets dont on dispose aujourd'hui ne sont que des pâles reflets des idées initiales qui avaient habité les pionniers du domaine, à savoir Alan Kay avec Smalltalk et Carl Hewitt avec Plasma » (Ferber 2007).

S'ils déplorent l'absence d'autonomie structurelle et de proactivité (goals-directed behaviour) décisionnelle, A. Drogoul et ses collègues se proposent de développer un cadre méthodologique et une sémantique dédiée pour opérationnaliser des modèles véritablement agents.

Toujours est-il que l'autonomie n'est pas un concept évident et les êtres vivants sont moins autonomes qu'il n'y paraît (cf. chap. 3.1 « Les écoles de pensée en sociologie »). Leurs décisions dépendent fortement de leur milieu social, de leurs besoins physiologiques et du couplage social dans lequel ils sont engagés (Maturana et Varela 1994).

Le chapitre 6 de ma thèse de doctorat (Bommel 2009) traite de l'autonomie des agents. Je conclusais en distinguant deux formes d'autonomie dans les SMA : l'une est censée *émuler* l'autonomie sociale et le degré d'indépendance d'un être vivant ; l'autre cherche à encapsuler un agent dans des systèmes de protection qui garantissent son *intégrité informatique*.

Les partisans de l'intégrité informatique refusent de considérer l'action comme une modification directe de l'état de l'environnement et des autres agents. Ils veulent distinguer le geste de sa conséquence. Ce rejet doit conduire à une nouvelle forme de gestion des actions basée par exemple sur le principe "Influences-Réaction" (Ferber et Müller 1996). Pour certains, l'encapsulation qui protège la modification des attributs d'un objet ne suffit pas. Il faut aussi interdire toute référence directe à un agent. Celui-ci ne serait alors visible que par ses interfaces qui le matérialisent dans des espaces sociaux et physiques.

En poussant cette logique, l'agent devrait être divisé en deux parties : son cerveau en charge de la cognition et son corps qui devient un élément de l'environnement parmi d'autres auquel personne n'aurait directement accès, pas même son propre cerveau. Pour F. Michel, cette division corps/cerveau permet de respecter les "contraintes d'intégrité environnementale" :

Un agent n'est pas une entité en mesure de calculer les conséquences de ses actes. A ce titre, il est important qu'un agent ne soit pas en mesure de modifier directement les variables d'état de l'environnement. Autrement dit, les variables environnementales ne doivent pas être modifiées

¹⁸ Le modèle didactique *PlotsRental* (décrit à la note 11, page 20) est en fait le seul que je connaisse qui utilise le package *AgentComm* pour visualiser les échanges marchands sur l'espace de communication (Figure 7).

par les agents. C'est ce que nous avons appelé la contrainte d'intégrité environnementale.
(Michel 2004)

Toutes ces propositions pour protéger l'autonomie des agents obligent souvent à diviser artificiellement ces derniers en deux parties indépendantes. Elles conduisent à considérer le corps de l'agent comme une entité étrangère répondant à des influences du cerveau. Et au final, c'est l'environnement qui détermine l'action effectivement réalisée.

Pour autant, est-il nécessaire de passer par de tels artifices pour concevoir tout type de SMA ? A-t-on réellement besoin d'une autonomie forte pour spécifier un modèle multi-agent pour aider à la gestion des ressources renouvelables ? Les modèles développés sur Cormas montrent que les modélisateurs n'ont pas choisi d'utiliser le package *AgentComm* pourtant assez simple à mettre en œuvre. Certes, lorsque l'on cherche à transposer l'autonomie d'un être vivant sur un agent, il est nécessaire de prendre des précautions afin d'éviter certains artéfacts. Car de nombreux exemples montrent que la modification directe de l'état d'un agent par un autre conduit parfois à des aberrations en termes de comportement avec des conséquences sur les résultats des simulations.

Néanmoins, il ne me paraît pas nécessaire de passer systématiquement par des architectures compliquées pour émuler cette autonomie. Je ne suis donc pas partisan de ces solutions qui me semblent trop compliquées et contraignantes pour le modélisateur. En fonction de ses objectifs, celui-ci peut *émuler* l'autonomie de ses agents par une approche classique (c'est-à-dire simplement objet). Il est par contre indispensable qu'il ait conscience des biais que peuvent entraîner la modification directe de variables, qu'il les anticipe et propose des solutions adéquates en fonction de la situation. Il est alors nécessaire d'en tester la robustesse en vérifiant les conséquences sur le comportement des agents et sur les simulations.

Dans le cadre de la modélisation des ressources renouvelables, il ne me paraît donc pas opportun d'abandonner les approches maintenant classiques des SMA pour adopter des outils sophistiqués et contraignants pour protéger l'intégrité informatique des agents. Il est par contre nécessaire d'aborder la modélisation des interactions avec attention.

4.5. Gestion du temps et des interactions

Cormas n'impose pas de système de gestion du temps prédéfini. Cependant, tous les modèles développés avec cette plateforme utilisent la technique de simulation par "pas-de-temps". Bien qu'ayant montré dans ma thèse les effets des différentes politiques de gestion du temps¹⁹, nous avons choisi de laisser la liberté aux utilisateurs d'implémenter le système de gestion du temps qui leur convient.

A la différence des systèmes à équations différentielles, les simulateurs multi-agents utilisent deux types d'implémentation pour manipuler des événements discrets : la simulation à "pas-de-temps" constant (*step*), également appelée simulation par horloge, et la simulation

¹⁹ La partie technique de ma thèse de doctorat (Bommel 2009, deuxième partie) traite des aspects liés à la gestion du temps (chap. 5), de la notion d'autonomie des agents (chap. 6) et des interactions directes et indirectes (chap. 7).

événementielle. Cette dernière considère le temps comme une variable continue (un réel). Cependant l'état du système change de façon discrète à des instants précis : les événements. Calculées au début ou au cours de la simulation, les occurrences des événements sont souvent ordonnées dynamiquement dans une liste appelée échéancier. Pour ces simulations, le temps, considéré comme continu, est représenté par une suite d'événements discrets qui apparaissent à des intervalles variables. Selon la terminologie proposée par (Zeigler, Praehofer, et Kim 2000), on parle alors de modèle DEVS (*Discrete Event System Specification*).

Pour représenter l'évolution du temps, les simulations par horloge "discrétisent" le temps en "pas-de-temps" réguliers (step) comme dans le cas des systèmes dynamiques discrets. Pour ce type de modèles, Δt est constant (on considère généralement que c'est une valeur entière égale à 1 : 1 seconde, 1 jour, 1 an...). Les changements d'état ayant lieu durant l'intervalle $] t, t + \Delta t]$, une variable du système peut changer d'état toutes les Δt périodes. Entre les deux, elle est censée rester constante. Par ailleurs, les entités sont supposées évoluer toutes en même temps et simultanément.

Selon la classification de Zeigler, ces modèles appartiennent à la famille des modèles DTSS (*Discrete Time System Specification*). Ces simulations peuvent être considérées comme un sous-type de simulation événementielle DEVS où les tops d'horloge constitueraient les événements. Mais, leurs mises en œuvre sont très différentes et bien plus aisées à réaliser. Elles proposent deux procédures d'activation des entités qu'on nomme synchrone et asynchrone.

L'approche synchrone utilisée principalement pour les Automates Cellulaires, considère que les entités évoluent toutes simultanément (en parallèle). Pour émuler une évolution synchrone d'un réseau d'automates, on passe fréquemment par un artifice informatique appelé double buffering qui consiste en une mise à jour en deux passes de l'état des cellules. Ainsi l'ordre séquentiel d'activation de chaque cellule n'a pas d'influence sur les résultats de simulation.

Dans *l'approche asynchrone*, d'un point de vue du temps *réel*, les agents sont censés évoluer simultanément. A chaque step, tous les agents doivent avoir été activés une seule fois (activation n-asynchrone). Dans leur grande majorité, les SMA utilisent ce principe car sa mise en œuvre est simple et aisée. Mais à chaque itération, tous les agents sont activés un par un, de façon séquentielle. Malgré les apparences dues à la rapidité d'exécution, ils n'évoluent pas en parallèle. De plus, chacun met à jour son état visible directement pendant son activation. Ainsi, à un instant donné pris au cours d'un step, certains agents ont déjà changé d'état quand d'autres n'ont pas encore été activés.

Cette forme classique de gestion du temps peut avoir des effets non négligeables sur les résultats de simulation. Dans le cas d'utilisation de ressources communes par exemple, le premier agent activé prend rapidement l'avantage sur les autres agents : il se sert toujours le premier. Pour remédier à ce problème, la technique la plus employée consiste à mélanger aléatoirement l'ordre d'exécution des agents à chaque step. Statistiquement, on rétablit ainsi un partage en évitant de donner l'avantage systématiquement aux mêmes agents. Dans la lignée de *Sugarscape*, de très nombreux modèles utilisent cette gestion par "pas-de-temps" avec brassage aléatoire.

Si dans certains cas, cette stratégie influence peu les résultats des simulations, dans d'autres, les conséquences peuvent être considérables. Il suffit d'imaginer les effets de cette gestion sur un automate cellulaire (AC) type feu de forêt²⁰ : dans le cas d'une gestion synchrone, on obtient comme attendu une propagation régulière du feu de proche en proche ; mais si on utilise une gestion asynchrone avec mélange aléatoire des cellules de forêt et l'application immédiate de la fonction de transition, on obtient statistiquement une diffusion très rapide du feu. Le problème ici c'est que le résultat dépend en grande partie d'un facteur aléatoire qui n'est pas intrinsèquement défini dans le modèle conceptuel. Evidemment, cet exemple est caricatural mais il révèle bien l'importance du phénomène. Si une gestion synchrone type AC est souvent trop compliquée à mettre en œuvre pour les agents, le modélisateur doit trouver des manières de gérer leur activation qui limite ce type de biais.

Cependant, on peut minimiser l'impact de la gestion par horloge. De nombreux modèles utilisent cette activation asynchrone randomisée sans que leurs résultats soient pour autant liés à l'ordonnancement aléatoire. D'autre part, si l'ordre d'exécution des agents est décidé et justifié par le modélisateur, les variations des résultats sont considérées comme étant liées au domaine : tri des agents par ordre de vivacité, de force, de proximité, etc. Dans ce cas, la gestion séquentielle constitue précisément un élément du modèle. Mais bien des fois, le concepteur du SMA n'a pas conscience des impacts possibles de cet ordonnancement sur les résultats de ses simulations. Les conclusions sur son objet d'étude peuvent s'avérer être un artéfact. Lorsqu'on utilise une gestion par horloge, il est donc indispensable de prêter une attention toute particulière à l'ordonnancement des agents et à la granularité du temps. Cet aspect est souvent la source d'erreurs de réplification de modèles²¹.

Quel que soit le paradigme utilisé (équations différentielles, System Dynamic discret, SMA par simulation événementielle ou par horloge), la modélisation du temps reste un aspect sensible des simulations. A notre échelle, le temps semble s'écouler de façon continue même si des épisodes saisonniers surviennent régulièrement. Pour traiter des problèmes physiques continus, tel que des mouvements et des collisions de boules, certains préféreront utiliser des outils mathématiques de type équations différentielles, tandis que d'autres choisiront des systèmes multi-agents événementiels. Pour de tels problèmes, ces techniques sont indispensables, mais leur mise en œuvre est délicate et des erreurs peuvent facilement survenir.

Nombreux sont ceux qui pensaient que les architectures multiprocesseurs résoudraient ces problèmes. C'est le cas des auteurs de *Sugarscape* qui déplorent leur impossibilité de

²⁰ La fonction de transition est rudimentaire : si une cellule est dans l'état "forêt" et qu'au moins une de ses voisines est en "feu", alors elle deviendra en "feu" à son tour.

²¹ Lorsqu'ils ont indépendamment répliqué *Sugarscape*, (Lawson et Park 2000) et (Michel 2004) se sont focalisées sur l'impact de différentes gestions du temps (simulation par événements ou par horloge). Ils ont cherché à comprendre les raisons des oscillations fortes de population dans la version à "pas-de-temps". Leurs conclusions sont divergentes. Lawson et Park considèrent que la gestion événementielle doit être privilégiée car elle permet un amortissement des oscillations. Michel réfute ces conclusions et explique que l'homogénéité des conditions initiales couplée aux contraintes spatiales du système sont à l'origine des phénomènes oscillatoires. Il conclut que le mode DTSS exacerbe les biais de simulations, quand le mode événementiel permet de les gommer progressivement par le fait de l'activation asynchrone des agents.

moment à utiliser une machine basée sur un réseau de processeurs massivement parallèles qui, selon eux, leur permettrait d'exécuter la simulation de manière complètement parallèle. Pour des actions indépendantes, ces architectures sont envisageables, mais dès qu'il y a des interactions, un travail de synchronisation est nécessaire. On se retrouve alors avec les mêmes problèmes que dans les situations classiques d'utilisation d'une ressource commune, et donc de la résolution de conflit.

Malgré les apparences, ces difficultés ne constituent pas un obstacle uniquement d'ordre technique. Elles ne doivent pas nous obliger à utiliser systématiquement un modèle donné de l'interaction, de type « Influences-Réaction » (Ferber et Müller 1996). D'ailleurs, le fait que les agents agissent de manière séquentielle et non simultanée est-il réellement un problème pour tout modèle ? Pour des modèles traitant de l'accès et de l'utilisation de ressources, la simultanéité des actions n'est pas forcément la règle à suivre. Il n'est pas nécessaire d'appliquer un traitement sophistiqué de l'interaction comme il est utilisé pour des collisions de boules de billard ou pour résoudre des conflits d'ouverture de porte battante ! Pour la gestion des ressources, une telle technique ne paraît pas indispensable car les systèmes étudiés révèlent surtout des phénomènes discrets qui ne nécessitent pas forcément un traitement continu. Par ailleurs, une gestion par "Influences-Réaction" telle que défendue par Michel, Gouaich, et Ferber (2003) n'est pas un modèle neutre : elle conçoit l'utilisation d'une ressource selon un partage *équitable* entre les agents. Or ce choix ne doit pas être édicté par la technique informatique mais doit être compris comme une décision explicite du modélisateur.

La façon de gérer le temps pour les interactions indirectes (des agents interagissent indirectement via une ressource par exemple) influence les résultats du modèle, même s'il est probable que les impacts soient moins significatifs que dans le cas d'interactions directes (agent-agent). Mais s'il veut représenter une filière, des interactions d'échanges marchands ou tout type de réaction en chaîne, le modélisateur doit porter une attention toute particulière à la manière de gérer le temps et les interactions entre agents. Souvent il est recommandé de passer par une entité supérieure (un marché, un commissaire) qui règlera ces échanges (cf. note 11, page 20).

Techniquement, aucune gestion du temps et des interactions n'est meilleure qu'une autre. Le modélisateur doit simplement réaliser que celle qu'il choisit appartient au domaine modélisé. Ses choix doivent être clairs, explicites et justifiés. C'est la raison pour laquelle Cormas n'impose pas de choix dans le mode de d'activation des agents.

4.6. Du modèle au jeu et du jeu au modèle

En cherchant à intégrer progressivement les connaissances produites par les chercheurs et les différents acteurs d'un territoire, l'approche ComMod favorise la réflexion sur l'évolution de ce territoire. Cette démarche particulière de prospective vise à examiner collectivement des voies alternatives de développement. A partir de la conception d'une vision partagée de la situation actuelle et de ce qui est le plus susceptible d'arriver (scénario du statu quo), l'objectif est d'examiner les conséquences probables d'autres alternatives, tant en termes d'utilisation

des ressources naturelles (agriculture, pêche, extractivisme et activités animales) qu'en termes d'organisation de producteurs ou de politiques publiques locales.

La démarche globale est envisagée comme un processus itératif de recherche selon un cycle terrain → modélisation → simulation → terrain (Étienne 2010). Cela ne signifie pas nécessairement une complexification progressive d'un modèle qui devrait incorporer de plus en plus d'éléments pour mieux "coller à la réalité", mais plutôt l'acceptation d'une diversité de modèles qui constituent alors une véritable base de connaissances.

Historiquement, l'utilisation de jeux de rôles apparaît rapidement dans ComMod. Déjà, dans sa thèse qui porte sur la viabilité des périmètres irrigués dans la région de Podor au Sénégal, Olivier Barreteau avait conçu et implémenté un SMA. Mais pour présenter son modèle aux acteurs de Podor et les faire discuter sur la gestion de l'eau, Olivier avait produit une version simplifiée de son modèle sous la forme d'un jeu de rôle. Cette version vivante permettait de s'abstraire du modèle informatique en mettant en situation les acteurs. Les hypothèses du modèle, les formes d'interaction entre agents et leurs comportements ont pu ainsi être discutés lors des débriefings (Barreteau, Bousquet, et Attonaty 2001). Le couplage SMA et JdR peut ainsi être vu comme la possibilité d'ouvrir la boîte noire d'un modèle multi-agent et pour en permettre une sorte de "validation sociale" (Barreteau et Bousquet 1999).

P. D'Aquino et ses collègues (D'Aquino et al. 2003) ont ouvert la voie à un type de combinaison inverse à partir d'un projet qui traitait de la décentralisation des plans d'occupation des sols dans le delta du Sénégal. Dans les communautés avec lesquelles ils ont travaillé, des jeux de rôles ont d'abord été conçus et joués avec les acteurs du delta. Se basant sur les éléments de ces jeux, ils ont ensuite développé des SMA avec Cormas dont les comportements des agents reposaient sur les règles identifiées durant les jeux et discutées lors des phases de débriefing. Les simulations ont alors été déroulées en présence des personnes ayant participé aux sessions de jeux. La compréhension du lien direct entre les deux outils fut facilitée par la proximité des éléments d'interface et en particulier de la représentation spatiale : ce qui apparaît sur l'écran de l'ordinateur est une reproduction fidèle du plateau de jeu, divers symboles peuvent également reprendre les figures des cartes utilisées dans le jeu. Ce type de combinaison permet aux participants de bien comprendre la structure et les principes du modèle conceptuel en le jouant, de proposer des scénarios et ensuite de les tester sur l'ordinateur, en ayant ainsi bien conscience du statut du modèle de simulation informatique. Celui-ci n'apparaît pas comme un outil complexe délivrant des recommandations, mais comme un équivalent du jeu de rôles plus efficace pour explorer les scénarios (Le Page, Abrami, et al. 2010).

Le site www.commod.org, géré par mon collègue Christophe Le Page, présente de nombreuses études de cas mettant en œuvre une démarche ComMod où l'outil privilégié est un jeu de rôle, sans le passage obligé par un modèle de simulation.

Outre ses nombreux avantages (Janssen et Ostrom 2006), le jeu de rôles peut entre autres servir à l'extraction de connaissances. Lors d'une session de jeu, l'observation directe des comportements des joueurs apporte de nouvelles connaissances. Lors d'une session, il faut observer par différents moyens les actions effectuées par les participants, ainsi que leur réaction suite à une situation donnée. Lors des phases de débriefings individuels ou collectifs,

on demande alors aux joueurs d'expliquer *pourquoi* ils ont décidé de prendre telle ou telle décision dans le jeu. En les interrogeant sur les informations qui leur ont été nécessaires pour ces choix, on incite à l'introspection et l'on parvient ainsi à formuler des connaissances implicites.

Par ailleurs, la distanciation à la réalité qu'offre le jeu permet de libérer plus facilement la parole. Et des situations sociales tendues qui sont rarement exprimées lors des entretiens, peuvent apparaître au grand jour.





4.7. Modèles de simulation à base d'agents hybrides

A partir du modèle du domaine, le modèle de réalisation peut représenter les acteurs de deux façons distinctes : (i) soit par des agents virtuels exécutant des activités prédéfinies dans un SMA informatisé, soit (ii) des acteurs humains jouant leur rôle dans un jeu de rôle (JdR). Même si ce n'est pas dans le sens classique du terme, un JdR peut être vu comme une représentation du monde, à savoir un modèle. D'ailleurs O. Barreteau (2003) met en évidence cette correspondance entre SMA et JdR : agent \leftrightarrow joueur, tour de jeu \leftrightarrow pas-de-temps, plateau de jeu \leftrightarrow grille spatiale, simulation \leftrightarrow session de jeu. Dans cette optique, on peut considérer le JdR comme un SMA humain.

Sur la base d'un même modèle conceptuel, on peut alors proposer deux formes de simulation : soit une simulation informatique à partir de l'implémentation de ce modèle en un simulateur²², soit par le déroulement d'un jeu de rôle dans lequel les participants prennent des décisions et interagissent dans le cadre de règles imposées par le modèle conceptuel.

Entre ces deux extrêmes, de nombreuses situations intermédiaires existent où certaines décisions sont choisies par des êtres humains et d'autres sont automatisées par l'ordinateur. Le terme « modèle de simulation hybride » couvre toutes ces situations intermédiaires. Le tableau suivant présente la diversité des situations :

²² Le *simulateur*, au sens de Zeigler, est un logiciel complet qui peut être initialisé et qui peut tourner sur une machine. Zeigler a introduit cette notion dans la deuxième édition de son livre (Zeigler, Praehofer, et Kim 2000)

Nature de la décision	Humaine à 100 %		Intermédiaire	Informatique à 100 %
Typologie des agents modélisés	Agent humain : joueur	Agent composite simple	Agent composite hybride	Agent informatique : agent virtuel
				
	Pas d'avatar	Avatar non décisionnel	Avatar partiellement décisionnel	Avatar autonome








Figure 9 : Types d'agent selon la répartition entre décision humaine et décision spécifiée informatiquement (Le Page, Abrami, et al. 2010). Illustrations par trois utilisations d'un même modèle conceptuel (projet *FuturAgua*, Costa Rica), avec un jeu de plateau (photo de gauche), une simulation classique (photo de droite avec des producteurs), et une simulation interactive (photo centrale, avec des élèves d'une école du Guanacaste).

Dans le 3^{ème} chapitre (Le Page, Abrami, et al. 2010) du livre consacré à ComMod (Étienne 2010), nous présentons une typologie des systèmes multi-agents/multi-acteurs. D'un côté, les simulations portées par des agents humains (JdR) sont dénommées *MAH* (Modèle basé sur des Agents Humains). De l'autre, les simulateurs basés sur des agents informatiques ou virtuels sont appelés *MAV* (Modèle basé sur des Agents Virtuels). Entre ces deux extrêmes, nous utilisons le terme *MAHy* pour parler des modèles de simulation à base d'agents hybrides qui désignent les participants dans le système informatique. Un avatar, le représentant informatique d'un agent humain²³, peut n'avoir aucune autonomie décisionnelle. On le définit alors comme un « agent composite simple » ou pion virtuel que le joueur manipule. Mais si un avatar agit potentiellement sans intervention du joueur (par exemple lorsqu'il exécute des activités routinières automatiquement mais que les choix stratégiques sont décidés par son joueur), on le considère comme une entité semi-autonome que l'on dénomme « agent composite hybride ».

Pour l'ensemble de ces situations intermédiaires, le support informatique n'est qu'une composante du modèle de simulation (un des éléments du jeu) et non un modèle informatique en lui-même. D'ailleurs parmi l'ensemble des modèles développés avec ComMod, il arrive fréquemment qu'à partir d'un même cadre conceptuel unique (modèle du domaine), plusieurs modèles de simulation (au sens large) soient mobilisés.

²³ Le terme d'*avatar* est habituellement utilisé pour désigner des ensembles d'informations ou des personnages numériques, qui représentent les habitants des mondes virtuels. Emprunté au Sanskrit, l'origine de ce terme provient des avatars (*avatara*) de Vishnou qui « descendent du ciel » (Georges 2012).

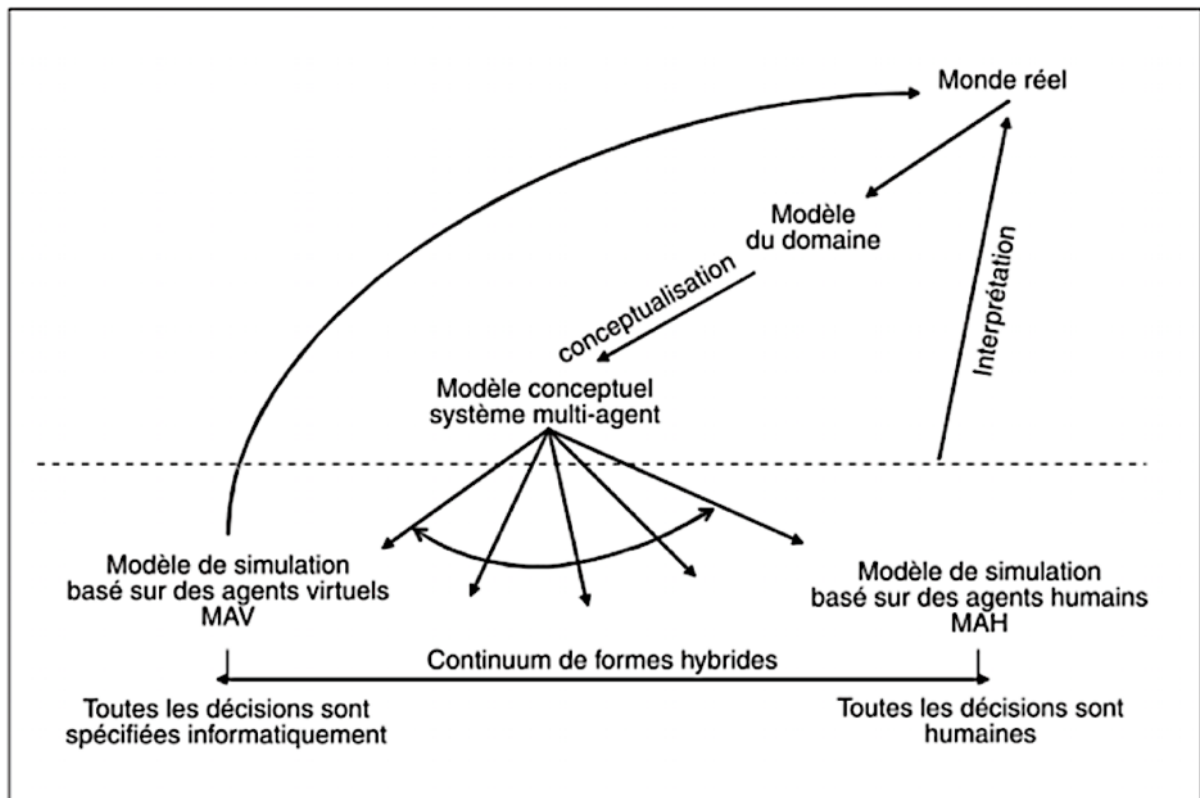


Figure 10 : De la réalité à l'implémentation de modèles de simulation fondés sur des agents (Le Page, Abrami, et al. 2010).

Le recours à l'informatique offre la rapidité des simulations et l'efficacité des calculs. Cinq fonctions principales peuvent être énumérées : 1) la simulation rapide de la dynamique des ressources et donc la possibilité de simuler le système sur le long terme, 2) le calcul et l'affichage d'indicateurs sociaux, économiques et environnementaux, mais aussi d'indicateurs individuels ; 3) la visualisation de l'espace (état des ressources, positionnement des agents, matérialisation des activités, mosaïque des couverts végétaux, réseau hydrographique) ; 4) la saisie et l'enregistrement des décisions des participants ; 5) l'enregistrement des parties pour les rejouer lors des phases de débriefing. La version informatisée du jeu de rôle permet de répéter plusieurs sessions et parfois en présence d'un grand nombre de participants.

A l'inverse, une session de JdR est bien plus lente, mais outre la dimension ludique, elle offre plus de liberté dans les actions des participants et permet une communication directe et non-verbale entre les joueurs.

P. Guyot définit les simulations multi-agents participatives comme « des expériences menées en laboratoires ou à travers le réseau Internet, avec des participants humains et qui s'inscrivent dans une démarche multi-agents » (Guyot 2006). Il explique alors que « chaque participant est assis à un poste de travail, et toutes les interactions, conçues comme des interactions entre agents, se font par le biais de l'ordinateur ». Il considère ce type de simulation comme un « système multi-agents idéal ». Pourtant la majorité des expériences que nous menons, ne répondent pas à cette définition trop centrée sur l'outil informatique.

Crookall et al. (1986) proposent une classification des simulations hybrides en fonction de la place relative de l'ordinateur et du contrôle exercé par les participants. Par exemple, ils nomment « Computer-Dependent » des simulations classiques où les participants ne peuvent qu'observer le déroulement d'une simulation sans agir dessus. A l'opposée, la « Computer-Based simulation » se rapproche des jeux type « first-person shooter » (FPS) dans lequel un joueur interagit en continu avec la simulation. La dextérité et la précision du joueur sont des atouts pour gagner. Entre les deux, les « Computer-Controlled simulations » sont régulièrement interrompues pour proposer des temps de réflexion et de discussion entre les joueurs. Enfin, pour le type « Computer-Assisted », les joueurs n'interagissent pas avec la simulation : une session se déroule à l'écart de l'ordinateur qui n'enregistre que des inputs provenant des animateurs.

Les simulations interactives que nous mettons en œuvre sont généralement de type Computer-Controlled ou Computer-Assisted simulation. Il est important que les participants puissent interagir entre-eux et avec le simulateur, mais leur dextérité à interagir avec l'ordinateur ne doit pas privilégier certains. Dans nos ateliers, les participants sont au cœur de la démarche et l'ordinateur n'est qu'un support qui assiste la simulation en facilitant les calculs. A l'inverse de la distance permise par Internet, nous privilégions la proximité physique. Car le jeu doit révéler les interactions entre les joueurs, que ce soit par le dialogue direct ou par la communication non verbale. C'est souvent là que se dévoilent des façons d'être, des tensions ou des arguments qui éclairent une situation. D'ailleurs, la projection d'un paysage simulé sur un support horizontal rapproche les participants et offre une sorte de chaleur et d'intimité. Les participants se rapprochent de ce décor illuminé sur lequel ils positionnent leurs avatars et matérialisent leurs actions. Mais surtout, autour de ce support, ils discutent, s'échangent des objets et revivent des situations qu'ils ont parfois vécues.



Figure 11 : Un jeu de plateau et une simulation projetée sur un support horizontal offrent une proximité qui permet la convivialité (Projet Clim-Fabiam, Piraquara, Amazonie).

Dans certains cas, mais pas systématiquement, le JdR ou la simulation hybride fournit des informations pour le modélisateur qui peut alors repérer des archétypes de comportements pour alimenter un MAV, ou un « Computer-Dependent », bref une simulation classique qui pourra être analysée de façon plus exhaustive.

5. Les évolutions de la plateforme Cormas

5.1. Des développements orientés vers la conception et l'utilisation de modèles hybrides

Bien qu'étant en charge de la plateforme et du site web associé, nous formons avec mes collègues (Christophe, François, Nicolas et Bruno principalement)²⁴ une petite équipe qui essaie de faire évoluer Cormas. Mais les développements n'obéissent pas à un cahier des charges bien défini, ni aux bonnes pratiques du génie logiciel : pas de procédure systématique de contrôle de qualité pour répondre aux "attentes du client", ni de ligne de conduite pour "rationaliser les coûts de production et de suivi". Jusque récemment le développement de Cormas s'apparentait plutôt à une pratique artisanale avec des ajouts ou des améliorations des uns ou des autres en fonction des besoins (souvent urgents) qui surviennent au cours d'un projet ou d'une formation. Etant tous investis dans des projets de développement sur le terrain, personne n'a pas pu se dédier complètement à ce chantier qui avance en fonction des disponibilités de chacun. Un développeur informaticien ne serait pas de trop ! A titre d'exemple, ce n'est que récemment que nous disposons d'un système de *versioning* (GitHub) pour la migration sous Pharo (voir chap. 8.2, page 77).

Malgré un développement artisanal et un manque de ressources humaines en informatique, Cormas a su fédérer une communauté de praticiens de la modélisation participative (Le Page, Becu, et al. 2010). Les formations à la modélisation que nous donnons régulièrement (cf. chap. 7) jouent un rôle important dans cette relative réussite. Evidemment la plateforme n'a pas la force de frappe de Netlogo, Repast ou de Gama, mais elle a su trouver une niche dans le domaine de la modélisation collective et de la simulation interactive.

Notre analyse bibliographique de 2012 montrait déjà une augmentation de ce type d'utilisation des modèles (modèles-jeux, *Game models*) au détriment des modèles théoriques stylisés :

²⁴ La liste des contributeurs est composée dans l'ordre des interventions, de : Innocent Bakam, Hubert Proton, François Bousquet, Christophe Le Page, Pierre Bommel, Alassane Bah, Nicolas Bécu, Emmanuel Lieurain, Jean-Christophe Soulié, Paul Guyot, Jean François Lefevre, Bruno Bonté... avec un "gender issue" impeccable !

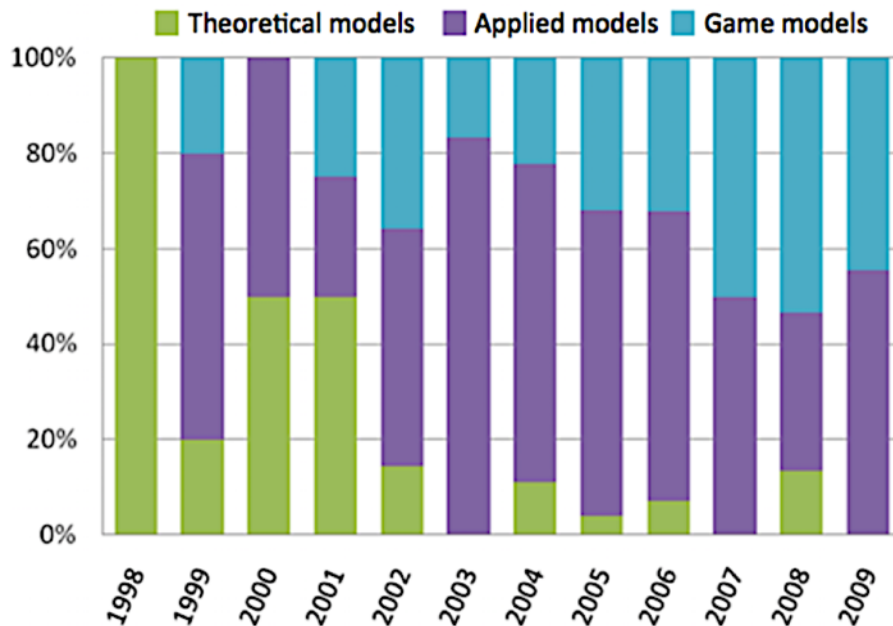


Figure 12 : Évolution des publications présentant des modèles développés sous Cormas

Le nombre de modèles théoriques (en vert) développés avec Cormas a commencé à diminuer après la quatrième année. Par la suite, les modèles ont été principalement appliqués à des études de cas réels (en violet). Mais le plus remarquable est l'augmentation constante de l'utilisation de Cormas en appui aux jeux de rôle (en bleu), et ce depuis les premiers jours de la plate-forme. Aujourd'hui, la catégorie des modèles hybrides (*MAHy*, associant JdR et SMA), représente la majorité des publications mentionnant l'utilisation de Cormas.

En conséquence, les travaux engagés dernièrement sur Cormas vont dans le sens de cette approche. Au lieu de regarder une simulation sans pouvoir intervenir sur les processus en cours, de nouveaux outils permettent d'interagir avec le simulateur. Les utilisateurs peuvent définir les indicateurs qui leur conviennent et choisir d'observer la simulation à travers ces filtres. S'agissant fréquemment de ressources spatialisées, ils ont aussi la possibilité de ne voir qu'une partie de l'espace (généralement celle qui les concerne). Ils peuvent aussi interagir directement sur l'agent censé les représenter (leur avatar) en les déplaçant ou en leur envoyant une série de messages et en agissant sur le couvert végétal ou la ressource hydrique via cet intermédiaire.

Dans ce but, nous développons Cormas vers deux directions: 1) pour faciliter la conception collective et l'implémentation de SMA, et 2) pour permettre le développement de simulations interactives, afin de permettre aux utilisateurs de participer activement, seul ou avec d'autres, dans l'exécution d'un scénario.

En tant que framework générique, Cormas permet à l'utilisateur de spécialiser et d'affiner les entités prédéfinies pour son propre modèle. La version actuelle est particulièrement adaptée pour:

- Afficher des points de vue particuliers du paysage simulé ; ouvrir plusieurs zooms et spécifier des "habitus" sur la manière de voir et d'interagir avec une simulation,

- Modifier les paramètres d'un ou plusieurs agents,
- Manipuler un agent directement avec la souris de l'ordinateur : le déplacer sur un emplacement précis, en lui envoyant des messages prédéfinis ou même de concevoir de nouveaux comportements grâce à un éditeur de diagramme d'activité directement interprété par l'agent.
- Remonter dans le temps d'une simulation et re-simuler à partir d'un état antérieur (bifurcations), ou juste rejouer une simulation précédemment stockée,
- Distribuer une simulation sur plusieurs machines, pour suivre son évolution à distance et pour manipuler des entités à distance.

5.2. Aide à la conception d'un modèle

Etant donné que Cormas est destiné à des non-informaticiens qui doivent se former à la fois à la conception objet et à la programmation, la plateforme propose un certain nombre d'interfaces qui les aident à élaborer leur modèle.

Depuis mon arrivée dans l'équipe, les formations que nous donnons mettent davantage l'accent sur la partie conception et formalisation des modèles que sur la partie programmation. Les cours intitulés « Introduction aux concepts Objet et à UML » (aspects statiques et aspects dynamiques) s'accompagnent de nombreux exercices aux termes desquels les participants commencent à maîtriser la modélisation objet. Ils mettent alors en pratique ces compétences pour concevoir en groupe un modèle simple en proposant différents diagrammes UML. Ils doivent ensuite traduire ces diagrammes en code pour implémenter leur premier simulateur.

Au regard des évaluations faites par les participants à ces formations, il ressort que la section sur la formalisation des modèles par UML est spécialement appréciée. Les participants comprennent l'intérêt de maîtriser ce formalisme à la fois pour publier leur modèle, mais surtout pour la phase de conception individuelle ou collective.

Nous avons développé un éditeur de diagramme de classes UML qui permet de concevoir la structure d'un modèle et de générer le code source (Uhnak et Bommel 2016). Inversement, cet éditeur est également capable de lire un code existant pour générer un diagramme par rétro-ingénierie.

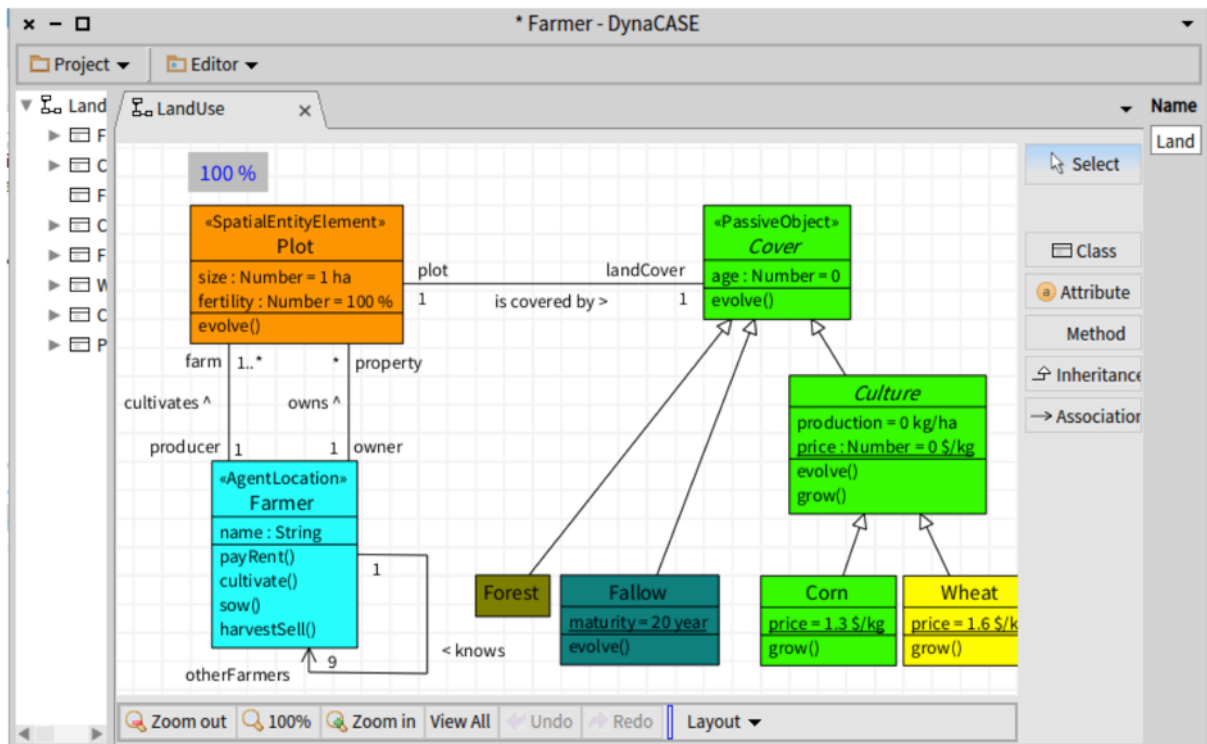


Figure 13 : Vue complète de l'éditeur UML affichant un modèle simple "LandUse" (ibid.)

Il est évident que le code généré ne permet pas d'exécuter une simulation. Il ne contient que la structure du modèle : classes, attributs (avec leur valeur par défaut) et associations. Les méthodes pour instancier une simulation, activer les agents et exécuter leurs comportements doivent encore être programmées. Néanmoins, les classes génériques du framework peuvent être réutilisées par les agents spécifiques d'un SMA. Comme Cormas est orienté vers le design collectif de modèles, ce générateur de code facilitera grandement la participation des intervenants pour l'élaboration de modèles sur leurs propres systèmes socio-environnementaux.

Malheureusement, cet éditeur n'est pas encore complètement intégré dans la version officielle de Cormas. Il se trouve sous la forme d'un logiciel indépendant (une spécialisation de *OpenPonk*, Uhnák et Pergl 2016) capable de générer des fichiers XMI et du code Smalltalk pour Cormas. Son intégration définitive dans Cormas aura lieu avec la sortie officielle de Cormas-Pharo (cf. chap. 8.2)

En attendant cette sortie, les modélisateurs bénéficient d'outils pour implémenter leur modèle. Puisqu'ils utilisent un framework, ils doivent spécialiser certaines classes prédéfinies, principalement des entités «sociales», «spatiales» ou «passives».

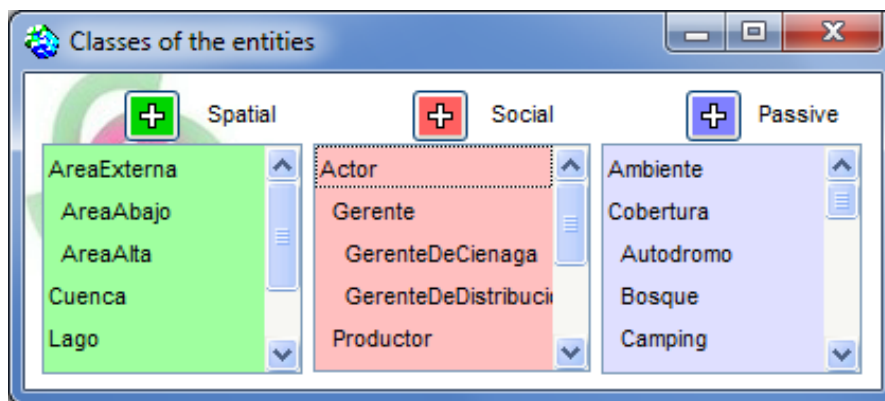


Figure 14 : Gestion des classes

Lors de la définition d'une classe, des attributs peuvent être ajoutés. Cormas aide le modélisateur dans le réglage de la valeur initiale de ces attributs. Pour tester l'effet d'une nouvelle valeur, un tableau présentant tous les paramètres du modèle permet d'en modifier temporairement les valeurs. Par exemple, il est facile de changer le nombre initial de "ruminants restreints" (ECEC) comme indiqué dans la capture ci-dessous.

	Class	Attribute	Value
	ECEC	restrainedInitialNumber	50
2	ECEC	unrestrainedInitialNumber	10
3	VegetationUnit clas	r	0.2
4	VegetationUnit clas	K	10 (kg)
5	VegetationUnit	biomass	0 (kg)
6	Restrained class	fertilityThreshold	100 (energyPoint)
7	Restrained class	harvestRate	0.5
8	Restrained class	metabolicRate	2 (energyPoint)

Figure 15 : Interface des paramètres

Ici aussi ces outils ont une portée pédagogique : ils amènent l'apprenti modélisateur à distinguer les paramètres de leur modèle du code. Au lieu de noyer ces valeurs au milieu d'instructions, ces éléments importants sont clairement identifiés et pourront être facilement accessibles pour la future maintenance ou la transmission du modèle à d'autres personnes.

Dans Cormas, un autre outil UML est disponible : un éditeur de "diagramme objets" (appelé *Visual Inspector*) permet par exemple de visualiser un agent d'une simulation, puis en cliquant sur chaque attribut d'afficher sa valeur (nom, âge, id ...) mais aussi les liens qui le relie à d'autres entités. On peut alors naviguer d'objet en objet en dévoilant progressivement le réseau des liens qui les connectent : une cellule est reliée avec ses 8 voisines et elle peut accéder à ses occupants, chacun d'eux connaissant à son tour la cellule sur laquelle il se trouve.

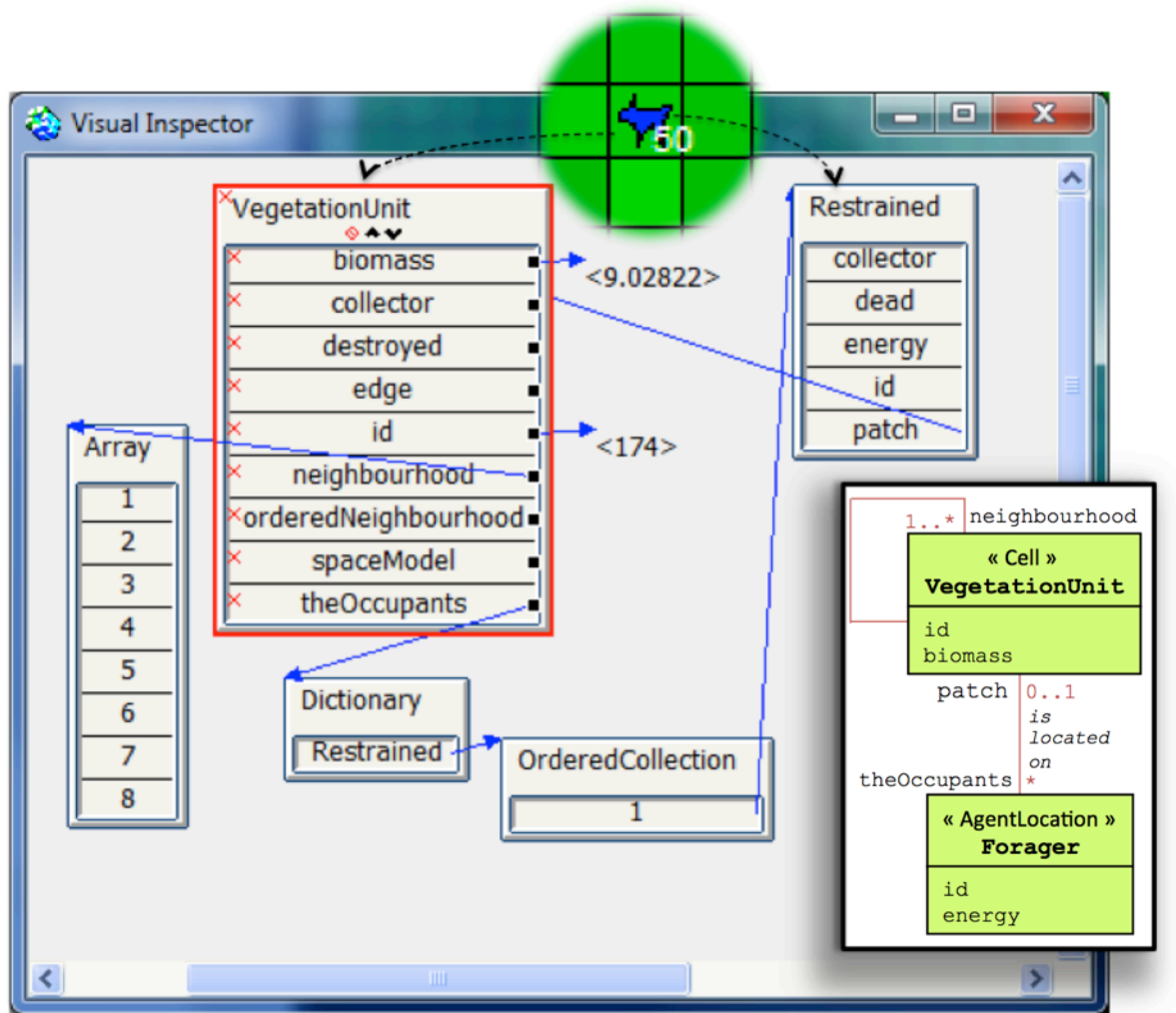


Figure 16 : Le *Visual Inspector* permet d'afficher les objets et les liens pour expliquer une réalisation d'un diagramme de classes (encadré blanc)

Cet outil est donc bien pratique en phase d'apprentissage pour illustrer le concept d'association entre classes et celui de lien entre objets.

5.3. Point de vue et multi fenêtrage

“Ce n'est pas l'écosystème que nous voulons modéliser, mais l'écosystème vu par plusieurs points de vue” (Bousquet, Antona, et Weber 1994)

Dès les origines de Cormas et comme le souligne la phrase en exergue, l'accent a été mis sur la notion de points de vue. Il s'agissait de pouvoir suivre une simulation selon différents aspects (espace physique, espace de communication, indicateurs). Il fallait aussi pouvoir regarder la grille spatiale selon plusieurs points de vue (PoV), comme par exemple voir un paysage selon une perspective foncière ou selon sa couverture végétale.

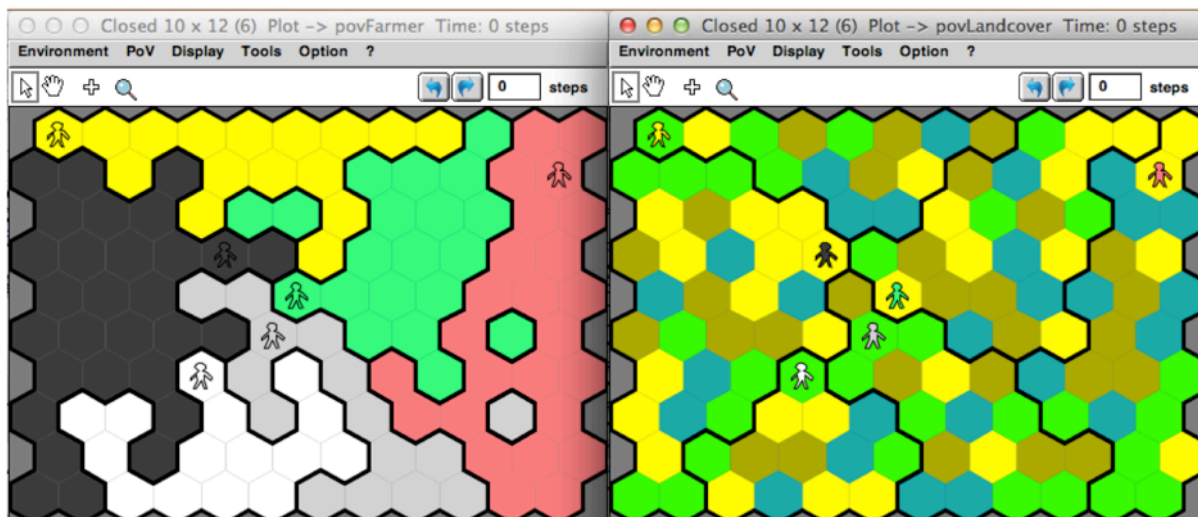


Figure 17 : Deux points de vue de la grille spatiale, montrant 6 agriculteurs et leur propriété foncière (à gauche), et les mêmes agents sur leur ferme d'exploitation (à droite). Dans ce cas, le couvert végétal est affiché. Suite à des locations de parcelles entre les agents, les propriétés foncières (gauches) ne sont pas similaires aux fermes effectivement exploitées (droite).

La Figure 17 montre deux points de vue distincts : le *povFarmer* affiche les parcelles selon la couleur de leur propriétaire, tandis que le *povLandcover* montre la répartition des différentes couvertures sur l'espace. Il est possible de visualiser l'environnement spatial à travers plusieurs fenêtres simultanément²⁵. Parce que le modèle est indépendant de la façon de le voir, on peut sélectionner différents PoV pour afficher (ou non) les entités.

Par défaut, trois PoVs sont proposés pour chaque classe : "nil" qui ne présente pas les instances de la classe, "default PoV" pour lequel une figure (ou une couleur) standard est affichée et "povId" qui affiche chaque entité avec une couleur différente. Mais il est facile de déterminer d'autres PoVs grâce à l'interface PoVSetter.

La Figure 17 montre également le contour d'agrégats : les propriétés foncières d'un côté (à gauche) et les fermes effectivement exploitées par les agents de l'autre. Composés de parcelles (EntitéSpatialeElementaire) ou d'autres agrégats, ces entités spatiales hiérarchiques sont composées (ou décomposées, fusionnées ou scindées) dynamiquement et permettent de spécifier des dynamiques à différents niveaux (ex : embroussaillage des pâturages au niveau cellulaire, et accroissement d'une forêt par sa bordure, au niveau agrégat, Fig. 18).

²⁵ L'affichage simultané n'était possible à l'origine et il m'a fallu refondre une partie du noyau de Cormas pour que la plateforme respecte davantage l'architecture MVC. La nouvelle grille spatiale repose sur l'éditeur *HotDraw* conçu à l'origine par Kent Beck et Ward Cunningham et ré-implémenté en Smalltalk par Patrick McCloughry, puis par (Brant et Johnson 1994). Le framework *HotDraw* respecte également l'architecture MVC. Ainsi un agent est le modèle de plusieurs *EntityPOV* qui elles-mêmes jouent le rôle de modèles pour les figures qui sont finalement affichées sur la grille.

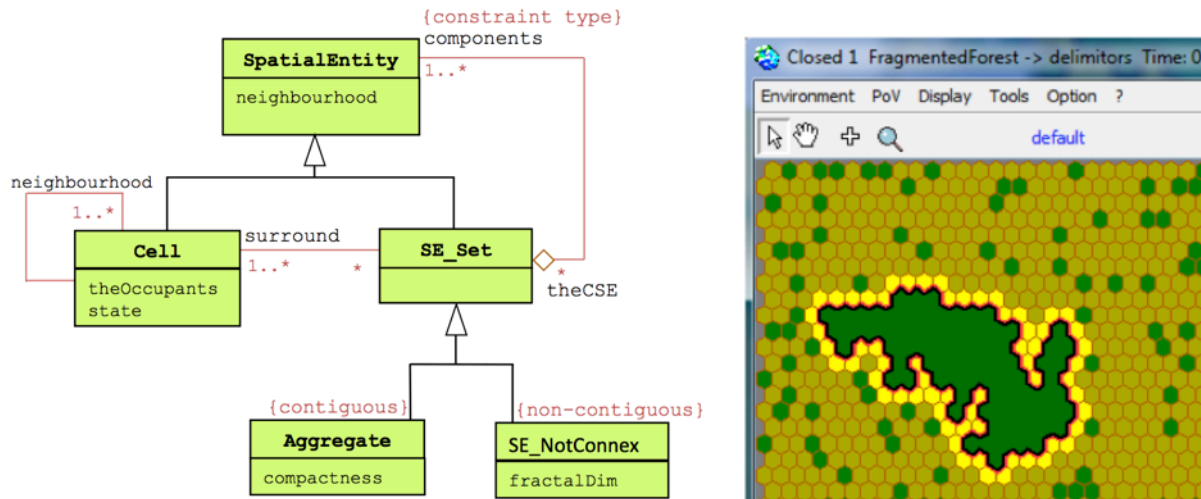


Figure 18 : Gauche : diag. de classes présentant l'organisation hiérarchique des entités spatiales. Droite : grille spatiale avec des parcelles (et leur propre dynamique) et un bosquet s'accroissant sur sa bordure (jaune).

Ce travail sur les entités spatiales hiérarchiques avait été initié avec S. Lardon (Lardon et al. 1998; Bommel et al. 2000; Lardon et al. 2000) et a été intégré dans Cormas par la suite (Le Page et al. 1999).

Pour n'afficher qu'une partie de l'espace, il est possible d'ouvrir une nouvelle fenêtre en zoomant sur une partie de la grille. Dans les simulations hybrides, il peut être intéressant que les joueurs n'aient accès qu'à une vue réduite de l'espace, afin de travailler sur les problèmes d'asymétrie d'information.

Une interface de configuration développée par N. Bécu réutilise les concepts de base de Cormas (PoV, manipulation). Elle permet de personnaliser la grille spatiale en spécifiant les points de vue disponibles et les manières d'interagir avec les entités du modèle. Cette fonctionnalité est basée sur le concept d'*habitus* défini par Bourdieu comme « l'ensemble des manières d'être, de sentir, d'agir et de penser qui sont propres à un individu » (Bourdieu 1980). Selon Bourdieu, un habitus structure le comportement et les actions d'un individu. Par conséquent, lors de l'élaboration d'un SMA hybride, la fonction *Habitus* de Cormas aide le modélisateur à contraindre les différents rôles et perception d'un agent-avatar, donc d'un joueur. La définition d'un habitus dans Cormas, consiste à définir (à partir d'une interface spécifique) : (1) comment l'utilisateur peut voir l'espace : quelles entités sont affichées et de quelle manière, quelles informations sont disponibles (informations textuelles ou traçage d'agents), et (2) la façon dont il peut interagir avec cette grille : quelles entités peuvent être créées et quelles actions peuvent être exécutées (se déplacer, consommer, brûler, etc.). Jouer avec ces paramètres de configuration permet au modélisateur de développer différentes façons d'accéder à l'information sur le système simulé.

Ainsi, deux configurations distinctes autorisent des points de vue et des contrôles différents et entraînent des asymétries d'information et d'action entre les joueurs. N. Bécu a beaucoup utilisé cette fonctionnalité pour traiter notamment des problèmes de l'étalement du péri-urbain et ses conséquences en termes de perte de surface agricole et forestière, et de destruction et fragmentation des habitats provoquant l'érosion de la biodiversité. Pour traiter de ces questions et faire discuter des mesures de conservation de l'environnement à l'échelle

des municipalités, il a développé un modèle hybride distribué qui simule les interactions entre le changement d'utilisation des terres et deux espèces emblématiques des campagnes françaises, ainsi que les eaux souterraines dont la qualité dépend du type d'utilisation des terres. Les joueurs (maire, promoteur immobilier, forestier, agriculteur et écologiste) disposaient de PoVs et d'actions spécifiques. Une telle asymétrie de visualisation et d'action permet aux participants de se plonger dans le rôle des véritables acteurs et de mieux comprendre leurs contraintes, leurs points de vue et les raisons de leurs choix souvent mal compris par les autres et qui pénalisent souvent la biodiversité (Becu, Frascaria-Lacoste, et Latune 2014).

5.4. Interaction avec la simulation

Pour interagir avec une simulation, il est possible à tout moment de modifier la valeur des paramètres des entités (comme présenté précédemment). Mais il est aussi possible d'agir directement sur l'espace et sur les agents pendant la simulation. Il y a principalement deux façons d'agir : soit sur l'ensemble des entités simultanément, soit sur certaines d'entre-elles. Dans le premier cas, nous pouvons changer l'état d'un groupe d'agents ou en créer de nouveaux. Dans le second cas, l'outil «Manipulation» permet à l'utilisateur de contrôler un agent individuellement pour le déplacer ou lui envoyer des messages. Une autre façon de faire est d'ouvrir un menu contextuel sur un agent et de sélectionner un message à partir d'une liste générée automatiquement (*introspection*) et qui contient toutes les méthodes de la classe et sous-classes de cet agent. La capture d'écran ci-dessous montre deux façons d'envoyer des messages à un agent : à gauche, la méthode "step" sera exécuté par chaque agent *Unrestrained* lorsque l'utilisateur cliquera dessus, ou à droite, en cliquant sur un agent, puis en sélectionnant une méthode de la liste du menu déroulant.

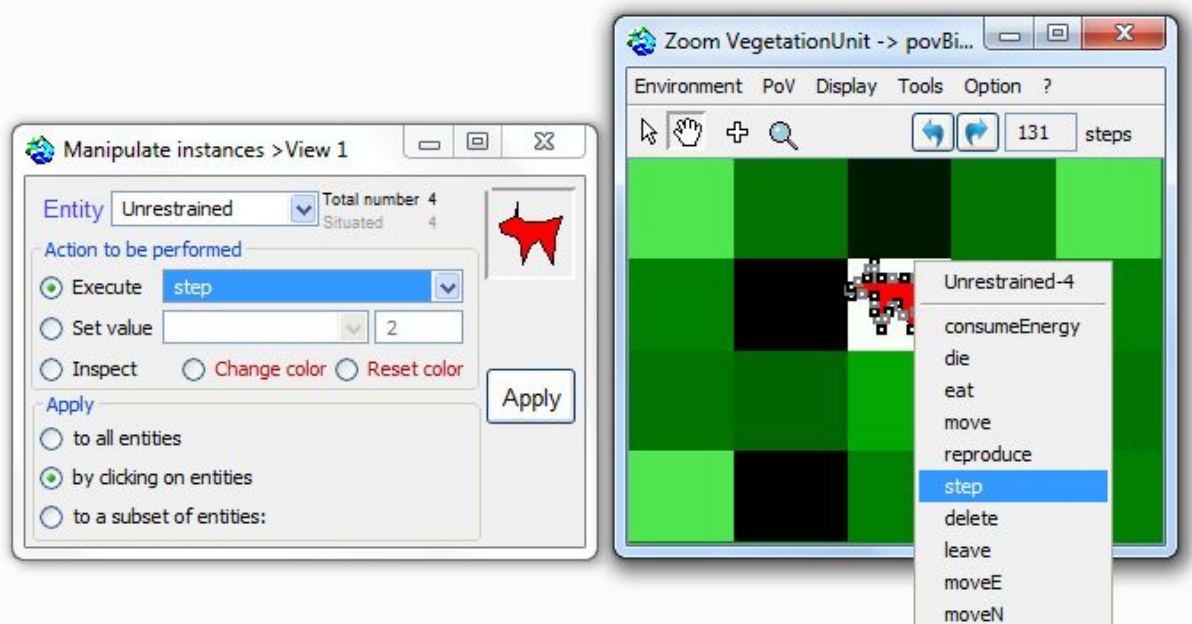


Figure 19 : Deux façons d'envoyer le message "step" à un agent. L'interface de manipulation (à gauche) permet de faire exécuter une action ou de changer la valeur des attributs d'un ou de plusieurs agents.

Outre les interactions avec des agents-avatars dans le cadre d'un jeu, « cette possibilité s'avère également très utile dans la phase de vérification d'un SMA. Il serait intéressant d'en faire usage dans les protocoles de réplique des modèles » (Le Page 2017).

5.5. Exploration de modèles

On ne connaît un objet qu'en agissant sur lui et en le transformant.

Jean Piaget, Psychologie et épistémologie, 1970

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, la conception d'un SMA ne donne pas immédiatement accès à la compréhension de son comportement. En effet, le temps joue un rôle actif et décisif en activant les entités progressivement. La séquence des activités et des interactions peut produire des résultats surprenants difficilement prévisibles. Même si les mécanismes élémentaires sont simples, nous ne sommes pas en mesure de prendre en compte de nombreux éléments qui s'influencent les uns les autres (Deffuant et al. 2003). C'est cette mise en mouvement, cette animation (du latin *animare* « donner vie ») qui fait s'exprimer le modèle. La simulation permet alors de comprendre le fonctionnement d'un SMA et d'évaluer si l'évolution du système virtuel est cohérente avec celui qu'il est censé imiter.

Mais une simple simulation ne suffit pas à comprendre son modèle. Il faut l'explorer de façon plus approfondie pour qu'au final l'utilisateur du modèle se forme un modèle du modèle, à savoir une compréhension de son fonctionnement qui s'abstrait de l'exécution particulière d'une expérience (Amblard, Bommel, et Rouchier 2007). Cette exploration permet non seulement de révéler et de corriger des points de dysfonctionnement du simulateur, mais surtout il procure à celui qui mène cette analyse, une meilleure compréhension des comportements du modèle. Au terme de cette exploration, l'utilisateur est capable d'identifier des classes de comportements du modèle en fonction des conditions initiales ou de certaines valeurs des paramètres. Cela nécessite alors d'identifier sous quelles conditions et pour quelles valeurs de paramètres telle ou telle forme émergente (pattern) tend à apparaître. Cette étape de l'analyse est sans aucun doute une des plus difficiles. Mais elle est indispensable car contrôler son modèle, c'est pouvoir expliquer les raisons de chaque phénomène révélé par la simulation. Cette connaissance permet de mieux anticiper les réactions du modèle, de mieux expliquer les résultats et d'apporter des éléments de réponses aux questions posées à l'origine du processus.

Or exploration est souvent négligée, car après la phase de conception puis d'implémentation, il reste peu de temps pour aborder cette nouvelle étape du processus. Toujours dans le souci de "plus de réalisme", on préfère souvent complexifier encore le modèle, plutôt que de le secouer dans tous les sens pour en comprendre toutes les implications. Pourtant, comme (Saltelli, Tarantola, et Campolongo 2000) le soulignent, l'analyse de sensibilité est un "ingrédient indispensable de la modélisation".

Si la plupart des plates-formes disposent d'outils pour visualiser des indicateurs, toutes ne proposent pas d'outils pour explorer facilement un modèle. Il ne s'agit pas uniquement de

faire varier la valeur des paramètres ou encore de répéter des simulations, mais aussi de sauver les résultats sous forme de fichiers bien classés (en limitant les erreurs de manipulation). Afin d'inciter les apprentis modélisateurs à mener des analyses de sensibilité sur leur modèle, Cormas propose un module d'analyse de sensibilité qui permet de générer facilement des plans d'expérience sans toucher au code du modèle. A partir d'interfaces dédiées (Fig. 20), le modélisateur peut lancer des analyses de sensibilité selon 3 formats : des analyses stochastiques simples qui sont répétées plusieurs fois, des analyses OAT (*One factor At a Time*) pour étudier de la signature des paramètres (la valeur d'un paramètre est changée progressivement à chaque simulation ou de façon aléatoire), et des analyses croisées pour lesquelles les valeurs de plusieurs paramètres sont modifiées simultanément. Les données de ces analyses (récupérés sous forme de séries temporelles, ou de moyennes, min ou max sur une période) sont enregistrées au format CSV ou Excel, qui contiennent les conditions de chaque simulation (valeurs des paramètres analysés, valeur de la graine aléatoire, durée, etc.). Le traitement des résultats nécessite alors un logiciel de statistique adapté, type SAS ou R (<http://www.r-project.org/>).

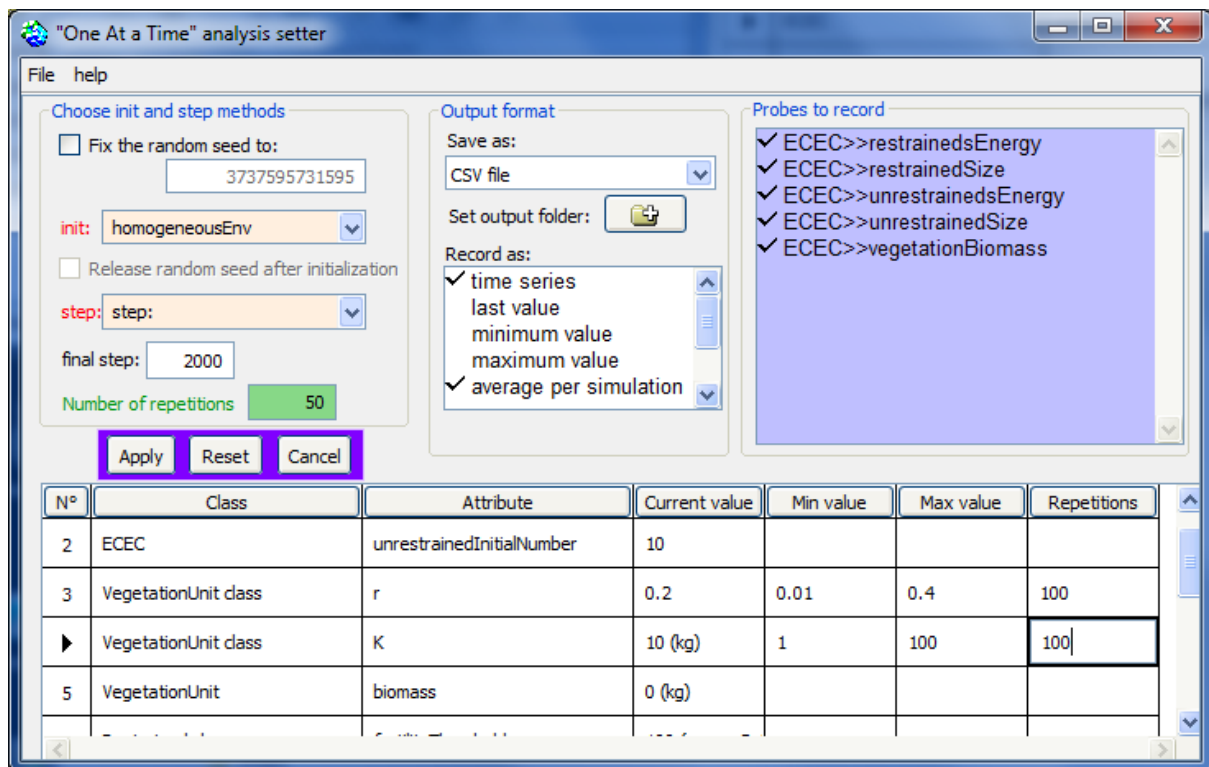


Figure 20 : Interface d'analyse de sensibilité OAT pour lancer des explorations de Monte-Carlo.

Par ailleurs, B. Bonté a réalisé un couplage entre Cormas et R qui permet de contrôler Cormas depuis R et de concevoir des plans d'expérience directement dans R. C'est cette voie qui sera privilégiée dans les prochaines versions de Cormas sous Pharo.

Enfin, mon collègue E. Delay a mis au point un plugin Cormas-Pharo dans *OpenMOLE* (Open MOdeL Experiment : <https://openmole.org> et <https://github.com/openmole/cormas-plugin>) pour explorer et optimiser des modèles SMA en tirant parti de la puissance d'environnement de calcul massivement parallèle type cluster ou grille de calcul.

5.6. Simulations distribuées

Grâce au travail de N. Bécu et de J.F. Lefevre, une simulation peut être distribuée sur plusieurs machines. Il ne s'agit pas de lancer N simulations en parallèles (nous utiliserons *OpenMOLE* pour cela). Ici la distribution signifie que plusieurs utilisateurs peuvent visualiser à distance la même simulation (avec différents points de vue) et peuvent manipuler les entités du monde simulé.

L'architecture de distribution qui avait été choisie ne se conforme pas à la norme IEEE des jeux vidéo classiques. Car cette norme est plus dédiée aux applications temps réel mises en place par l'industrie du jeu commercial et militaire (jeux massivement multi-joueurs). Notre objectif n'est pas par exemple de résoudre les problèmes complexes de *dead-reckoning*²⁶ pour la simulation massivement en ligne.

Dans Cormas, la distribution repose sur une architecture Client / Serveur. Le modèle n'est pas complètement dupliqué sur chaque ordinateur, mais seulement ses vues et ses contrôleurs (selon MVC). Ainsi, un seul ordinateur exécute la simulation (le serveur). Les autres ordinateurs connectés (les clients) affichent des points de vue spécifiques de l'environnement virtuel et proposent un contrôle limité sur la simulation. La visualisation à distance permet à plusieurs utilisateurs de manipuler leurs agents et d'agir collectivement sur le même environnement virtuel.

Avec cette architecture, il n'y a pas d'ambiguïté sur l'état du monde perçu par chaque client. Cependant, le trafic réseau lié aux informations d'affichage peut rapidement devenir trop important si la simulation fait intervenir en grand nombre d'entités. L'architecture que j'avais développée pendant ma première thèse s'apparente plus aux normes actuelles des jeux vidéo, et nous avons élaboré un système alternatif robuste de type *peer-to-peer*, implémenté sur la plateforme MadKit (Michel, Bommel, et Ferber 2002). Cette architecture par duplication (que j'avais appelée *dupliqua*) avait été développée pour pallier aux inconvénients du X-Window en limitant le nombre de messages échangés sur le réseau. Des systèmes similaires sont largement utilisés aujourd'hui dans le monde des jeux vidéo. L'idée est que chaque machine héberge une copie complète de la simulation et que seuls les inputs des utilisateurs sont échangés de manière à ce que la simulation reste cohérente. Pour les jeux multi-joueurs en continu type « *first-person shooter* » (FPS), cette d'architecture entraîne des divergences entre les mondes simulés qui nécessitent d'être corrigées (le fameux *dead-reckoning*). Mais pour le type de simulation interactive que nous organisons (qui ne sont pas en flux continu), il n'est pas compliqué de maintenir la cohérence d'une simulation. Pour le passage sous Pharo, nous reviendrons donc à ce type de distribution.

Même si une simulation peut être distribuée sur Internet, nous préférons utiliser cette capacité sur des ordinateurs en réseau dans la même pièce. Selon nous, la proximité physique est

²⁶ Afin d'économiser de la bande passante et d'éviter les effets de lag, le *dead-reckoning* (navigation à l'estime) estime la position actuelle d'une entité en utilisant sa position précédente et en calculant sa nouvelle position sur la base des vitesses connues ou estimées au fil du temps de sa course.

importante car elle permet une interaction plus riche et naturelle par le dialogue direct ou par la communication non verbale entre les participants.

5.7. Diagramme d'activités exécutable

Dans Cormas, un éditeur UML permet de dessiner des diagrammes d'activités simples. Lors d'une simulation, ces diagrammes sont exécutés directement par les agents, sans qu'il soit nécessaire de les traduire en code. Ils sont interprétés "à la volée". Il est ainsi possible de modifier le schéma de comportement d'un agent sans avoir à coder. Il est également possible de modifier le simulateur pendant qu'il est en cours d'exécution, sans arrêter et redémarrer la simulation.

Par souci de simplicité, les éléments disponibles sur l'éditeur sont limités aux nœuds initiaux et finaux, aux points de décision, aux activités simples (sans paramètres d'entrée ni de sortie) et aux transitions. Un point de décision autorise seulement deux transitions de sortie (vraie ou fausse).

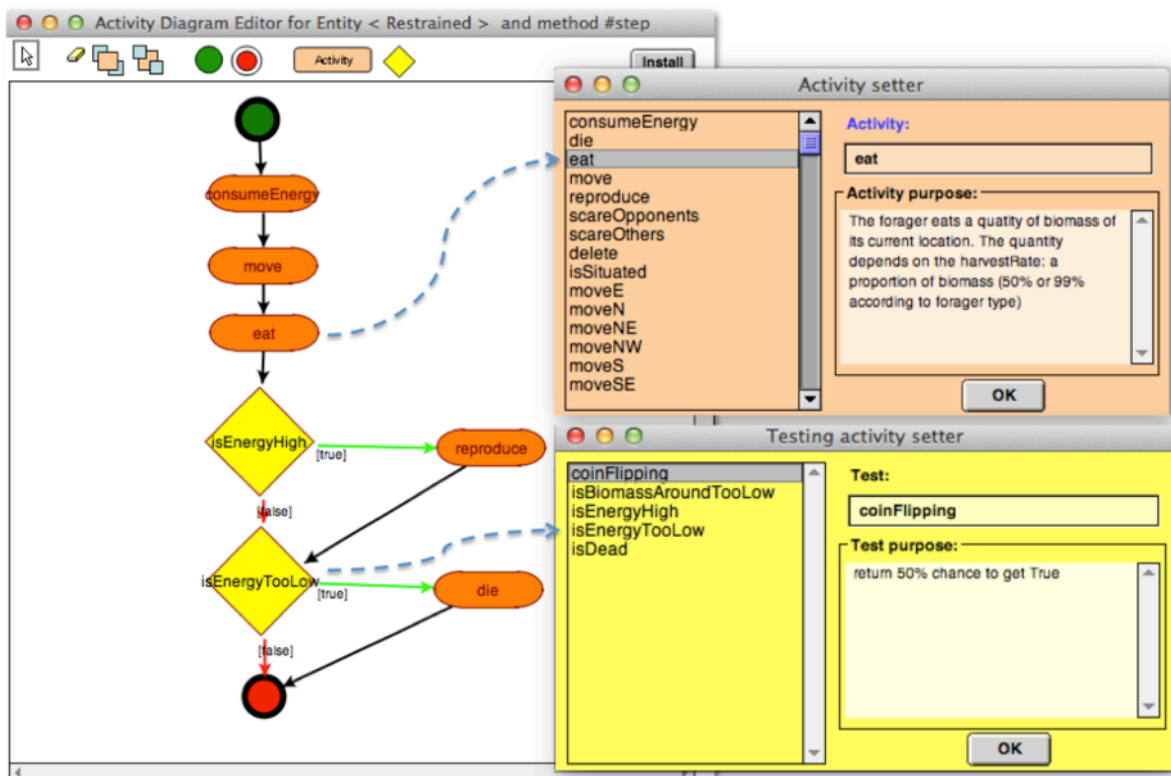


Figure 21 : L'éditeur de diagramme d'activité (à gauche) et deux interfaces de sélection d'activité (à droite). Chaque liste des méthodes à sélectionner est automatiquement générée par le processus d'introspection. Pour les décision (en jaune), ces listes sont générées en inspectant uniquement les méthodes du protocole *Testing*.

En sélectionnant une activité ou un point de décision depuis la barre d'outils, l'utilisateur peut ajouter un nouvel élément sur le diagramme. Ensuite, il doit choisir l'opération à effectuer par cet élément : il la sélectionne dans une liste d'activités automatiquement générée à partir des opérations disponibles de la classe cible class (mécanisme *d'introspection*). Puis l'utilisateur peut dessiner une transition entre deux nœuds. A partir d'un point de décision, il doit dessiner deux transitions : celle pour laquelle la réponse au test de décision est vrai (en vert) et une

pour un test négatif (en rouge). Ainsi, à partir des opérations de base déjà définies par le modélisateur, on peut générer un nouveau comportement de niveau supérieur, sans aucune connaissance en programmation.

Cet éditeur ne libère pas le modélisateur de la phase de programmation. L'objectif est plutôt de concevoir collectivement le comportement d'un agent en organisant la succession des activités par plug-and-play. Ces activités de base sont des méthodes (briques logicielles ou composants) qui ont été précédemment codés par les développeurs.

Parce qu'il est destiné aux non-spécialistes, cet éditeur a été conçu pour être aussi simple que possible. Pour cette raison, il ne contient pas de fonctions sophistiquées telles que les Swimlanes, les itérations ou les événements simultanés qui sont spécifiés par UML 2.5 (OMG 2017). En retour, cette simplicité permet à quiconque de participer plus activement à la conception de la modélisation avec une plus grande efficacité grâce à l'évaluation immédiate de toute modification. Nous l'avons mis au point et utilisé pour la première fois dans le cadre du projet *SequiaBasalto* avec des éleveurs Uruguayens (Bommel et al. 2014).

L'éditeur n'obéit pas à la norme "Executable UML" (xUML, Mellor et Balcer 2002; OMG 2008), dont les spécifications requièrent un compilateur pour traduire un diagramme en code. Dans Cormas, un diagramme d'activité n'est pas compilé en code, mais est interprété directement par les agents. En d'autres termes, chaque diagramme d'activité est enregistré dans le modèle au même titre que le reste du code source. Il peut être ré-ouvert à tout moment, modifié et exécuté sans compilation. En tirant parti des avantages de Smalltalk (langage réflexif), il est possible de modifier le diagramme d'un agent alors que la simulation est en cours d'exécution. Dès que celui-ci est enregistré, l'agent commence à exécuter son nouveau comportement. Cette spécificité peut être utile lorsqu'un utilisateur qui observe la tendance d'une simulation, veut tester comment un changement de comportement de l'agent pourrait infléchir le cours de la simulation.

5.8. La rétro-simulation pour voyager dans le temps

À l'instar de nombreuses plateformes, le temps avance par pas-de-temps dans Cormas (chap. 4.5). Mais il est possible de remonter le temps d'une simulation. Comme le calcul inverse des activités est mathématiquement impossible, Cormas ne simule pas le recul du temps. Pour activer la fonction de retour arrière, les états successifs du système doivent être enregistrés. Ainsi, pour revenir à un état antérieur correspondant au temps T ($T < T_{final}$) d'une simulation, Cormas supprime l'état actuel et recharge simplement l'état stocké à T . Ainsi, on peut naviguer dans le temps de la simulation, en avant ou en arrière, en restaurant des états complets du système préalablement enregistrés.

La figure suivante présente l'interface principale de Cormas avec les boutons de commande pour la simulation. Lors de l'initialisation d'une simulation (bouton rouge de gauche), l'utilisateur peut choisir d'activer ou non le mode « Enable stepping back » (autoriser la marche arrière). Les boutons avec les flèches rouges sont alors utilisés pour des simulations standards (sans retour en arrière). Si le « stepping back » a été activé, les boutons violets sont disponibles et permettent d'avancer ou de reculer dans le temps d'une simulation.

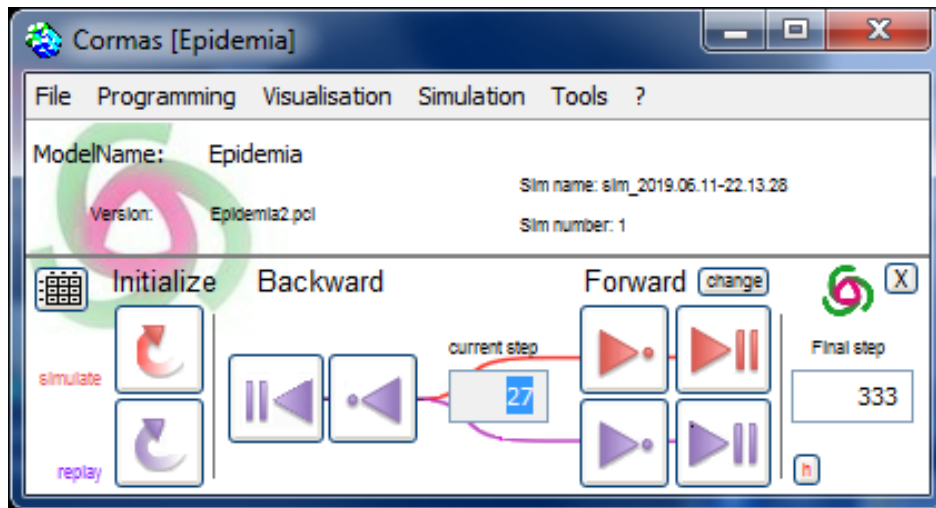


Figure 22 : Interface principale de Cormas avec les boutons 'Simulate' (rouges) et 'Replay' (violets).

Sur cet exemple, une simulation a été effectuée sur 333 steps. L'utilisateur a alors tapé 27 dans la case "current step" et Cormas a rechargé l'état du système lorsqu'il était à la fin du step 27. Un clic sur le bouton « backward » déclenchera le chargement de l'état stocké précédent (26). Un autre clic sur le bouton « forward » (violet) fera revenir au temps 27.

Cette navigation dans le temps permet d'analyser le modèle et de vérifier si ses mécanismes sont cohérents. Par exemple, en essayant de comprendre un comportement qu'il considère étrange, l'utilisateur peut revenir à un moment précis, juste avant la période anormale et, comme pour un film, et redémarrer de cet état pour suivre lentement comment les entités agissent de telle manière. Mais à partir de cet état particulier, il peut aussi exécuter une nouvelle simulation (boutons rouges) pas à pas pour vérifier si les entités se comportent de façon similaire ou si le système évolue différemment (on appelle cela une bifurcation, voir figure suivante).

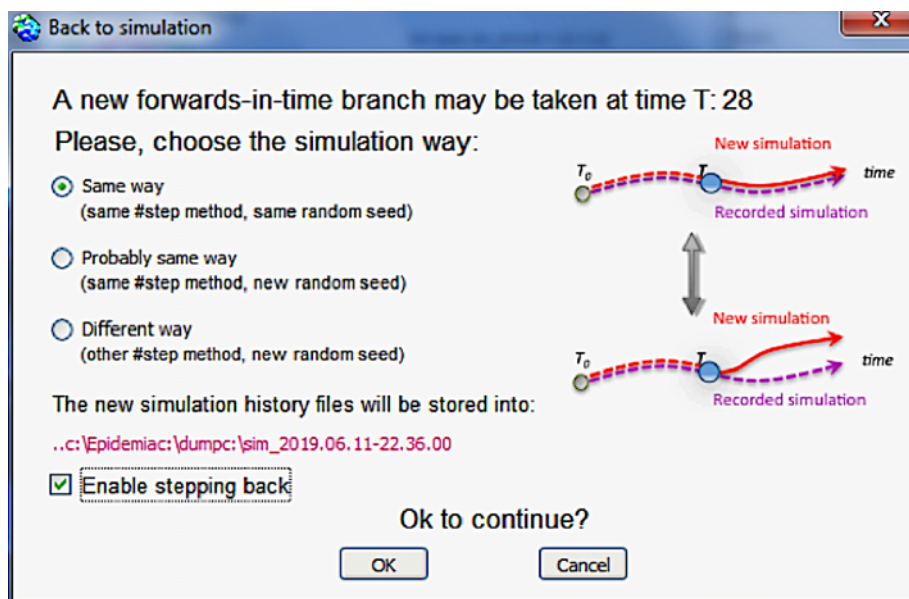


Figure 23 : Interface de bifurcation pour redémarrer une simulation (simulate) à partir d'un état enregistré de la précédente simulation (replay)

Lorsque l'on redémarre une simulation à partir d'un état sauvegardé, Cormas propose trois options : 1) simuler en reprenant exactement le même chemin (dans ce cas, la même graine aléatoire est utilisée), 2) simuler en reprenant probablement un chemin similaire, mais avec une nouvelle graine aléatoire, donc avec des valeurs randomisées différentes, ou 3) en changeant de scénario par la sélection d'une autre méthode de step du Scheduler.

Ainsi, à la manière de « Smoking / No Smoking » (film d'Alain Resnais, 1993 dans lequel des personnages, tous interprétés par Sabine Azéma et Pierre Arditi, vont dérouler plusieurs versions de leur vie en fonction des choix qu'ils prennent à des moments précis), Cormas permet de tracer plusieurs scénarios à partir d'un même état initial, en remontant le temps des simulations et en testant des décisions alternatives.

Par ailleurs, parce que l'initialisation d'une simulation peut créer des artefacts (tous les agents ayant le même âge, par exemple), il est pratique de faire tourner une simulation jusqu'à un état plus ou moins équilibré. Cet état peut alors être enregistré (*snapshot*) pour devenir le point de départ des simulations futures.

Enfin, cette capacité de sauver et de restaurer l'état du système est aussi utilisée lors de la manipulation des agents : les boutons « undo » et « redo » de la grille spatiale permettent d'annuler une action de l'utilisateur ou de la réactiver, ce qui s'avère utile dans des ateliers de simulation interactive.

6. Modèles développés avec Cormas

Depuis mon entrée au Cirad, j'ai contribué à la conception et à l'implémentation d'une quarantaine de modèles multi-agents avec la plateforme Cormas. La plupart sont présentés sur le site web de Cormas (<http://cormas.cirad.fr>) en version française et anglaise (et parfois aussi en portugais ou en espagnol). Ces travaux m'ont souvent amené à modifier la plateforme.

6.1. Liste des modèles développés

Comme expliqué dans l'introduction, ces modèles développés s'inscrivent dans diverses thématiques. Pour en rendre compte, le tableau suivant en présente la liste (les modèles développés avec les participants lors des cours et des formations ne sont mentionnés).

En s'inspirant de la classification proposée par (Le Page 2017), ce tableau affiche le nom de chaque modèle et la thématique abordée. Concernant la colonne "Réfèrent", il faut noter que mon implication dans la conception de ces modèles a été variable. Car par définition, la modélisation participative engage plusieurs contributeurs et il est parfois difficile de définir le réfèrent d'un modèle. Lorsque j'ai codé la grande partie d'un modèle, mon nom figure dans cette colonne, autrement seule la personne en charge du projet y apparaît. Quand un modèle a servi comme élément d'une thèse, un astérisque rouge est ajouté à côté du réfèrent (*). La cinquième colonne indique les publications (référéncées dans le CV) faites à partir de ce modèle. La première colonne "Type" indique par un symbole s'il s'agit :

- d'une réplique d'un modèle existant : ξ
- d'un jeu de rôles informatisé (MAHy) : \clubsuit
- d'un modèle empirique réaliste (qui utilise des données d'observations) : \Re
- ou d'un modèle stylisé (voire d'une démo) : Ψ

Tableau 1 : Liste des modèles développés

	Type	NOM	Thématique	Référent	Publication
1	\clubsuit	AguaLoca	Usage de l'eau et dynamiques foncières en périphérie de São Paulo	R. Ducrot	2004a; 2007d
2	Ψ	Alamo	Politiques publiques agricoles et forestières, et transformation des paysages des Grands Causses au Sud du Massif central	R. Lifran	2003c
3	\Re	Amaz	Comparing different strategies of land use and their consequences in terms of Environmental Services in the Amazon	R. Pocard & P. Bommel	2008d, 2012n
4	Ψ	AquiferPollution	Flux d'eau et diffusion de polluants dans un aquifère	P. Bommel	
5	Ψ	Arapey	Production des élevages bovins selon les stratégies d'investissement et de rotation	H. Morales *	2004b, 2005f, 2006c, 2010c
6	\Re	AWARE	Allocation de licences d'eau en Afrique du Sud	S. Farolfi	2008b
7	Ψ	BrouteLaForêt	Représentations spatiales et interaction individus, espace et société	JL. Bonefoy	2005c
8	\Re	Burkina	Indicateurs de qualité des terres au Burkina Faso	S. Guilobez	
9	\clubsuit	Cienaga	Quantité et qualité de l'eau du barrage Cienaga, Jujuy, Argentine	G. Leclerc & P. Bommel	
10	$\clubsuit \Re$	ContaMiCuenca	Jeu de gestion de l'eau dans le Guanacaste, Costa Rica	G. Leclerc & P. Bommel	2015c, 2016b, 2016c, 2017j
11	Ψ	Demo Aggregates	Exemples d'entités spatiales, d'agrégats et de partitions de l'espace	C. Le Page & P. Bommel	
12	Ψ	Demo Aquifer	Flux d'eau dans un aquifère	P. Bommel	
13	Ψ	Demo ArcsNodes	Réseaux spatialisés	P. Bommel	
14	Ψ	Demo Diffuse	Un modèle simple de diffusion de phéromones par des fourmis	P. Bommel	
15	Ψ	Demo WayTo	Le plus court chemin sous contrainte	C. Le Page	

	Type	NOM	Thématique	Référent	Publication
16	℔	Dinamica Parcelas	Dynamiques d'utilisation des terres de la Pampa argentine	P. Arbeletche * & P. Bommel	2007f, 2008c
17	Ψ	Dps	Le dilemme du prisonnier spatialisé	F. Bousquet	
18	Ψ	Dricol	Emergence de conventions sur les ressources communes	B. Locatelli & O.Thébaud	
19	ξ Ψ	Ecec	Evolution de la coopération dans un contexte écologique. Réplication d'un modèle théorique de Pepper et Smuts	C. Le Page & P. Bommel	2011h, 2012i
20	℔	Echos	Analyse du comportement économique des acteurs de la filière "effluents d'élevage" à La Réunion	S. Farolfi & P. Bommel	2002a, 2002b, 2003a, 2003b, 2008b
21	Ψ	FireAutomata	Diffusion d'un feu de forêt	F. Bousquet	
22	Ψ	Firefighters	Modes d'organisation d'une brigade de pompiers pour éteindre un feu de forêt	C. Le Page & P. Bommel	2017d
23	℔	FloAgri	"Quand l'agriculture familiale préserve la forêt amazonienne"	M.G. Piketty & P. Bommel	2014c
24	Ψ	ForPast	Dynamiques de transformation d'un espace forestier soumis au pâturage	S. Lardon & P. Bommel	1998d, 1998a, 1998b, 1999a, 1999b, 1999c, 2000a
25	ξ Ψ	Griffeath	Automate cellulaire cyclique de D. Griffeath	P. Bommel	
26	℔	iLPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Amazonia	A. Burlamaqui * & P. Bommel	2008d, 2012n
27	♣	JogoFogo	Risque d'incendie et petits exploitants en Amazonie brésilienne	E. Coudel & P. Bommel	2013a, 2016a
28	♣	JogoMan	Jeu informatisé: Pollution de l'eau et dynamiques foncières d'un bassin versant périurbain	R. Ducrot & D. Adamati *	2005d
29	ξ ℔	MACCA	Réplication d'un modèle d'aquifère, de Ravazzani et al.	P. Bommel	
30	Ψ	Markets	Analyse de la performance des marchés céréaliers d'Afrique de l'Ouest comme systèmes de communication	F. Galtier	2002c, 2011g, 2012l
31	♣ ℔	MiRoya	Diffusion et traitements de la rouille du café	G. Leclerc & P. Bommel	2019b

	Type	NOM	Thématique	Référent	Publication
32	Ψ	Mobe	régulation de la filière bois-énergie au Niger	M. Antona	2002d
33	♣	MontyGame	Faire comprendre les erreurs de jugement sur les probabilités conditionnelles	G. Leclerc & P. Bommel	
34	℞	MOPA	Modélisation de la pêche artisanale au Sénégal	J. Le Fur	1997b, 1998c, 1999b,
35	℞	PhDModel	Intensification des pratiques d'élevage en Amazonie Brésilienne	S. Plassin *	
36	Ψ	Project Management	L'intérêt de la simulation multi-agent pour l'appui à la gestion de projet	D. Medeiros * & P. Bommel	2013c
37	℞	QualiPig	Epidémie dans les élevages de cochons	V. Porphyre *	
38	♣	Quixeramobim	Jeu de gestion de l'eau, Ceara, Brésil	R. Ducrot	
39	ξ Ψ	Resource Consumption	Compétition entre agents pour utiliser d'une ressource commune	P. Bommel	
40	♣	Ribeirinhos	Gestion pluriannuelle et concertée de deux réservoirs en climat semi-aride brésilien	R. Ducrot	
41	ξ Ψ	Robots Fourageurs	Des robots extracteurs de minerai	C. Le Page & P. Bommel	
42	♣ ℞	SequiaBasalto	Adaptation des éleveurs aux changements climatiques en Uruguay	P. Bommel & J. Corral *	2015e, 2014a, 2014e, 2012a, 2012b, 2012c, 2012d, 2012e, 2012f, 2012g, 2012h, 2011, 2011d
43	℞	TransAmazon	Dynamiques socio-environnementales d'un front pionnier de la Transamazonienne	T. Bonaudo * & P. Bommel	2010c, 2010d, 2005e
44	Ψ	SIS	Diffusion d'épidémies	B. Bonté & P. Bommel	
45	♣	Teraguas	Jeu informatisé: Utilisation et occupation des sols et les impacts sur la qualité des ressources en eau	R. Ducrot	
46	℞	Thunupa	Adaptation des planteurs de quinoa aux changements globaux	M. Vieira Pak * & P. Bommel	
47	♣ ℞	VarzeaViva	Multiplés usages d'une plaine d'inondation Amazonienne face aux changements globaux	M.P. Bonnet & P. Bommel	2014d, 2015d, 2016d, 2016l, 2017f
48	ξ Ψ	WolfSheep Predation	Dynamique des populations entre proies, prédateurs et pâturage	M. Zellner & P. Bommel	

Je ne vais bien sûr pas présenter tous ces modèles. La partie qui suit en décrit deux qui ont accompagné une partie de mes travaux en Amérique Latine. Ils illustrent une façon de concevoir et d'utiliser des modèles multi-agents selon l'approche ComMod.

6.2. *SequiaBasalto* : adaptation des éleveurs aux changements climatiques en Uruguay



Avec Hermès Morales et ses collègues de l'IPA (Instituto Plan Agropecuario), nous avons travaillé pendant deux ans (en discontinu) sur un petit projet financé par

l'INIA (Institut national de recherche agricole) : le projet *Sequia* (sécheresse). En effet, le changement climatique affecte l'élevage bovin, première source économique de l'Uruguay. Coincé entre deux géants, le Brésil et l'Argentine, ce petit pays compte plus de vaches que d'hommes : 4,5 têtes de bovin par habitant, d'où son surnom de désert vert. La pampa offre un pâturage naturel où les troupeaux paissent en liberté, fournissant une viande de haute qualité pour l'exportation.

A partir des années 1990, des épisodes de sécheresses sont apparus entraînant la mort de milliers d'animaux et causant de nombreuses faillites. En réponse à ces changements, le projet *Sequia* visait à améliorer les capacités d'adaptation des éleveurs, principalement de la région Nord-Ouest du pays (*Basalto*). Les sols basaltiques de cette région (25% du pays) ont une capacité d'accumulation d'eau extrêmement réduite. Ils sont principalement exploités par des systèmes de production d'élevage extensif.

Pour tester plusieurs stratégies de gestion et faciliter la communication entre éleveurs et les services d'appui, un SMA a été élaboré. La première étape de la conception a été plutôt standard puisqu'elle a consisté à concevoir avec des experts de l'élevage et des herbages, un SMA qui décrit la croissance des pâturages, la dynamique des troupeaux et la gestion de l'ensemble par des producteurs. Deux types d'agents qui imitent les stratégies de gestion de façon caricaturale, sont testés : soit l'agent « Productor CC » qui prend ses décisions de gestion en regardant uniquement la condition sanitaire de son troupeau, soit à l'inverse l'agent « Productor Pasto » qui fait ses choix en fonction de l'état du pâturage. Les chercheurs et techniciens de l'IPA considèrent que le « Productor CC » correspond à l'éleveur traditionnel qui cherche à augmenter la charge à l'hectare en gardant des conditions corporelles satisfaisantes. Les préconisations de l'IPA sont inverses : elles recommandent de baisser la charge pour maintenir une qualité du pâturage optimale (« Productor Pasto ») (Morales et al. 2010; Dieguez et al. 2014).

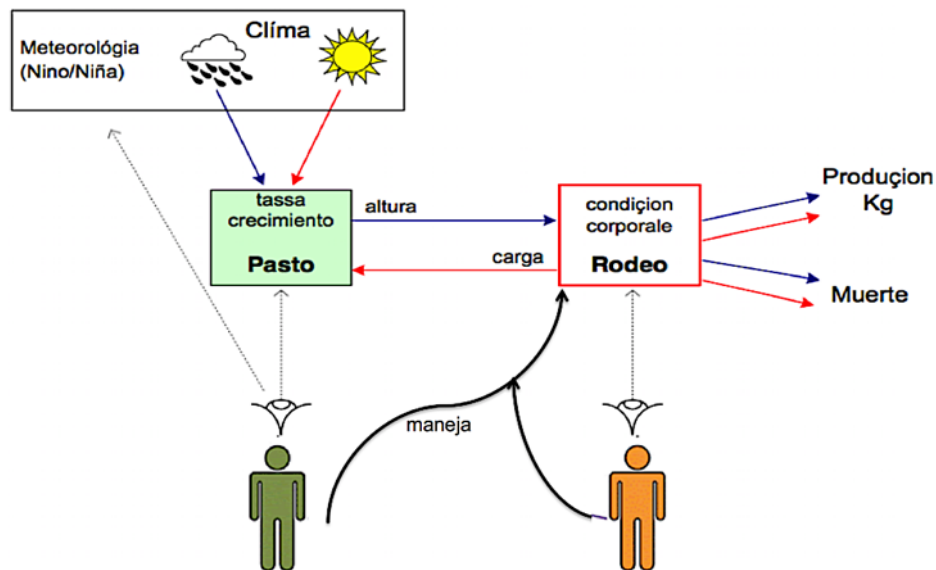


Figure 24 : Principe du modèle : l'agent producteur "Pasto" prend ses décisions en fonction du climat et de l'état du pâturage, alors que le producteur "CC" se concentre sur la santé du bétail (sa Condition Corporelle).

Cette première version du modèle a ensuite été présentée et discutée avec les éleveurs de la zone au cours de plusieurs ateliers. Leur principale critique portait sur les comportements trop simplistes des agents qu'ils ont demandé de réviser.



Figure 25 : A) Session de design avec des experts, B) 1^{er} atelier avec des producteurs de Salto, C) Evaluation par des éleveurs des diagrammes UML du modèle, D) Un éleveur explique une simulation.

Après une première version conçue avec des experts (photo 21-A), le SMA a été présenté et discuté avec des éleveurs au cours de plusieurs ateliers. La photo 21-C montre des

producteurs, hommes et femmes, qui analysent des diagrammes d'activité ! Evidemment cela m'a surpris. En fait, Hermès Morales qui avait suivi nos formations à la modélisation en France, avait ensuite proposé à tous les techniciens de l'IPA de mener leurs entretiens avec les éleveurs en utilisant ce formalisme. Pendant quelques années, les producteurs ont été habitués à utiliser ce type de diagramme et ont donc été capable de comprendre ceux du modèle *SequiaBasalto*. J'ai alors compris que c'était une opportunité de mettre au point un éditeur de diagramme d'activité exécutable (xUML, cf. chap. 5.7).

Afin de rendre cette évaluation plus vivante et efficace, nous avons utilisé ce nouvel outil lors d'ateliers avec les acteurs. A partir des activités de base déjà disponibles, les participants étaient capables de générer de nouvelles stratégies de gestion, sans connaissance en programmation. L'utilisation de l'éditeur xUML a révélé deux caractéristiques intéressantes. Tout d'abord, en étant capable de modifier le comportement des agents, les participants ont joué avec le modèle et ont mieux compris sa logique. La réponse immédiate du modèle à chaque modification a augmenté leur compréhension des mécanismes sous-jacents. Après coup, nombreux ont reconnu que leur gestion s'apparentait finalement à celle du producteur traditionnel (« CC »). Des débats sur la meilleure façon de faire face aux sécheresses s'en sont suivis.

La deuxième caractéristique concerne des aspects techniques du modèle. En testant des stratégies alternatives avec l'éditeur xUML, les participants ont identifié certains biais. Par exemple, ils ont réalisé qu'en cas de sécheresse, les agents réagissaient toujours trop tard et la décision par exemple de nourrir le troupeau avec des suppléments fourragés n'empêchait apparemment pas la crise. Les participants ont compris que les agents devaient agir plus fréquemment qu'une seule fois par saison. Le modèle a été corrigé en conséquence en répétant les activités des agents chaque semaine. Ainsi, les acteurs eux-mêmes ont pu déceler une erreur de conception que nous, experts, n'avions pas vu (Bommel et al. 2014).

Les résultats de ces exercices collectifs ont dépassé nos attentes. Au-delà des débats qu'il a suscités, le SMA a contribué à identifier des stratégies d'adaptation qui semblent améliorer la résilience des producteurs. En particulier, le modèle a obligé les experts de l'IPA à reconnaître que leurs recommandations en terme de gestion (« Productor Pasto ») n'étaient pas toujours les meilleures. En effet, en dehors des périodes de sécheresse, la stratégie traditionnelle semble plus rentable économiquement. Ici encore, le modèle (pourtant conçu par les experts) a joué son rôle de révision des connaissances.

Après ce projet, beaucoup agriculteurs et de techniciens ayant participé aux ateliers ont poursuivi l'expérience avec le modèle. Ils l'utilisent pour rechercher des stratégies de gestion plus efficaces dans les périodes normales et de sécheresse. Le gouvernement Uruguayen s'appuie maintenant sur ce projet comme exemple méthodologique à suivre pour d'autres projets de développement. Francisco Dieguez, aujourd'hui professeur à l'université et qui a participé dans ce projet, se forme actuellement à ComMod et à la modélisation multi-agent pour prolonger cette expérience.

Conclusion sur les communs - Si la production bovine en Uruguay est le fait de pratiques individuelles sur des terres privées, je ressors de cette expérience avec une vision de

l'agriculture non pas individualiste mais animée par une culture collective à l'image du Gaucho, symbole de l'homme libre de la pampa, habitué à la rusticité et se moquant des conventions, mais prêt à protéger sa poésie, sa langue, sa manière d'être et son environnement naturel. Aujourd'hui, cette culture sociale est mise en danger par les « pool de siembra », des agricultures entrepreneuriales orientées vers la production intensive de soja et financées par des compagnies d'assurance ou des fonds de pensions (Morales Grosskopf et al. 2010; Corral et al. 2008). Elles cherchent à optimiser la production agricole par l'utilisation intensive d'intrants et de machines. Face à ces entreprises qui négocient des volumes importants directement avec les investisseurs, les fournisseurs et les exportateurs, les producteurs familiaux ne sont plus compétitifs et perdent leur pouvoir de négociation. Il s'agit d'un changement notoire qui questionne la pérennité des producteurs traditionnels, et entraîne des changements structurels économiques, écologiques et sociaux.

« La relación emocional con la tierra desaparezca o se debilite de manera significativa. Es un cambio de paradigma de valores, siendo uno de los cambios principales que se han dado en las últimas décadas en el ámbito agrario rural.

La relation émotionnelle avec la terre disparaît ou s'affaiblit considérablement. Il s'agit d'un changement de paradigme des valeurs, l'un des principaux changements qui ont eu lieu ces dernières décennies dans l'agriculture rurale » (thèse de P. Arbeletche 2016),

6.3. *VarzeaViva* : défense d'un territoire amazonien



Hot-spots de biodiversité, les plaines d'inondation Amazoniennes (*várzeas*) comptent parmi les écosystèmes les plus diversifiés et productifs au monde. La vie des organismes y est rythmée par les cycles d'inondation annuels. Aux basses eaux, les berges découvertes se recouvrent de vastes pâturages naturels où les étangs et cours d'eau qui concentrent les nutriments sont propices

à la reproduction des poissons. En hautes eaux, le fleuve recouvre ces étendues ce qui permet de mélanger les populations et de renouveler les sols de limon.

Des populations humaines s'y sont installées depuis plusieurs siècles (initialement, les amérindiens puis des colons métisses, appelés *ribeirinhos*) et ont appris à vivre avec ces variations de l'environnement : aux basses eaux, ils plantaient leur champ de manioc dans les limons fertiles et conduisaient des troupeaux sur les pâturages ; aux hautes eaux, ils rassemblaient leurs animaux sur des radeaux accrochés à leurs maisons sur pilotis et leur donnaient des fourrages coupés. La pêche était centrale pendant les saisons intermédiaires.

Ces trente dernières années, la variabilité des pluies et la déforestation en Amazonie ont provoqué des modifications de l'hydrographie du fleuve, avec des crues plus hautes voire exceptionnelles. Ces changements relativement rapides déstabilisent les systèmes de production traditionnels et augmentent la précarité des familles. Les incertitudes face à

l'arrivée des pluies ou l'intensité des crues rendent difficile le développement de stratégies adaptées sur le long terme. Les crues fortes et prolongées poussent les éleveurs à ouvrir plus de pâturages sur les terres fermes ce qui conduit à une dégradation du milieu.

Si plusieurs études décrivent ces changements hydrologiques à l'échelle de l'Amazone, peu d'informations existent sur l'adaptation des populations à ces phénomènes. Le projet *Clim-Fabiam* financé par la FRB (Fondation de la Recherche pour la Biodiversité) cherchait à comprendre comment les populations locales s'adaptent à cet environnement changeant et comment leurs pratiques impactent à leur tour la biodiversité aquatique. En mobilisant une équipe pluridisciplinaire, nous avons cherché à relier l'hydrologie et la biochimie de l'eau et la faune planctonique, et à les confronter aux perceptions des acteurs locaux et aux stratégies qu'ils développent.

Le projet s'est concentré sur la plaine d'inondation du « Lago Grande de Curuaí », une zone de 30 000 habitants répartis sur 133 communautés, qui dépend de la préfecture de Santarém (Etat du Pará, Brésil). Dans ce territoire bien représentatif, la population est isolée des grandes villes de l'Etat du Pará et l'accès aux services publics est limité.

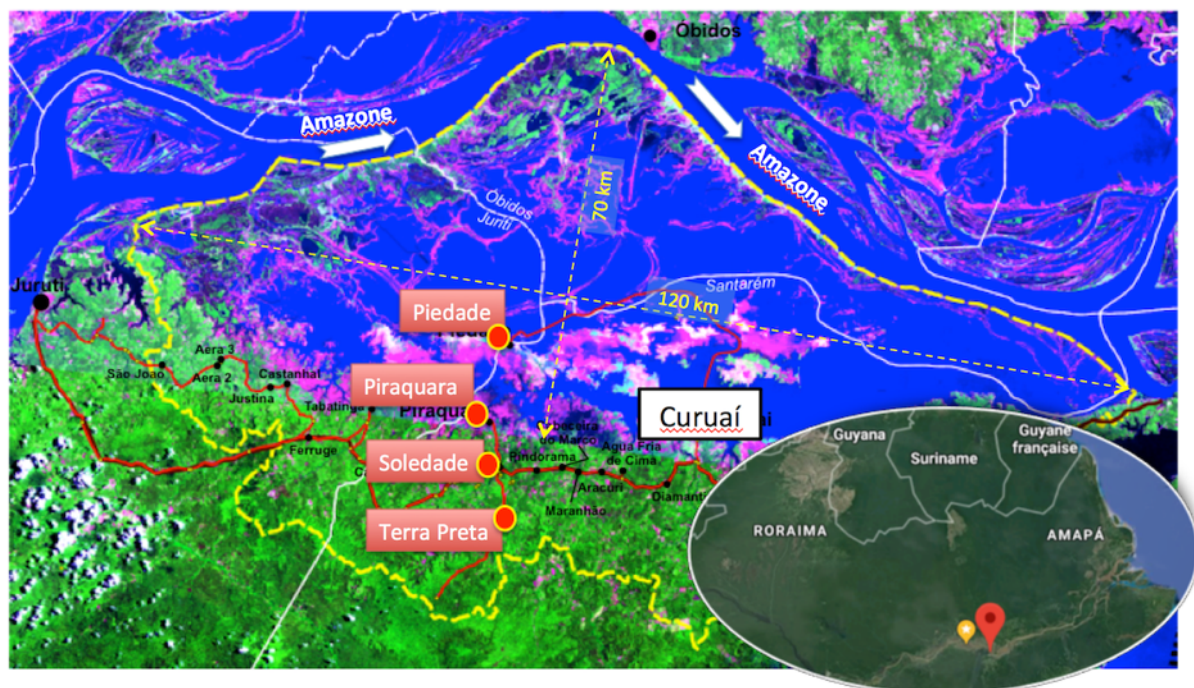


Figure 26 : Le « Lago Grande de Curuaí », état du Pará, Brésil. Les 4 communautés où ont été menées des ateliers de modélisation participative ont été rajoutées sur la carte, le long d'un transect Forêt → Lac.

Dans cette région, la différenciation entre terres publiques et terres privées est à la charge de l'INCRA (Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire). Mais par manque de moyens et devant la complexité de la tâche, les terres ont été attribuées sans réelle délimitation ni différenciation publique/privée. Sans titre de propriété, les populations locales n'ont qu'un droit d'usage, mais en pratique la vente de terre est monnaie courante. A cause de ce flou juridique et après une longue mobilisation des habitants, l'INCRA a finalement créé un PAE (Projet de cadastre Agro-Extractiviste) en 2005. Sa gestion y est assurée par la *Feagle*, une organisation civile qui représente les communautés de ce territoire. Elle est en

charge du suivi des réformes agraires et des liens entre institutions, communautés et organismes sociaux. Elle est également en charge des ressources naturelles en octroyant des autorisations à déboiser et des permis de chasse et de pêche. Aujourd'hui, le devenir du PAE qui avait vocation à régler les conflits autour du foncier et des usages des terres, est incertain. En effet, les conflits régionaux et les pressions exercées par les entreprises minières et d'extraction du bois, ainsi que la situation foncière complexe menacent sa reconduction.

Un partenariat avec la *Feagle* et avec une école familiale rurale basée à Curuaí nous a permis de nous rapprocher des communautés de la région et leur proposer de travailler ensemble autour de ces questions. Une première phase d'enquêtes et d'entretiens dans plusieurs communautés de la région a permis d'établir un premier diagnostic territorial. Nous avons alors choisi de focaliser notre travail sur une petite zone constituée de quatre communautés qui représentent la diversité des activités rurales autour du lac : *Piedade*, une communauté de



pêcheurs dans la várzea ; *Piraquara*, une communauté au bord de lac, où l'élevage domine ; *Soledade*, à 10 km du lac, sur la *Trans-lago*, la route qui connecte toute la région ; et

Terra Preta, plus éloignée, à 20 km du lac, là où de nouvelles terres sont ouvertes dans la forêt.

Nous avons travaillé avec l'école rurale qui forme en alternance de jeunes adultes déjà très impliqués dans leurs communautés. En plus de les initier à nos activités scientifiques, nous avons pu, par leur intermédiaire, comprendre de manière plus informelle et spontanée les préoccupations de la région.

Face au constat de vulnérabilité exprimé par les acteurs, nous avons d'abord étudié leurs modes de vie et leurs activités rurales dans chaque communauté. Puis nous avons discuté de leurs préoccupations et des scénarios possibles. Cette approche participative nécessite une écoute attentive et une prise en compte des préoccupations locales. Comme expliqué dans l'introduction, « c'est dans l'expérience avec des acteurs que s'élaborent les véritables questions de développement, au risque de **réviser les objectifs initiaux** ». Ce fut le cas pour ce projet dont les objectifs initiaux, plus orientés vers les questions biophysiques, ont été changés. A l'origine, les hydrologues et biologistes se posaient la question : « est-ce que les résultats des recherches sur l'hydrologie des plaines d'inondation pourraient permettre aux populations locales de mieux anticiper les variations du fleuve pour adapter leurs activités et être moins vulnérables aux changements ? » Notre démarche d'accompagnement a renversé la perspective pour initier le dialogue avec les populations : quelles étaient les préoccupations et stratégies des acteurs locaux et qu'attendaient-ils des chercheurs ?

Car il ressort des ateliers que les difficultés ne sont pas seulement liées au changement climatique. D'autres changements, socio-économiques et démographiques, sont également à l'œuvre. Par exemple, la croissance démographique a un impact significatif sur l'environnement. Sans système de traitement des eaux usées, cette croissance provoque la prolifération de micro-organismes aquatiques : les chimistes et biologistes du projet ont

montré une présence renforcée des cyanobactéries. Cette prolifération constitue une menace pour la santé humaine et animale, ainsi que pour les stocks de poissons déjà menacés par la pêche commerciale et le non-respect des règles communautaires de pêche. Sur ces questions, les participants ont souvent exprimé le sentiment général de ne pas être entendu par les autorités et les institutions locales.

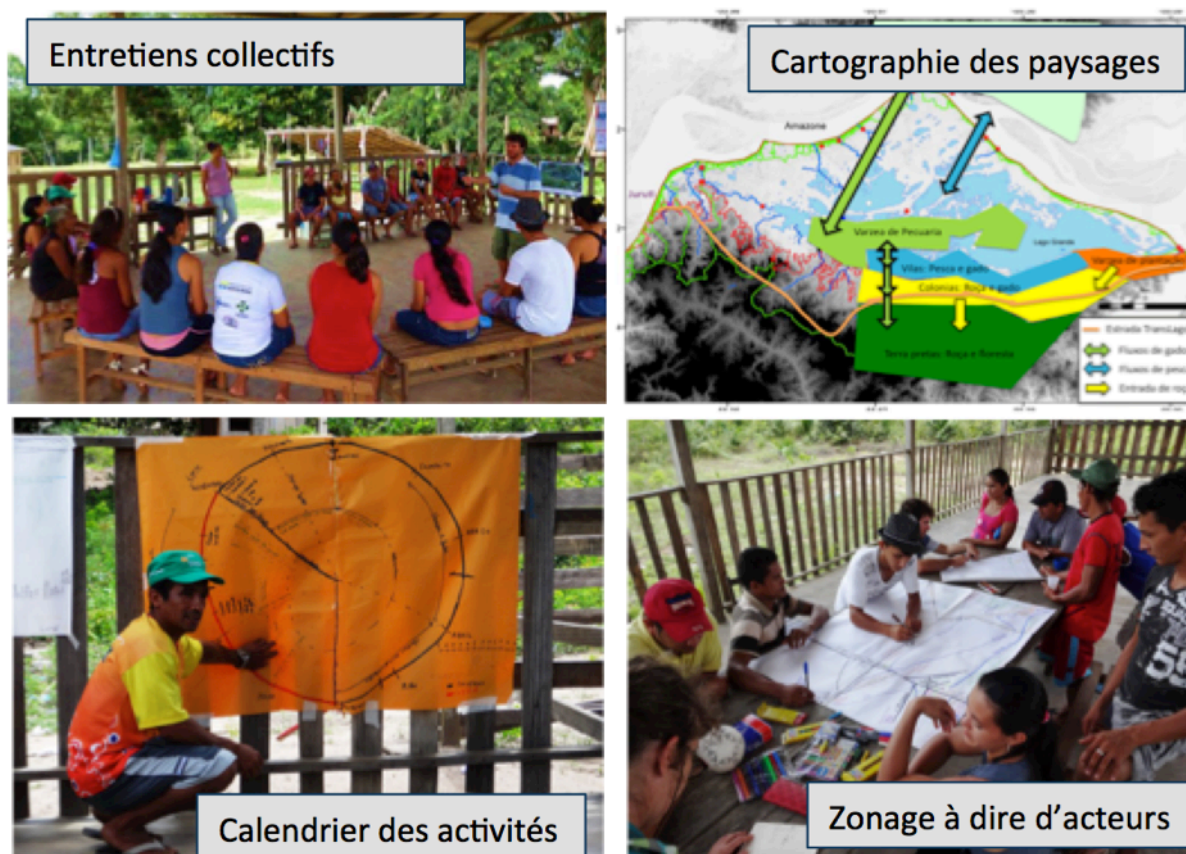


Figure 27 : Travaux et ateliers menés dans les communautés pour comprendre les changements et les pratiques rurales, et pour établir un diagnostic du territoire.

Sur ces nouvelles interrogations et pour faciliter et approfondir ces débats, un jeu de rôle puis un SMA hybride ont été conçus avec les étudiants, des producteurs et des membres de la *Feagle*. Un jeu de plateau « Varzea Viva » a d'abord été conçu et testé avec les étudiants pour être adapté au contexte de chaque communauté (Figure 28-a). Dans une deuxième phase, il a été remodelé pour représenter le transect complet et a été joué en rassemblant les 4 communautés. En jouant leur propre rôle, les participants s'échangeaient des services et des biens et exécutaient des actions qui modifiaient le paysage. Le jeu permettait alors de dérouler un scénario plus ou moins réaliste d'un futur possible. Dans les phases de débriefing, les difficultés survenues étaient discutées et mises en relation avec les problèmes réellement rencontrés sur le terrain. Mais la manipulation des nombreuses pièces du jeu prenait du temps ce qui empêchait de simuler au-delà de 5 ans. Or les dynamiques écologiques ou la concentration des polluants ne s'observent que sur de longues périodes. Ces contraintes nous ont donc amené à traduire ce jeu de rôle en un simulateur hybride qui permettait de pousser les sessions sur le long terme. Cette prospective appuyée par le SMA a conduit à des prises de

conscience des effets des actions des uns et des autres sur le territoire et sur la qualité de vie des ribeirinhos.



Figure 28 : Sessions de jeux. a) Jeu de plateau, b) Grille de VarzeaViva dans Cormas, c) Projection du SMA hybride sur un plateau avec les pions qui représentent les joueurs, d) Participants autour du SMA hybride projeté horizontalement, e) Interface utilisateur pour décider des activités de l'année.

Ce cas d'étude en Amazonie sert de support pour introduire une réflexion sur l'éthique de l'accompagnement des territoires. Car s'est rapidement posé la question d'inclure ou non les acteurs extérieurs à ce territoire dont les actions ont aussi des effets sur la dégradation des ressources du territoire : il s'agit d'entreprises de pêche commerciale qui viennent exploiter les stocks de poissons du lac, des fazendeiros (grands éleveurs de bétail) qui envoient leurs énormes troupeaux dans la várzea, des grands producteurs de soja qui recherchent des terres planes et fertiles, ou encore des sociétés minières souhaitant extraire la bauxite de ce territoire. Tous ces acteurs font pression sur les leaders locaux pour acheter des terres.

Bien que les populations locales ne puissent pas grand-chose au changement climatique, ils s'adaptent en changeant leurs activités et leurs pratiques. Mais ils se sentent bien plus vulnérables face aux pressions socio-économiques de grande échelle. Ce n'est pas tant le caractère inévitable du changement qui leur pose problème, mais plutôt l'incapacité de déterminer leur futur face à des forces économiques et politiques qui les dépassent et qu'ils perçoivent comme injustes.

Ces questions sur la participation de ces acteurs externes sont d'ordre méthodologique, mais aussi éthique. Car il ne s'agit pas de faire porter la responsabilité des dégradations de l'environnement uniquement sur ces acteurs externes absents des débats, ni de blâmer les pratiques des acteurs présents. Face à ces questionnements, nous revendiquons une posture

non neutre qui favorise l'équité et la durabilité. Au-delà des questions techniques sur la modélisation, il est essentiel de considérer ces jeux de pouvoir et la manière d'intégrer les acteurs puissants, tout en renforçant les capacités des plus vulnérables (Barnaud et al. 2010, 2017). De façon implicite mais partagée par l'ensemble des chercheurs du projet, nous aspirions à protéger les plus fragiles qui sont aussi les premiers affectés par ces changements.

Dans le contexte amazonien, loin des centres administratifs, la violence sociale fait partie du quotidien et les pressions exercées sur les plus faibles sont souvent radicales. En invitant certains acteurs à des ateliers participatifs (s'ils acceptaient toutefois de se livrer à cette forme de dialogue), nous prenions le risque de causer plus de violence. En ignorant les asymétries de pouvoir, nous risquions de renforcer ces inégalités en permettant aux plus puissants d'influencer davantage les résultats du processus participatif en leur faveur (Barnaud et Van Paassen 2013). Le choix fut donc d'associer seulement les acteurs locaux pour comprendre les processus en cours et de mener une démarche prospective participative. Accompagner les acteurs dans la mise en place de règles communautaires qui visent à assurer leurs conditions de vie est déjà un projet ambitieux. En les aidant à se projeter sur le moyen terme, la démarche contribue à prendre du recul et à se rendre compte des effets des actions de chacun sur le territoire. Conscients des dégradations en cours, plusieurs acteurs ont proposé de renforcer les règles et les contrôles sur la pêche, ou d'organiser une gestion collective des forêts. En fournissant aux institutions des documents scientifiques sur l'état des ressources et en contribuant à la cohésion sociale, la démarche cherche à renforcer les capacités de négociation de ces acteurs les plus fragiles (Bommel et al. 2016; Melo, Coudel, et Bommel 2014; Bommel et al. 2012).

7. Sessions de formation

Pour terminer ce tour d'horizon de mes travaux, je tiens à insister sur la formation à la modélisation qui constitue une part importante de mes activités. Dès mon arrivée à GREEN, j'ai intégré la formation annuelle conçue initialement par F. Bousquet et C. Le Page : « SMA et simulation de systèmes complexes : application à la gestion des ressources renouvelables ». Cette formation de deux semaines avait pour objectif de faire découvrir la simulation multi-agent à des étudiants et des chercheurs non-informaticiens et à les former sur Cormas. Le format privilégiait des présentations sur les principaux concepts véhiculés par la modélisation à base d'agents en s'appuyant sur des démonstrations et des manipulations de modèles implémentés sous Cormas. Puis, en petits groupes, les participants mettaient en place un prototype traitant d'un thème de leur choix. Une partie de la formation était alors orientée sur l'apprentissage de Smalltalk. Au fur et à mesure des formations, une bibliothèque de modèles didactiques a aussi été constituée (Automates Cellulaires, théorie des jeux, modes de coordination entre agents, réseaux, concepts d'agrégation spatiale, aquifères, etc.). Depuis, plusieurs modèles servent de tutoriels tels que le modèle *ECEC* (présenté page 26, et qui est une réplique de Pepper et Smuts 2000), ou *Firefighters* qui décrit la diffusion d'un feu de forêt contre lequel lutte une brigade de pompiers.

Dès mon arrivée au Cirad en 2001, j'ai proposé d'introduire un module UML dans ces formations à la modélisation. Car à l'époque les participants passaient directement d'une description succincte de leur modèle conceptuel au codage de leur simulateur. J'utilise aussi ce cours pour faire comprendre les concepts objets à des non-informaticiens. Cette partie du cours se fait au détriment de l'apprentissage de Smalltalk. Néanmoins, la plupart des participants notent dans leur évaluation, que cette partie sur UML leur semble particulièrement importante. Ils soulignent l'intérêt de maîtriser ce formalisme pour bien comprendre les concepts objet et pour la conception individuelle ou collective de modèles (dans Cormas, un éditeur de diagramme objets permet par exemple de visualiser un agent d'une simulation et toutes les entités avec lesquelles ils est connecté, cf. Figure 16, p. 44). Le codage informatique du modèle ne devient qu'une question de pratique qui s'acquière progressivement mais qui n'intéresse pas forcément tous les participants.

Comme expliqué dans mon CV, j'ai co-organisé 22 sessions de formation intitulée "International Training Programme on Multi-Agents Systems for Natural Resources Management" dont la majorité a été dispensée à l'étranger. Ces formations (parfois deux par an) étaient destinées à des novices en modélisation souhaitant se former sur Cormas. A partir de 2011, nous avons modifié ce format en intégrant d'autres plateformes de simulation : Mimosa, Netlogo et Gama. Intitulée *MISSABMS* (pour « Multi-platform International Summer School on Agent-Based Modeling & Simulation »), cette formation annuelle (8 sessions depuis 2011) accueille pendant deux semaines à Montpellier des participants venant de divers pays, ce qui offre un cadre d'échanges très stimulants. Pendant la première semaine, ils apprennent les concepts fondamentaux des SMA qui sont illustrés sur différentes plateformes. Ils découvrent ainsi les plateformes proposées (nous insistons sur les avantages et défauts de chaque outil) et choisissent celle qu'ils utiliseront lors du travail en groupe de la 2^{ème} semaine. Toutes ces formations accueillent une moyenne de 22 participants par session et en générale, on remarque qu'ils se répartissent de façon homogène entre les trois plateformes (actuellement Netlogo, Gama et Cormas sont proposées). Si une certaine compétition amicale peut poindre parfois entre les formateurs qui défendent chacun leur plateforme, ce nouveau format nous oblige à bien comprendre les problèmes rencontrés par des novices en modélisation et la manière dont chaque plateforme y répond. Pour ma part, il ne s'agit pas uniquement de considérer les avantages techniques de chaque outil (SIG, distribution, interactivité, ...), mais surtout de bien mesurer le niveau de difficulté rencontré par les apprentis modélisateurs lorsqu'ils essaient d'implémenter leur modèle sur telle ou telle plateforme. Ces formations nous permettent aussi d'élaborer une liste de modèles implémentés sur toutes ces plateformes et de comparer leur performance respective et les écarts observés, ce qui nous apporte des éléments concrets pour discuter des problèmes de réplification (Hales, Rouchier, et Edmonds 2003, Le Page et al. 2017).

En plus de cette 30aine de sessions, j'ai organisé plusieurs modules de formation au Brésil (5 sessions), en Uruguay (5) et au Costa Rica (4), avec une moyenne de 20 étudiants par session sur une semaine que j'anime seul.

Même si mes cours se focalisent sur les modèles SMA, j'essaie de présenter d'autres outils de modélisation tels que les systèmes à base d'équations différentielles, pour donner une vision

plus générale de la modélisation et montrer les avantages et désavantages de chaque paradigme.

Lors de ces formations, il me paraît important d'aller au-delà des aspects techniques et de discuter du rôle des modèles et des interrogations que soulève leur validation. Il faut aussi aborder la posture du modélisateur, particulièrement dans le contexte de la conception collective. A ce sujet, (Drogoul, Vanbergue, et Meurisse 2003) répartissent les étapes de la modélisation en 3 rôles : (i) le thématique qui conçoit le modèle du domaine, (ii) le modélisateur qui fournit un modèle de conception sensé lever les ambiguïtés dans la description du modèle du domaine, et (iii) l'informaticien qui propose un modèle opérationnel (indépendant de tout langage informatique) qui sert de base à l'implémentation. Ce rôle du modélisateur considéré comme un médiateur entre les deux experts, nécessite des connaissances fines sur la façon de concevoir un modèle (ou de le co-construire) et d'implémenter un simulateur. Néanmoins cela ne signifie pas qu'il faille obligatoirement ces trois personnes au minimum pour monter un projet de modélisation multi-agent, mais au moins qu'un des participants maîtrise ces rôles. Dans la pratique, le porteur d'une démarche ComMod cumule fréquemment ces rôles. Dans des projets de développement sur des terrains isolés, le modélisateur assure souvent l'animation des ateliers avec les acteurs. Ce cumul offre l'avantage d'une meilleure communication entre les rôles et une plus grande continuité dans l'interaction avec les thématiques et les acteurs du développement.

8. Projet de recherche

« Les chercheurs peuvent faire une chose plus nouvelle, plus difficile : favoriser l'apparition des conditions organisationnelles de la production collective de l'intention d'inventer un projet politique et, deuxièmement, les conditions organisationnelles de la réussite de l'invention d'un tel projet politique, qui sera évidemment un projet collectif »
P. Bourdieu "Pour un savoir engagé", Le Monde Diplomatique, fév. 2002

8.1. Une recherche ciblée sur “Les Communs” : ce qui nous lie

« Je préférerais aborder la question de savoir comment améliorer les capacités des acteurs concernés à changer les règles du jeu restrictives et à obtenir des résultats, autres que des tragédies sans remords... » Elinor Ostrom

La tragédie des communs, un modèle hégémonique

Garrett Hardin, professeur d'écologie à l'université de Californie UCSB a publié son célèbre article « La tragédie des communs » (Hardin 1968), qui décrit un conflit tragique entre l'intérêt individuel et le bien commun. Au-delà de la sphère académique, cet article a considérablement influencé les raisonnements économiques et politiques. Son modèle se fonde sur une expérience de pensée où un pâturage en commun est utilisé par des éleveurs pour y faire paître leurs vaches. Chacun est tenté de rajouter une bête pour l'engraisser et s'enrichir. Toutefois chaque vache supplémentaire exploite un peu plus la ressource fourragère. Et l'ensemble des vaches reçoit un peu moins d'herbe. Cet effet négatif est

partagé entre toutes les vaches, alors que la vente de la vache supplémentaire ne profite qu'à son propriétaire. C'est la fameuse "privatisation des profits, et socialisation des pertes". Comme le bénéfice individuel est positif, chaque éleveur est tenté d'augmenter son cheptel sur les terrains communaux. Ainsi d'ajout en ajout, le pâturage est surexploité et finalement le bien commun est détruit. "Même s'ils sont conscients de la catastrophe à venir, les éleveurs sont pris dans une logique inexorable, qui les conduit à détruire la ressource qui les fait vivre" (Hardin). Sur la logique du "what is not caught by me will be caught by others" (Janssen, Bousquet, et Ostrom 2011), Hardin en déduit que « Le libre usage des communs conduit à la ruine de tous ». A l'instar du dilemme du prisonnier, les actions individuelles dites rationnelles conduisent à un paradoxe, à savoir des résultats irrationnels sur le plan collectif. Pour contrer cet effet, Hardin proposera deux alternatives : la division en lots privés (chaque propriétaire gérant son pré carré en bon père de famille) ou l'appropriation et la régulation de ce bien par l'État qui fixe des règles, des quotas ou des droits d'accès.

Cet article qui a marqué durablement les esprits et que tout étudiant universitaire américain doit avoir lu²⁷, est utilisé par les cercles académiques, les médias, les administrations et les personnalités politiques néolibérales qui y trouvent une justification scientifique à une privatisation des ressources et des écosystèmes. Or de nombreux cas montrent que « *la propriété privée peut très bien conduire au saccage des ressources lorsque le capital est mobile : la recherche d'efficacité me conduit à détruire au plus vite et à déplacer mon investissement* » (Weber, 1995). C'est le cas par exemple de la déforestation en Amazonie ou de l'usage intensif d'intrants pour la culture du soja en Argentine (cf. chap. 6.2). De plus, le raisonnement de Hardin ne tient que si l'on suppose qu'on a affaire à des éleveurs n'agissant qu'en fonction d'un intérêt individuel étroit : l'appât du gain. Étant purement individualistes, ils sont incapables de communiquer pour créer des formes d'organisation régulant l'exploitation du pâturage. Hardin confond ce qu'il appelle des « *communs* » avec des situations de *libre accès* où tout le monde peut se servir à sa guise (Berkes et al. 1989). Or le terme « communs » recouvre autre chose : il désigne des systèmes d'organisation (des institutions) grâce auxquelles des communautés gèrent et vivent des ressources communes. De nombreux cas de gestion de biens collectifs souvent très durables existent dans le monde (pâtures, ressources hydriques, forêts, pêcheries, etc). Par ailleurs ces ressources sont "gérées par des individus qui communiquent, et parmi lesquels une partie au moins n'est pas guidée par un intérêt immédiat, mais par un sens collectif" (Hervé Le Crosnier dans Petitjean 2010 p.20).

Il faut reconnaître un mauvais usage des modèles qui consiste à prendre au pied de la lettre ceux qui vont dans le sens que l'on souhaite. Dans le cas de Hardin, son modèle « joue un rôle important dans l'entreprise qui consiste à persuader le public que "la libéralisation est une bonne chose" » (Boussard et al. 2005). Dans une analyse historique des travaux de Hardin, F. Locher (2013) va plus loin. Il explique que Hardin est devenu au sortir de la guerre un fervent militant de la cause néo-malthusienne qui considère que pour gérer les ressources, il faut contrôler la démographie. L'article de Hardin viserait surtout à dénoncer le mécanisme

²⁷ "Dans de nombreuses facultés en sciences de l'environnement, dans la plupart en fait, tout au moins aux États-Unis, les étudiants doivent étudier l'article de Garrett Hardin quelque trois ou quatre fois avant d'avoir terminé leurs études" E. Ostrom, citée dans Antona & Bousquet (2017).

irrépressible qui pousserait les individus à se reproduire sans frein, jusqu'à détruire les ressources naturelles. *“Dans sa métaphore, les bêtes que les éleveurs rajoutent sans cesse au pâturage, ce sont aussi... les enfants de ces mêmes éleveurs, qui ponctionnent toujours plus les richesses communes. Et c'est pourquoi il recommandait, là aussi, deux solutions : soit un contrôle de l'État sur la reproduction humaine, soit la création de « droits à enfanter » monétisables et échangeables. Un mélange d'État coercitif et d'idéologie de marché caractéristique de cette pensée de guerre froide”* (ibid.). En 1950, Hardin se déclare en faveur de la stérilisation des faibles d'esprit ("feeble-minded"). Dans la continuité de son idéologie, il milite alors contre l'aide alimentaire au tiers-monde au nom de ses effets contre-malthusiens. Puis, jusqu'à sa mort en 2003, il concentrera ses combats pour la lutte contre l'immigration.

Des expériences de la Tragédie des Communs à travers le jeu Fishbanks

Dans la plupart de nos sessions de formation, nous organisons dès le premier jour un jeu qui nous sert à aborder la gestion des ressources. J'ai ainsi animé une trentaine de sessions de Fishbanks. Ce jeu consiste en une simulation interactive assistée par ordinateur (de type « Computer-Assisted », cf. chap. 4.7), où des joueurs forment des entreprises de pêche qu'ils doivent administrer (Meadows et Meadows 1993). Les participants doivent maximiser leurs capitaux dans un monde virtuel de concurrence économique en exploitant des ressources naturelles renouvelables. Suite à son rapport demandé par le Club de Rome, “Les Limites à la croissance” (Denis Meadows et al. 1972), Dennis Meadows crée Fishbanks en 1986 en s'appuyant sur l'article de G. Hardin pour illustrer la “Tragédie des Communs”. A partir d'un accès libre à deux populations de poissons, le jeu conduit irrémédiablement à une crise liée à la surexploitation des ressources. Même si en début de session certains joueurs prédisent une crise environnementale, ils se laissent emporter la plupart du temps par la course à la plus grande flottille, course stimulée insidieusement par les animateurs qui proposent régulièrement divers types de ventes aux enchères de bateaux. Désireux d'entrer dans cette compétition, les joueurs oublient ce qui les fait vivre et lorsque survient l'effondrement des populations de poissons, il est souvent trop tard (il faut attendre une longue période de régénération sans pêche pour obtenir à nouveau des rendements satisfaisants).

Au cours d'une session, la gestion de la crise nécessite des discussions animées qui débouchent souvent sur des négociations sur les quotas ou les efforts de pêche, les plus gros souhaitant généralement des règles sur le nombre de bateaux à laisser au port quand les plus petits préfèrent des règles de proportionnalité. Lorsqu'un accord survient, il n'est pas rare de voir des joueurs qui ne respectent pas la règle collectivement décidée. Le choc de telles trahisons entraîne alors de nouvelles négociations qui aboutissent souvent à l'établissement de sanctions. De façon générale, le jeu passe donc par différentes phases, d'une compétition basée sur l'individualisme, à l'élaboration d'un diagnostic partagé, jusqu'à la mise en place de règles d'accès, de systèmes de contrôle, puis de sanctions décidées par le groupe.

Le débriefing du jeu permet de faire exprimer les ressentis de chacun et de décrire par le “vécu” les principes de la gestion communautaire des ressources. Une description plus approfondie du jeu permet ensuite de décrire le modèle sous-jacent et de comparer les

résultats avec le modèle de Gordon-Schaefer (1954). On montre alors les grandes différences entre les modèles mathématiques des deux chercheurs et les résultats produits par le jeu, différences dues aux hypothèses d'équilibre nécessaires à la résolution des équations²⁸. Outre l'aspect divertissant, le grand intérêt de ce jeu est de faire prendre conscience aux participants qu'une gestion de type capitaliste²⁹ d'une ressource commune conduit irrémédiablement à l'effondrement du système, alors que des accords entre les acteurs, acquis au cours d'âpres négociations, permettent de maintenir la viabilité du système.

Des alternatives réelles pour “Gouverner les Communs”

En 1965, Elinor Ostrom (1933-2012), politologue et économiste américaine, soutient sa thèse en sciences politiques à l'UCLA qui porte sur la gestion d'un aquifère californien. La ressource connaissant des problèmes de surexploitation et de salinisation par l'eau de mer, les multiples utilisateurs étaient confrontés à un problème d'action collective : chacun était incité à une course au pompage dans la nappe phréatique et l'absence de coordination entre les utilisateurs a mené à sa surexploitation. Accueillant avec scepticisme les travaux de Garrett Hardin qui affirme qu'il n'y a pas de résolution du problème par un collectif, Elinor Ostrom explique dans sa thèse comment les différents producteurs (propriétaires) sont parvenus malgré tout à trouver des solutions en recourant à des arènes de décision publiques (tribunaux) et privées (association d'usagers) afin de construire des accords pour réguler leur consommation et investir dans des solutions techniques de restauration des stocks d'eau douce. La tragédie n'était donc pas irrémédiable, contrairement à ce qu'annonçait la théorie dominante.

Le raisonnement de Hardin s'appuie sur une vision idéologique du monde (cf. chap. 2.2 sur la non-neutralité des modèles) qui impose comme conclusion soit la gestion étatique, soit des droits d'exploitation par la propriété individuelle³⁰. En réponse au cadre fixé par Hardin, Elinor Ostrom montre qu'il existe une « *troisième voie* » (Antona et Bousquet 2017), l'auto-gouvernance ou la gestion auto-organisée. Dans son livre majeur, *Governing the Commons* (Ostrom 1990), Ostrom critique les théories économiques conventionnelles appliquées aux ressources naturelles. Elle expose également les expériences tant fructueuses qu'infructueuses

²⁸ Pour être à l'équilibre, il ne faudrait prélever juste que la quantité produite par la population de poissons pendant un intervalle de temps ($dP/dt = 0$), or sans parler des multiples autres interactions, il est rare de se trouver dans de telles situations, c'est du moins ce que révèle le jeu.

²⁹ La stratégie “gagnante” financièrement consiste en début de jeu à investir massivement dans une grande flottille, quitte à payer des intérêts bancaires, pour profiter au maximum de la manne offerte par l'abondance des ressources, puis dès les premiers signes d'altération des stocks vendre voire brader l'ensemble de ses bateaux pour se transformer en une compagnie « éco-responsable ». C'est évidemment une stratégie purement capitaliste et non durable, mais dont on trouve de nombreux cas similaires dans la réalité.

³⁰ E. Ostrom ironise sur le rôle attendu des scientifiques : “Les scientifiques que nous sommes sont censés créer des modèles, trouver de nouvelles voies de réflexion et rechercher dans nos modèles et nos théories la solution optimale, pour ensuite recommander que la propriété revienne soit au secteur privé, soit au gouvernement. Nous pouvons supposer que les usagers ne vont pas résoudre ce dilemme de second ordre, c'est-à-dire trouver de nouvelles règles qu'ils s'imposeraient à eux-mêmes. Ils ne parviennent déjà pas à résoudre un dilemme de premier ordre, celui de réduire chacun individuellement leur exploitation... Notre rôle à nous est donc de développer des modèles qui peuvent être utilisés pour résoudre le problème, et de nombreux scientifiques sont ainsi devenus très, très fiers de ce rôle”. Ostrom, 2011, cité et traduit par Antona et Bousquet 2017, p. 32).

de gouvernance des biens collectifs afin de construire à partir de ces cas d'étude « de meilleurs outils intellectuels » destinés à tracer les capacités et les limites des collectivités autonomes à réguler leurs ressources. Dans le même temps elle explique qu'il n'existe pas de « liste de référence » ou de définition unique des communs. Chaque commun est le produit de circonstances historiques uniques, d'une culture locale, de conditions économiques et écologiques, etc. Son objectif est de forger une théorie de la gestion collective des communs en s'appuyant sur l'étude empirique de biens communs locaux « autogérés ». Elle cherche à mettre en évidence des principes de conception (*design principles*) pour favoriser l'émergence d'une gestion collective durable, mais en ajoutant aussitôt que si l'on ne prête pas attention au contexte, ses cadres de l'*Institutional Analysis Design* (IAD) deviennent des dogmes stériles.

De ses cadres d'analyse, elle fait ainsi ressortir sept principes fondamentaux : 1) des frontières clairement définies ; 2) des règles de prélèvement appropriées aux conditions locales et aux règles de fourniture de la ressource ; 3) des règles opérationnelles élaborées collectivement par ceux qui sont concernés par celles-ci ; 4) des contrôles dont on rend compte aux usagers, ou conduits par les usagers eux-mêmes ; 5) des sanctions graduelles ; 6) des mécanismes de résolution de conflits rapides et peu coûteux ; 7) une reconnaissance minimale du droit des usagers à concevoir leurs propres institutions. Un 8ème principe : une organisation en réseau multi-niveaux pour des cas de ressources plus étendues et plus complexes. Par ailleurs, elle analyse comment émergent et évoluent des institutions par la négociation, et étudie des cas d'échecs de gestion de biens communs en faisant ressortir notamment l'importance du contexte politique. Elle définit alors deux éléments clés de l'émergence de ces institutions : la **réciprocité** et la **confiance**. Elinor Ostrom, obtiendra le prix Nobel d'économie, en 2009, pour son étude des systèmes de règles organisant ces communs.

“Les travaux d'économie expérimentale dans lesquels elle s'est engagée ont contribué à comprendre le rôle de variables clés impliquées dans l'action collective et les dilemmes sociaux, comme l'information, la communication en face-à-face, la confiance, l'interaction et le savoir sur la ressource” (E. Brondizio, préface de Antona et Bousquet 2017).

Conclusion : vers une recherche pour accompagner la gestion collective des communs

Les modes de gestion des ressources naturelles basés sur les communs ne doivent pas seulement être défendus au nom des communautés qui en vivent et qui en dépendent, mais aussi parce qu'ils sont porteurs d'un modèle viable de gestion des ressources non seulement au niveau local, mais aussi au niveau planétaire. Car on pourrait aller jusqu'à dire que c'est parce que les ressources «naturelles» (terres, agriculture, forêts, eau, semences ou poissons) sont gérées comme des biens communs localement qu'elles peuvent être préservées aussi comme des «biens communs mondiaux» (Petitjean 2010).

Ces questionnements sur la gestion des communs ont longtemps été ignorés par la science économique et par la politique à l'exemple du « There is no alternative » de Margaret Thatcher. Or l'approche par les communs est peut-être en passe de redevenir un « outil pour penser » majeur (H. Le Crosnier, dans Petitjean 2010). C'est donc dans cette direction que je souhaite **orienter mes recherches** et développer des outils de modélisation au service de telles démarches.

Il ne s'agit pas de développer un modèle générique pour démontrer les manières d'obtenir la coopération sociale, car comme l'expliquent Bruno Latour et ses collègues « *Social simulations fail to obtain these arrangements, because they disregard the subtle mechanisms that govern the establishment of trust needed for cooperation. As shown by Ostrom, common standards, family ties, reputation and even facial expressions are crucial to obtain social cooperation. Impossible to anticipate through conceptual models, these factors can only be revealed by empirical observation* » (Venturini, Jensen, et Latour 2015). Dans *Governing the Commons*, Elinor Ostrom exprime une idée similaire en expliquant que « la raison pour laquelle on présente cet ensemble complexe de variables comme un cadre plutôt que comme un modèle est précisément parce qu'on ne peut pas englober (du moins avec les méthodes actuelles) ce degré de complexité dans un seul modèle » (Ostrom 1990, p 215)³¹.

Au contraire de la recherche d'un modèle de gestion des Communs qui risquerait d'aboutir à un « dogme stérile », mes futurs travaux consisteront à améliorer encore les outils de modélisation et de simulation interactive. Mais surtout, je chercherai à enrichir la méthodologie pour renforcer l'approche ComMod et stimuler sur le terrain des prises de conscience sur la nécessité de gérer les biens communs de façon équitable et viable³².

Par la volonté d'accompagner plutôt que de proposer des solutions, l'approche ComMod peut jouer un rôle majeur pour favoriser la gestion collective de ressources communes. Bien que souvent extérieur au terrain sur lequel il s'implique, le chercheur peut, dans certaines circonstances, favoriser l'émergence d'une vision partagée entre les acteurs pour promouvoir une gestion collective des communs. C'est ce rôle de catalyseur (cf. encart suivant) qu'une démarche d'accompagnement doit essayer de mettre en place, en s'appuyant sur des outils de médiation et en permettant aux acteurs de se projeter sur le long terme.

³¹ “The reason for presenting this complex array of variables as a framework rather than as a model is precisely because one cannot encompass (at least with current methods) this degree of complexity within a single model. When one chooses to model relationships, one can include only a subset of variables, and even then it is usually necessary to set some of these equal to zero or to an absolute value. The typical assumptions of complete information, independent action, perfect symmetry of interests, no human error, no norms of reciprocity, zero monitoring and enforcement costs, and no capacity to transform the situation itself will lead to highly particularized models, not universal theories. It is as essential to map the terrain for a family of models as it is to develop specific models. If the social sciences are to be relevant for analyses of policy problems, the challenge will be to integrate efforts to map the broad terrain and efforts to develop tractable models for particular niches in that terrain. Each CPR can be viewed as a niche in an empirical terrain.” (Ostrom 1990)

³² Il est cependant intéressant d'élargir le champ des communs au-delà de celui limité aux Biens communs. Car comme l'expriment Aubert et Karpe (2019) « *Les communs ne peuvent, en droit, être uniquement entendus comme des biens, ressources ou des richesses. Ils sont constitués d'un ensemble complexe de rapports sociaux, de catégories d'acteurs, de leurs rapports aux choses, aux biens et à leurs fonctions, de pratiques et de règles de gestion assurant à la fois les conditions d'accès et les modes de gouvernance. L'idéal ici n'est pas de produire et d'assurer le maximum de rentabilité, mais de réunir les conditions d'une "bonne vie"...* ». Dans le domaine du droit, ces auteurs expliquent que « *À l'heure actuelle, la quasi-totalité des législations nationales considèrent toutes les entités non humaines comme des biens. Si rien n'oblige à renier le concept de propriété, l'idée selon laquelle un titre de propriété confère le droit de détruire un écosystème est intolérable en l'état* » (ibid.).

Encart 1 : Le « catalyseur humain », cas des systèmes d'irrigation au Sri Lanka.

Dans son chapitre 5 sur « l'analyse des défaillances et vulnérabilités institutionnelles », Elinor Ostrom présente le cas des systèmes d'irrigation au Sri Lanka. La conception originale du projet d'irrigation du gouvernement appelait une réglementation excessive des agriculteurs et augmentait les activités de maintien de l'ordre. Pourtant la production de riz y était médiocre. A la fin des années 1970, la situation était décrite comme un "cauchemar hydrologique" : défiance entre agriculteurs, défiance réciproque entre les agriculteurs et les agents du département de l'Irrigation, corruption et favoritisme, problèmes ethniques entre Tamouls et Cinghalais, etc. Mais un changement radical de situations eut lieu dans une des zones du projet. Au lieu de suivre les recommandations du projet, l'équipe en charge de cette zone choisit d'introduire des "**catalyseurs**" dans cette situation de méfiance mutuelle et d'imprévisibilité. Ces catalyseurs furent appelés "organiseurs institutionnels" (OI). *« Après être devenu familier avec les agriculteurs et leurs problèmes, l'OI devait rencontrer de manière informelle de petits groupes d'agriculteurs partageant le même canal de champ pour développer des stratégies d'auto-assistance. Au lieu d'établir une organisation prédéfinie, l'OI tentait de mettre sur pied un comité de travail pour résoudre des problèmes particuliers. [...] L'équipe [en charge de cette zone] tenta de mettre en place ses organisations ascendantes avant que commencent les activités de réfection, de manière à fournir une arène pour la discussion entre agriculteurs et ingénieurs [...] Lorsque cette phase de conception commença, les agriculteurs avaient déjà commencé à travailler ensemble et avait de bonnes idées quant à la manière de remettre en état leurs canaux de champ. Les agents du DI commencèrent alors à modifier leurs a priori envers eux »*. Rapidement, les relations entre les agents et agriculteurs s'améliorèrent et les OI avaient « favorisé une communication plus intense, une meilleure compréhension et une confiance mutuelle. Ce regain de confiance traversait les barrières ethniques ».

En introduisant des facilitateurs (des "**catalyseurs humains**" selon les termes d'Ostrom) afin qu'ils travaillent directement avec les agriculteurs et agents, ce cas démontre comment des personnes externes peuvent aider les acteurs à surpasser leur méfiance et leur animosité mutuelles. Pour qu'un tel programme réussisse, il est nécessaire que tant les agriculteurs que les agents d'irrigation en arrivent à accepter les organisations d'agriculteurs et les considérer comme des outils légitimes et permanents dont le rôle est de traiter les problèmes de long terme.

En réfléchissant sur les « opportunité et défis d'une approche par les communs de la terre et des ressources qu'elle porte », S. Aubert et ses co-auteurs expliquent qu'en termes juridiques, « il est nécessaire de disposer d'outils adaptés qui permettent d'accompagner les acteurs pour examiner les évolutions possibles dans les façons de produire des règles individuelles, communes et collectives et qui respectent les valeurs et les objectifs communs » (Aubert at al. 2017). Pour aborder ce champ de recherche, il est important de réunir les forces et les compétences de chacun. Il faut alors aussi disposer d'outils informatiques et de méthodes d'accompagnement qui permettent de réaliser ces mêmes objectifs.

8.2. Développer des outils pour accompagner la gestion des communs

En charge du développement de Cormas, j'ai décrit les fonctionnalités offertes par cette plateforme (Bommel, Becu, et al. 2016) et la niche particulière qu'elle occupe, à savoir la conception collective de modèles et la simulation interactive (ou simulation hybride, Le Page et al. 2014) qui mixe des décisions prises par les joueurs et d'autres par les agents du modèle. En omettant les projets de recherche et développement (qui nécessitent beaucoup de temps et de présence sur le terrain, mais qui dépendent des réponses aux appels d'offre des bailleurs), cette partie se focalise uniquement sur les travaux que je souhaite mener pour développer des outils de modélisation et de prospective afin de faciliter la compréhension mutuelle entre les acteurs et pour l'appui à la gestion des communs.

Cormas in 10 years!

Lors de la 2ième conférence virtuelle CoMSES³³ 2018, j'ai été invité par Marco Janssen, directeur du "Center for Behavior, Institutions and the Environment" de l'université d'Arizona, a présenté notre vision du futur de la plateforme Cormas (Bommel et al. 2018). Cela a été l'occasion de réfléchir sur les orientations que nous, l'équipe de développeurs, souhaitons prendre pour faire évoluer la plateforme Cormas. L'article ci-dessous en présente le résumé et une vidéo de la session ainsi qu'une suite de questions - réponses sont disponibles sur le site de CoMSES.

Traduction française du résumé :

Cormas est une plateforme de modélisation et de simulation multi-agent qui aborde les interactions entre les acteurs d'un système pour l'utilisation et la gestion des ressources renouvelables.

La philosophie de Cormas est de pouvoir utiliser la plateforme avec des personnes qui ne sont pas des spécialistes de la modélisation. Le développement de Cormas vise à soutenir l'approche de modélisation d'accompagnement dite ComMod - une forme originale de modélisation participative. L'objectif des modèles et des simulations construits avec la plateforme est de promouvoir une vision partagée d'un système en prenant en compte les différents points de vue et préoccupations des acteurs.

Dans 10 ans, nous voudrions que Cormas offre des interactions homme-machine plus réactives. Nous pourrions alors utiliser des plateaux de jeu interactifs en y positionnant des objets tangibles pour permettre des simulations participatives. Nous souhaitons aussi mettre au point divers dispositifs afin de faciliter l'interaction des participants avec la simulation. Cela encouragera, espérons-le, des simulations plus vivantes et interactives permettant à un

³³ CoMSES (Computational Modeling for SocioEcological Science) est un réseau international de chercheurs et de professionnels dont l'objectif commun est d'améliorer la façon dont nous développons, partageons et utilisons la modélisation à base d'agents en sciences sociales et en écologie. Pour promouvoir des bonnes pratiques, CoMSES abrite également le site openABM qui permet de déposer des modèles ABM pour pouvoir les conserver, les référencer, les reproduire et les réutiliser.

groupe d'utilisateurs de se comporter de façon spontanée, et d'exprimer leurs émotions et leur empathie.

La conception collective d'un modèle à l'aide de diagrammes UML exécutable et de réutilisation de blocs logiciels constituera une innovation importante pour rendre le développement de modèles accessible aux non-modélisateurs. Des outils de l'intelligence artificielle pour l'apprentissage automatique et le calcul à haute performance seront utilisés pour améliorer les simulations hybrides ainsi que l'exploration collective de modèles. L'objectif est de pouvoir modifier le modèle et d'explorer toutes les trajectoires possibles d'une simulation au cours d'un atelier participatif avec les participants.

En bref, le développement de Cormas dans les 10 prochaines années se concentrera sur le sens du modèle et sur les interactions entre les participants.

Au cours de la conférence, M. Janssen m'a interrogé : "You mention not to go to 3D simulations. With the advanced technologies in the future why not provide the stakeholders more detailed simulations? Could you expand on that?"

Ma réponse a été la suivante : *"En effet, notre objectif n'est pas d'aller vers des simulations plus réalistes. Je n'ai pas dit que nous n'utiliserons jamais de représentations 3D, ni de lunette d'immersion (qui sait de quoi l'avenir sera fait !). Mais nous ne concentrons pas nos efforts sur ce type de développement. Nous ne recherchons pas nécessairement plus de réalisme. Pourquoi ?*

Parce qu'un modèle (ou une simulation) n'est qu'un artefact qui permet à un groupe de participants de se projeter dans l'avenir, mais surtout de débattre des orientations de ce collectif donné.

Il ne faut donc pas essayer d'éblouir ce collectif avec des outils de haute technologie, mais plutôt de produire une représentation du système socio-écologique qui soit transparente et compréhensible à tous. Nous craignons que la présentation d'outils de haute technologie n'impressionne trop les participants, ce qui les empêcherait de remettre en question la structure du modèle et le comportement des agents.

La critique et la révision d'un modèle constituent le moteur même d'un processus dynamique d'apprentissage. Entre l'approche "KISS" ou "KIDS", nous donnons la priorité à l'approche KILT : Keep It a Learning Tool (Le Page et Perrotton 2017)!"

En effet, à l'opposé des courants actuels, l'objectif ne sera pas, a priori, d'investir dans la modélisation en 3D, ni dans l'utilisation de lunettes et casques vidéo LCD pour des simulations en immersion. Car le but principal n'est pas d'obtenir des simulations plus réalistes dont le rendu "high-tech" peut impressionner les utilisateurs et renforcer l'effet "boîte noire" du modèle (Horlitz 2007; Gurung, Bousquet, et Trébuil 2006)³⁴. Au contraire,

³⁴ Gurung et al. (2006) expliquent également que "Realistic representations prevent the stakeholders from taking a distance from reality (and interpersonal conflicts, etc.)"

les participants d'une simulation doivent comprendre que le modèle n'est qu'une imitation grossière de leur système, un ersatz de leur réalité afin qu'ils se sentent toujours légitime de le critiquer. Le but n'est pas de tendre vers plus de réalisme, mais de voir le modèle à la fois comme (a) un artefact (un "macroscope" dirait Joël de Rosnay) qui donne une vision globale du système et un recul sur les dynamiques en cours pour expliquer les raisons d'une crise, et aussi comme (b) un objet de médiation pour susciter le dialogue entre les acteurs.

L'orientation privilégiée pour Cormas reste l'interactivité avec les acteurs. C'est la raison pour laquelle le principal effort sera consacré aux interfaces homme-machine et au design ergonomique. Par exemple, nous développerons une extension pour contrôler le mouvement des agents sur la grille spatiale à travers des objets tangibles qui sont physiquement déplacés sur une table. Ce développement utilisera la reconnaissance numérique de QR codes imprimés sur le dessus des objets physiques. En projetant la grille spatiale sur une table, cette extension sera utilisée dans des simulations hybrides mêlant environnements virtuels et objets réels. Tous ces développements auront lieu en parallèle avec des expériences concrètes sur le terrain engageant divers acteurs locaux afin d'apporter des contributions significatives sur les questions sociales et environnementales.

Cormas Pharo

"Sharing and learning-by-modeling generate
empathy and mutual understanding"
(Bommel, Bécu, Bonté, Delay, Le Page, et al. 2018)

Un chantier important que nous avons entamé consiste à migrer Cormas de VisualWorks (VW) à Pharo. Ces deux langages sont deux implémentations de Smalltalk, mais à l'inverse de VW, Pharo bénéficie d'une licence libre. Lors de la création de Cormas, VW était développé et maintenu au Xerox PARC, puis par ParcPlace Systems. Puis il a été repris par la compagnie Cincom. Bien qu'étant un logiciel open-source et gratuit dans sa version "non commerciale", VW ne bénéficie pas d'une véritable licence libre ou « copyleft » qui garantit aux utilisateurs le droit de modifier un logiciel et de le redistribuer. Et aujourd'hui nous nous sentons piéger, car Cincom a quasiment cessé d'investir dans son logiciel propriétaire. De plus, il n'est maintenant proposé qu'une "version d'essai" de VW et la version VW7.6nc que nous utilisons n'est plus disponible sur le site de l'entreprise américaine.

Pour ces raisons, et bien que VW soit une excellente implémentation de Smalltalk, nous avons décidé de migrer le développement de Cormas sous Pharo, logiciel libre sous licence "MIT" (Cormas est sous la même licence).

Comme VW, Pharo est langage de programmation dynamique dont un des intérêts principaux est qu'il n'est pas nécessaire de recompiler tout le code dans le cas de la modification d'une méthode. Cette fonctionnalité s'exprime pleinement dans le débogueur de Pharo qui permet d'arrêter un flot d'exécution, d'inspecter les valeurs des paramètres, de modifier des instructions, de créer de nouvelles méthodes, puis de reprendre le flot d'exécution. Comparer au traditionnel "edit, compile and run", cette fonctionnalité facilite le processus

d'apprentissage et constitue un atout majeur pour des apprentis modélisateurs. En entrant dans le débogueur, ils comprennent mieux le déroulement de leur code, peuvent vérifier les instructions et leur suite logique, et toucher du doigt les objets de leur modèle. Les concepts objets deviennent plus clairs et plus cohérents. Sans quitter le débogueur, ils peuvent alors continuer à coder leur modèle (« Live coding ») en vérifiant immédiatement la robustesse à chaque étape (« direct model checking »). Grâce à la réflexivité du langage, on peut aussi imaginer de créer des agents apprenants capables de modifier leur structure et leur comportement en pleine exécution d'une simulation.

La migration sous Pharo est aussi l'occasion de rejoindre une communauté de développeurs motivés et actifs qui semble accueillir la venue de Cormas avec entrain. C'est du moins ce qu'il nous a semblé lors de notre participation (Bommel et al, 2018³⁵) à la dernière conférence ESUG (European Smalltalk User Group) qui réunit une grande partie de cette communauté. Plusieurs développeurs ont commencé à travailler sur la nouvelle version de Cormas (<https://github.com/cormas/cormas/>). Sous nos préconisations, le Cirad a rejoint le consortium Pharo en 2019.

Étant donné que Pharo fonctionne sur iOS et Android, nous développerons une version de Cormas pour smartphone de manière à faciliter les interactions des utilisateurs-joueurs avec une simulation collective (car même au fin fond de l'Amazonie, sans réseau téléphonique ni internet, les jeunes possèdent tous un smartphone !).

Pour aider les thématiciens à implémenter leurs modèles, les développements de Cormas-Pharo se concentrent sur la conception d'interfaces utilisateur pour générer automatiquement une partie du code informatique. Un éditeur de diagramme de classes, qui génère le code des classes, attributs et associations est disponible (Uhnak et Bommel 2016) mais il reste encore à l'améliorer et à l'intégrer dans Cormas-Pharo.

Nous développerons également un éditeur plus complet de diagramme d'activité permettant de manipuler les variables. Le modélisateur définira des points de décision en décrivant graphiquement le test à partir des paramètres du modèle et d'opérateurs logiques. Ces diagrammes d'activité avec paramètres d'entrée et de sortie seront utiles pour définir des opérations plus complexes. Cependant cet outil sera difficilement utilisable avec des acteurs non scientifiques.

Avec l'arrivée dans Pharo, la partie SIG ne sera pas en reste avec la possibilité de récupérer et d'afficher des données d'*OpenStreetMap* et d'autres bases de données géographiques. Mais, s'il est intéressant (et souvent demandé) d'afficher et d'utiliser une carte vectorielle dans Cormas, on peut rapidement se trouver contraint par l'aspect statique d'un SIG. Pouvoir visualiser une carte est souvent demandé par les utilisateurs. Mais si le paysage ne peut pas évoluer, s'il reste figé, il est préférable de revenir à un système "raster" pour faire croître ou rétrécir des champs ou des forêts. Une des voies de recherche que nous mènerons consistera donc à concevoir des entités spatiales déformables afin de pouvoir transformer progressivement un paysage sous l'action simultanée des activités des agents et de la dynamique naturelle des couverts végétaux.

³⁵<https://hackmd.iscpif.fr/p/By-9IVqfQ#/>

8.3. UML, le langage de la modélisation pour l'interdisciplinarité

“Diagram is worth ten thousand words” (H.A. Simon, 1987)

Comme expliqué au chapitre 7 « Sessions de formation », j'insiste lors des formations à la modélisation multi-agent sur la formalisation des modèles sous forme de diagrammes UML. Depuis 19 ans que je donne régulièrement ce module UML, j'ai acquis une expertise particulière dans ce domaine à force de reprendre et de modifier le contenu de ce cours pour faire comprendre les concepts objets à des non-informaticiens. Il ressort des évaluations de ces cours que la partie UML est spécialement appréciée par les participants³⁶. Car ils comprennent l'intérêt de maîtriser ce formalisme à la fois pour publier leur modèle, mais surtout pour la phase de conception individuelle ou collective.

La phase de conception doit être considérée comme l'étape privilégiée d'un dialogue entre les experts, les thématiciens, les acteurs du développement et parfois les informaticiens. Il faut appréhender cette phase avec des outils graphiques simples et non ambigus afin de rapprocher les disciplines. On comprend ainsi avec (Morand 2000) que "le diagramme est au cœur du processus cognitif et non pas à la périphérie". Dans cette perspective de la “pensée par diagramme”, UML devient un véritable langage de représentation des connaissances (Bommel et Müller 2007). Il faut donc l'appréhender comme un langage universel pour rapprocher les disciplines.

Me positionnant dans l'approche constructiviste, je considère que les connaissances et leurs représentations sont des construits sociaux avec leur légitimité et leurs limites de validité. Dès lors, les différents discours disciplinaires ainsi que les discours des acteurs deviennent autant de points de vue sur une réalité qu'il s'agit d'explicitier et d'articuler autour d'une question partagée et elle-même construite.

Au-delà d'un simple outil de design, UML peut jouer un rôle privilégié qui autorise le dialogue entre disciplines. Mais à cette fin, le modélisateur doit aussi être un facilitateur. Car, pour permettre cette collaboration entre les disciplines, il est nécessaire que les interlocuteurs des diverses thématiques parcourent les uns comme les autres une partie du chemin qui les sépare trop souvent. Il est essentiel en effet que chacun puisse s'exprimer dans un langage accessible à ses partenaires, ne serait-ce que pour pleinement appréhender les limites et les possibilités des approches respectives des uns et des autres. Dans ce contexte, le modélisateur doit faciliter les échanges et traduire les propositions de chacun en un modèle conceptuel cohérent et compréhensible par tous.

Alors, si la modélisation participative favorise effectivement la compréhension réciproque de points de vue disparates en essayant de proposer une synthèse intelligible, sensée et surtout partagée, il reste encore à proposer une posture d'écoute et des méthodes pratiques pour

³⁶ De nombreux participants aux formations m'ont conseillé d'écrire un livre à partir des cours montrant des exemples ayant trait à l'agronomie et la gestion des ressources naturelles, et proposer l'implémentation de ces exemples dans Cormas, Netlogo et Gama.

guider le modélisateur à conduire cette maïeutique. Être capable d'articuler savoirs scientifiques et profanes semble une voie prometteuse pour la transdisciplinarité.

8.4. Simulation et théâtre-forum : Et si j'avais agi autrement ?

Mis au point par le brésilien Augusto Boal, le théâtre-forum (TF) est un type de théâtre qui permet des échanges, des interactions et des réflexions avec le public. Expérimenté dans les favelas de São Paulo dans les années 1960, le TF a montré son efficacité pour la prise en compte de points de vue antagonistes et pour la recherche de solutions à des problèmes sociaux et personnels. Aussi appelé théâtre de l'opprimé, Augusto Boal inventa cette forme de théâtre afin de permettre à un public dont la parole n'est pas prise en compte de s'exprimer librement.

Une session de TF se compose généralement de deux parties. Une première partie, "exposition", consiste en une représentation par des acteurs d'une scène illustrant une situation d'oppression ou une problématique de la réalité sociale ou économique. Dans une deuxième partie, "intervention du public", le public est invité à donner son point de vue sur la scène. Le facilitateur propose alors de rejouer la scène en remplaçant certains acteurs par des membres du public qui pourraient faire infléchir le cours des événements.

Il s'agit donc d'une technique de théâtre participatif dans lequel le spectateur et le public devient acteur pour proposer et tester des formes alternatives de comportements afin de résoudre un problème social. Sous l'impulsion de François Bousquet, cette technique théâtrale est maintenant expérimentée par l'UR GREEN dans quelques projets.

Or le théâtre-forum n'est pas sans rapport avec la simulation interactive où les participants peuvent influencer par leurs actions sur le déroulement d'une simulation multi-agent. Les outils développés pour Cormas tels que l'éditeur de diagrammes d'activités xUML permettent de décrire le comportement général d'un agent (cf. chap. 5.7). En cours de simulation, il est alors possible de modifier le diagramme d'activité d'un agent afin de voir comment son nouveau comportement influence la dynamique générale (Bommel, Becu, et al. 2016).

A l'instar du théâtre-forum qui propose d'explorer collectivement des scénarios, une simulation avec Cormas permet aussi de "voyager" dans une simulation (chap. 5.8). Grâce aux outils « time traveling », il est possible de revenir en arrière ("backward") et de se positionner à un moment précis de la simulation. On peut alors rejouer la même scène ("forward") ou choisir de repartir de ce moment en expérimentant d'autres comportements.

Ces outils qui sont opérationnels depuis peu, n'ont pas encore été testés sur le terrain, c'est à dire lors d'atelier avec des acteurs du développement. Il faut encore les perfectionner pour qu'ils deviennent de véritables outils pour l'apprentissage par l'expérience. Étant donné leurs points communs, il serait intéressant d'imaginer des façons de coupler des sessions de théâtre-forum avec des simulations interactives sous Cormas, par exemple lors la phase de débriefing d'un atelier de théâtre-forum.

8.5. Conclusion : Transmettre

Au-delà des modèles produits, mes expériences de co-construction de modèles dans des contextes d'accompagnement d'acteurs ont révélé l'importance du processus de modélisation en tant que tel, à la fois pour produire, partager et intégrer des connaissances, mais aussi pour faciliter la communication, la coordination, la négociation et l'apprentissage. Au cours des prochaines années, je concentrerai mon travail plus spécifiquement sur l'apprentissage social et sur la manière d'accompagner par la modélisation l'émergence d'accords entre des acteurs d'un SES.

Ces travaux se poursuivront au travers de projets de recherche et de développement sur différents terrains et sur des problématiques variées. Mais je m'attacherai à m'investir sur des thèmes qui touchent plus particulièrement à la gestion collective de ressources, afin de renforcer les capacités des acteurs les moins favorisés et essayer de faire émerger d'autres voies que celles de la tragédie.

Pour mener à bien ces recherches, je continuerai à m'intéresser aux diverses formes de modélisation, prise dans un sens très large, des modèles mathématiques aux jeux de rôle et au théâtre-forum, en passant par l'économie expérimentale (Janssen, Bousquet, et Ostrom 2011) et bien évidemment aux SMA. Je compte donc continuer à m'investir dans le développement de Cormas pour accompagner son évolution parmi la communauté libre de Pharo. Cormas deviendra alors un bien immatériel commun qu'il faudra néanmoins continuer à enrichir pour qu'il survive ! Son développement sera orienté vers l'accompagnement des acteurs pour « examiner les évolutions possibles dans les façons de produire des règles individuelles, communes et collectives et qui respectent les valeurs et les objectifs communs » (Aubert et al. 2017).

En parallèle de mes propres recherches et expériences avec les acteurs du développement, je souhaiterais continuer de transmettre des valeurs acquises au cours de toutes ces années. Mais au-delà d'enseigner des connaissances et des techniques en modélisation, je souhaiterais faire partager des postures, postures d'animation sur le terrain, postures d'écoute pour l'interdisciplinarité.

Références

- Alam, Shah Jamal, Frank Hillebrandt, et Michael Schillo. 2005. « Sociological implications of gift exchange in multiagent systems ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 8 (3). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/3/5.html>.
- Amblard, Frédéric, Pierre Bommel, et Juliette Rouchier. 2007. « Assessment and validation of multi-agent models ». In *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*, Bardwell Press (GEMAS Studies in social analysis series), 93-116. Oxford: D. Phan, F. Amblard.
- Antona, Martine, et François Bousquet. 2017. *Une troisième voie entre l'État et le marché: Échanges avec Elinor Ostrom*. Quae.
- Arbeletche Favat, Pedro. 2016. « Análisis de la agricultura desde la perspectiva de la Economía Industrial: el caso de Uruguay ». Alicante, Espana: Universidad de Alicante. Departamento de Análisis Económico Aplicado. <http://hdl.handle.net/10045/54002>.
- Aubert Sigrid, Antona Martine, Bousquet François, Toulmin Camilla, D'Aquino Patrick (eds.), 2017. *Opportunité et défis d'une approche par les communs de la terre et des ressources qu'elle porte*. FAO of the UN. Paris : MEAE-AFD, 83 p.
- Aubert Sigrid, Karpe Philippe. 2019. « Comment envisager le droit des communs tissés autour de la terre et des ressources qu'elle porte ? ». In : *Communs, aujourd'hui ! Enjeux planétaires d'une gestion locale des ressources renouvelables*. Delmas Bruno (ed.), Le Roy Etienne (ed.), Giraud, Gaël (ed.). Paris : Karthala, 73-99. (Hommes et sociétés) ISBN 978-2-8111-2564-6
- Aubin, JP. 1991. *Viability Theory* Birkhäuser. Modern Birkhauser Classics. Boston: Springer.
- Axelrod, Robert. 2003. « Advancing the art of simulation in the social sciences ». *Japanese Journal for Management Information System. Special Issue on Agent-Based Modeling* 12 (3).
- Balci, Osman. 1998. « Verification, validation, and accreditation ». In , 1:41-48. IEEE Computer Society Press.
- Barnaud, Cécile, Patrick d'Aquino, William's Daré, et Raphaël Mathevet. 2017. « Dispositifs participatifs et asymétries de pouvoir: expliciter et interroger les positionnements ». *Participations*, no 16 (mai): 137-66.
- Barnaud, Cécile, Annemarie van Paassen, Guy Trébuil, Tanya Promburom, et François Bousquet. 2010. « Dealing with Power Games in a Companion Modelling Process: Lessons from Community Water Management in Thailand Highlands ». *The Journal of Agricultural Education and Extension* 16 (1): 55-74. <https://doi.org/10.1080/13892240903533152>.
- Barnaud, Cecile, et Annemarie Van Paassen. 2013. « Equity, Power Games, and Legitimacy: Dilemmas of Participatory Natural Resource Management ». *Ecology and Society* 18 (2). <https://doi.org/10.5751/ES-05459-180221>.
- Barreteau, Olivier. 2003. « The Joint Use of Role-Playing Games and Models Regarding Negotiation Processes: Characterization of Associations ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* Vol. 6, No. 2. <<http://Jasss.Soc.Surrey.Ac.Uk/6/2/3.Html>>, 2003. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/3.html>.

- Barreteau, Olivier, et Francois Bousquet. 1999. « Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents. » In actes des 7èmes JFIADSMA, 99:67-80. La Réunion.
- Barreteau, Olivier, François Bousquet, et Jean-Marie Attonaty. 2001. « Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems ». *Journal of artificial societies and social simulation* 4 (2): 5.
- Barreteau, Olivier, et others. 2003. « Our Companion Modelling Approach ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* Vol. 6, No. 1. <<http://Jasss.Soc.Surrey.Ac.Uk/6/2/1.Html>>, 2003. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/1.html>.
- Bart, Jonathan. 1995. « Acceptance criteria for using individual-based models to make management decisions ». *Ecological applications* 5 (2): 411-20.
- Becu, Nicolas, N Frascaria-Lacoste, et J Latune. 2014. « Distributed Asymmetric Simulation - Enhancing Participatory Simulation Using the Concept of Habitus. » In . Dornbirn, Austria, Bertelsmann.
- Berger, Peter L, et Thomas Luckmann. *The Social Construction of Reality: A Treatise in the Sociology of Knowledge*. Garden City. Anchor Books. NY, 1966.
- Berkes, Fikret, David Feeny, Bonnie J McCay, et James M Acheson. 1989. « The benefits of the commons ». *Nature* 340 (6229): 91.
- Bigbee, Anthony, Claudio Cioffi-Revilla, et Sean Luke. 2007. « Replication of Sugarscape using MASON ». In *Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems IV*, 183-90. Springer.
- Bommel, Pierre. 2009. « Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents adaptée à la gestion des ressources renouvelables ». Montpellier, France: Université de Montpellier 2, France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00396803/fr/>.
- Bommel, Pierre, Nicolas Bécu, Bruno Bonté, Etienne Delay, et Christophe Le Page. 2018. « Cormas in 10 years! » In . Virtual conference. <https://forum.comses.net/t/cormas-in-10-years>.
- Bommel, Pierre, Nicolas Bécu, Bruno Bonté, Etienne Delay, Christophe Le Page, Hernan Morales, Nick Papoulias, et Serge Stinckwich. 2018. « CORMAS, a participatory and interdisciplinary Agent Based Simulation Platform ». In . Università degli Studi di Cagliari – Sardinia.
- Bommel, Pierre, Nicolas Becu, Christophe Le Page, et François Bousquet. 2016. « Cormas: An Agent-Based Simulation Platform for Coupling Human Decisions with Computerized Dynamics ». In *Simulation and Gaming in the Network Society*, 9:387–410. Springer.
- Bommel, Pierre, Marie-Paule Bonnet, Emilie Coudel, Eva Haentjens, Cleber Nunes Kraus, Gustavo Melo, Stephanie Nasuti, et Christophe Le Page. 2016. « Livelihoods of Local Communities in an Amazonian Floodplain Coping with Global Changes. From Role-Playing Games to Hybrid Simulations to Involve Local Stakeholders in Participatory Foresight Study at Territorial Level ». *Communication avec actes. Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Modelling and Software*. 2016. <http://www.iemss.org/sites/iemss2016/vol4.php>.
- Bommel, Pierre, Francisco Dieguez, Danilo Bartaburu, Emilio Duarte, Esteban Montes, Marcelo Pereira Machin, Jorge Corral, Carlos José Pereira de Lucena, et Hermes Morales Grosskopf.

2014. « A Further Step Towards Participatory Modelling. Fostering Stakeholder Involvement in Designing Models by Using Executable UML ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 17 (1): 6.
- Bommel, Pierre, Thérèse Libourel, et Sylvie Lardon. 2000. « Conception objet dans le cadre des systèmes d'information spatiaux: Agrégation spatiale et généralisation. » In *INFORSID*, 302–313.
- Bommel, Pierre, et Jean Pierre Müller. 2007. « An Introduction to UML for Modelling in the Human and Social Sciences ». In *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Bardwell Press, 273-94. GEMAS Studies in Social Analysis Series. Oxford: D. Phan, F. Amblard.
- Bommel, Pierre, Rene Pocard-Chapuis, Amaury Burlamaqui Bendahan, et Emilie Coudel. 2012. « An ABM to monitor landscape dynamics and to undertake collective foresight investigations in the Amazon ». In *Proceedings of the 2012 Third Brazilian Workshop on Social Simulation*, 91–98. IEEE Computer Society.
- Boudon, Raymond, et Renaud Fillieule. 2012. « L'individualisme méthodologique ». In , 13e éd.:41-91. *Que sais-je ?* Paris cedex 14: Presses Universitaires de France. <https://www.cairn.info/les-methodes-en-sociologie--9782130606338-p-41.htm>.
- Bourdieu, Pierre. 1980. *Le Sens pratique*. Éditions de Minuit. Paris.
- Bousquet F, Trébuil G, Hardy B, editors. 2005. “Companion modeling and multi-agent systems for integrated natural resource management in Asia”. Los Baños (Philippines): IRRI , International Rice Research Institute. 360 p.
- Bousquet, François, Martine Antona, et Jacques Weber. 1994. « Simulations multi-agents et gestion des ressources renouvelables ». In . CIRAD-SAR.
- Bousquet, François, Innocent Bakam, Hubert Proton, et Christophe Le Page. 1998. « Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems ». In *Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*, édité par Angel Pasqual del Pobil, José Mira, et Moonis Ali, 1416:826-37. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/3-540-64574-8_469.
- Boussard, Jean-Marc, Françoise Gérard, et Marie-Gabrielle Piketty. 2005. *Libéraliser l'agriculture mondiale?: théories, modèles et réalités*. Editions Quae.
- Bradbury, Roger. 2002. « Futures, predictions and other foolishness ». *Complexity and Ecosystem Management*. Edward Elgar, Cheltenham UK, 48-62.
- Brant, John, et Ralph E Johnson. 1994. « Creating Tools in HotDraw by Composition. » In , 445-54. Citeseer.
- Brauer, Johannes. 2015. « The VisualWorks Development Environment ». In *Programming Smalltalk – Object-Orientation from the Beginning*, 77-96. Springer Fachmedien Wiesbaden. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-06823-3_5.
- [Collectif ComMod] Bousquet, F, M Antona, S Aubert, C Barnaud, O Barreteau, N Becu, S Boisseau, et al. 2009. « La posture d'accompagnement des processus de prise de décision: les références et les questions transdisciplinaires ». In *Modélisation de l'environnement: entre natures et sociétés.*, 71–89. Quae. Hervé Dominique (ed.), Laloë Francis (ed.).

- ComMod, Collectif. 2005. « La modélisation comme outil d'accompagnement ». *Natures Sciences Sociétés* 13 (2): 165-68. <https://doi.org/10.1051/nss:2005023>.
- Conte, Rosaria, et Cristiano Castelfranchi. 1995. « Understanding the functions of norms in social groups through simulation ». *Artificial societies: the computer simulation of social life* 1: 252-67.
- Corral, J, P Arbeletche, JC Burges, H Morales, G Continanza, J Couderc, V Courdin, et P Bommel. 2008. « Multi-Agent Systems applied to land use and social changes in Rio de la Plata basin (South America) ». 8th European International Farming Systems Association, France.
- Crookall, David, Allan Martin, Danny Saunders, et Alan Coote. 1986. « Human and computer involvement in simulation ». *Simulation & Games* 17 (3): 345-75.
- Damasio, Antonio. 1999. *The Feeling of what Happens: Body and Emotion in the Making of Consciousness*. Houghton Mifflin Harcourt. https://books.google.com/books/about/The_Feeling_of_what_Happens.html?hl=fr&id=RSOPDHP9QekC.
- D'Aquino, Patrick, Christophe Le Page, Francois Bousquet, et Alassane Bah. 2003. « Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management: The SelfCormas Experiment in Senegal ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6 (3). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/3/5.html>.
- Daré, William, Sigrid Aubert, Alassane Bah, Aurélie Botta, Ibrahima Diop-Gaye, Christine Fourage, Gilles Lajoie, et Grégoire Leclerc. 2008. « Difficultés de la participation en recherche-action: retour d'expériences de modélisation d'accompagnement en appui à l'aménagement du territoire au Sénégal et à la Réunion ». [VertigO] *La revue électronique en sciences de l'environnement* 8 (2).
- Daré, William's, Cécile Barnaud, Patrick d'Aquino, Michel Étienne, Christine Fourage, et Véronique Souchère. 2010. « La posture du commodien: un savoir être, des savoir-faire ». In *Modélisation d'accompagnement*, 47-70. Update Sciences & Technologies. Versailles: Editions Quæ. <https://doi.org/10.3917/quae.etien.2010.01.0009>.
- Deffuant, Guillaume, Scott Moss, et Wander Jager. 2006. « Dialogues concerning a (possibly) new science ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 9 (1). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/1/1.html>.
- Deffuant, Guillaume, Gérard Weisbuch, Frédéric Amblard, et Thierry Faure. 2003. « Simple is beautiful... and necessary ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6 (1): 6.
- Descombes, Vincent. 1996. *Les institutions du sens*. Les éditions de minuit.
- Dieguez Cameroni, FJ, R Terra, S Tabarez, Pierre Bommel, Jorge Corral, Danilo Bartaburu, Marcelo Pereira, et al. 2014. « Virtual experiments using a participatory model to explore interactions between climatic variability and management decisions in extensive grazing systems in the basaltic region of Uruguay ». *Agricultural Systems* 130 (C): 89–104.
- Drogoul, Alexis, Diane Vanbergue, et Thomas Meurisse. 2003. « Simulation Orientée Agent: où sont les agents ». In *Actes des Journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*.

- Ducasse, Stéphane. 1997. « Des techniques de contrôle de l'envoi de messages en Smalltalk ». *Revue des Sciences et Technologies de l'Information (RSTI) — L'Objet*, 3, 1997, Hermes édition.
- Durand, Marie-Hélène, et Martine Antona. 2013. « Le très long terme: prévoir, c'est gouverner ». In *Rendre possible: Jacques Weber, itinéraire d'un économiste passe-frontières*. Quae, 181-90.
- Durkheim, Emile. 1897. *Le Suicide, étude de sociologie*. Paris: Felix Alcan.
- Elias, Norbert. 1991. *La société des individus. 1940-1950*. Paris: Fayard.
- Epstein, Joshua M, et Robert Axtell. 1996. *Growing artificial societies: social science from the bottom up*. Brookings Institution Press.
- Erasmus, L, AS Van Jaarsveld, et Pierre Bommel. 2002. « A spatially explicit modelling approach to socio-economic development in South Africa ». In *Proceedings of the International Environmental Modelling and Software Society Conference*, 91-96. Lugano, Switzerland: Eds A.E. Rizzoli, A.J. Jakeman.
- Erceau, Jean. 1995. « Complexité et conception des systèmes complexes, vers une ingénierie des systèmes complexes ». *Séminaire sur la complexité du CP2i* 13.
- Étienne, Michel. 2010. *La modélisation d'accompagnement: une démarche participative en appui au développement durable*. Update Sciences & Technologies. Versailles, France: Editions Quae. <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Nn41w-EGvncC&oi=fnd&pg=PA5&dq=info:OunDChfrCwYJ:scholar.google.com&ots=kSXxsEJ1Ll&sig=y6DG18ZfXSwPk0x0D1W713LLT28>.
- Étienne, Michel, éd. 2011. *Companion Modelling. A Participatory Approach to Support Sustainable Development*. Dordrecht: Springer Netherlands. <http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-8557-0>.
- Farolfi, S, C Le Page, P Bommel, et L Erasmus. 2003. « Evaluating policy options for management of livestock effluents in the Reunion Island using a multi-agent system ». In *25th International Conference of Agricultural Economists*, 21. Durban, South Africa. 16-22 August 2003.
- Ferber, Jacques. 1995. *Les Systèmes multi-agents: Vers une intelligence collective*. InterEditions.
- Ferber, Jacques. 2006. « Concepts et méthodologies multi-agents. » In *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Hermes Science Publications. Paris, France: Amblard F., Phan D.
- Ferber, Jacques. 2007. « Multi-Agent Concepts and Methodologies ». In *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Bardwell Press. Oxford: D. Phan and F. Amblard.
- Ferber, Jacques, et Véronique Guérin. 2003. « Représentations et simulation: de la modélisation à la mise en situation ». *Le statut épistémologique de la simulation*, 85-98.
- Ferber, Jacques, et Jean-Pierre Müller. 1996. « Influences and reaction: a model of situated multiagent systems ». Tokoro, Mario (ed), *Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-agent Systems (ICMAS- 96)*. The AAAI Press, pp. 72-79.
- Friedman, Milton. 1981. « Market Mechanisms and Central Economic Planning ». *American Enterprise Institute for Public Policy Research* Washington, DC.
- Georges, Fanny. 2012. « Avatars et identité ». *Hermès, La Revue* 62 (1): 33-40.

- Giddens Anthony, 1984. *The constitution of society: Outline of the theory of structuration*. Berkeley and Los Angeles: University of California Press.
- Gilbert, G. Nigel. 1996. « Holism, Individualism and Emergent Properties ». In *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*, R. Hegselmann, U. Mueller, et K.G. Troitzsch (eds), Springer. Vol. 23. Theory and Decision Library (Series A: Philosophy and Methodology of the Social Sciences). Dordrecht
- Grimm, Volker. 1999. « Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? » *Ecological Modelling* 115 (2): 129-48. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00188-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00188-4).
- Gurung, Tayan Raj, Francois Bousquet, et Guy Trébuil. 2006. « Companion modeling, conflict resolution, and institution building: sharing irrigation water in the Lingmuteychu Watershed, Bhutan ». *Ecology and Society* 11(2): 36, 2006.
- Guyot, Paul. 2006. « Simulations multi-agents participatives: Faire interagir agents et humains pour explorer, modéliser et reproduire les comportements collectifs. Modélisation et simulation ». Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. HAL (tel-00084064).
- Hales, David, Juliette Rouchier, et Bruce Edmonds. 2003. « Model-to-model analysis ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6 (4).
- Hardin, Garrett. 1968. « The Tragedy of the Commons ». *Science* 162 (3859): 1243-48. <https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>.
- Hayek, Friedrich. 1966. « Lecture on a Master Mind: Dr Bernard Mandeville ».
- Holland, John Henry. 1995. *Hidden orderhow adaptation builds complexity*.
- Horlitz, Thomas. 2007. « The Role of Model Interfaces for Participation in Water Management ». *Water Resources Management* 21 (7): 1091-1102. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9100-9>.
- Janssen, Marco A., François Bousquet, et Elinor Ostrom. 2011. « A multimethod approach to study the governance of social-ecological systems ». *Natures Sciences Sociétés* 19 (4): 382-94.
- Janssen, Marco A., et Elinor Ostrom. 2006. « Empirically based, agent-based models ». *Ecology and Society* 11 (2): 37.
- Jensen, Pablo. 2015. « Les simulations multi-agents, une nouvelle approche du social?. À propos de: Gianluca Manzo (dir.),«La simulation multi-agents: principes et applications aux phénomènes sociaux», Revue française de sociologie, n° 55-4, octobre-décembre 2014. » Lectures, Review Essays. <http://journals.openedition.org/lectures/18393>.
- Lardon, S, C Baron, P Bommel, F Bousquet, C Le Page, R Lifran, P Monestiez, et P Reitz. 1998. « Modéliser les configurations et les stratégies spatiales dans un système multi-agents pour la maîtrise de dynamiques d'embroussaillage ». In *Modeles et systemes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*, 5-8 Oct 1998, 169–185. Clermont-Ferrand, France.
- Lardon, Sylvie, Pierre Bommel, François Bousquet, Christophe Le Page, Thérèse Libourel, Robert Lifran, et Pierre-Louis Osty. 2000. « De la simulation de l'embroussaillage à un outil d'aide à la gestion de l'espace - un modèle de transformations de l'espace. » In *Systèmes multi-agents : Méthodologie, technologie et expériences - JFIADSM 00 - huitième journées*

- francophones d'Intelligence Artificielle et systèmes multi-agents, Saint-Jean-la-Vêtre, Loire, France, October 2-4, 2000, 357-74.
- Lawson, Barry G, et Steve Park. 2000. « Asynchronous time evolution in an artificial society mode ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 3 (1).
- Le Fur, J, et P Bommel. 1998. « Couplage d'un modèle multi-agent de la dynamique d'une ressource marine avec un modèle multi-agent de l'exploitation halieutique artisanale sénégalaise ». Séminaire SMAS, INRA Montpellier.
- Le Moigne, JL. 1977. « La Théorie du Système Général: Théorie de la Modélisation: Presses Universitaires de France ». Paris, France.
- Le Page, Christophe. 2017. « Simulation multi-agent interactive: engager des populations locales dans la modélisation des socio-écosystèmes pour stimuler l'apprentissage social ». Habilitation à Diriger des Recherches, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.
- Le Page, Christophe, Géraldine Abrami, Olivier Barreteau, Nicolas Becu, Pierre Bommel, Aurélie Botta, Anne Dray, Claude Monteil, et Véronique Souchère. 2010. « Des modèles pour partager des représentations ». In *Modélisation d'accompagnement: une démarche participative en appui au développement durable*, Quae, 71–101. Versailles, France: M. Etienne.
- Le Page, Christophe, Géraldine Abrami, Olivier Barreteau, Nicolas Becu, Pierre Bommel, Aurélie Botta, Anne Dray, Claude Monteil, et Véronique Souchère. 2014. « Models for sharing representations ». In *Companion modelling*, 69–101. Springer Netherlands.
- Le Page, Christophe, Géraldine Abrami, Nicolas Becu, Pierre Bommel, Bruno Bonte, François Bousquet, Benoit Gaudou, Jean Pierre Müller, Damien Philippon, et Patrick Taillandier. 2017. « Lessons from implementing in parallel with 3 platforms the same didactic agent-based model ». In *CoMSES Net virtual conference « CoMSES 2017 »*. <https://forum.comses.net/t/session-on-model-reuse/89>.
- Le Page, Christophe, et Olivier Barreteau. 2013. « Quelques élucubrations sur Jacques Weber et la modélisation ». In *Rendre possible: Jacques Weber, itinéraire d'un économiste passe-frontières*, Quae. Indisciplines. Versailles: M. Bouamrane, M. Antona, R. Barbault, M.C. Cormier-Salem.
- Le Page, Christophe, Nicolas Becu, Pierre Bommel, et François Bousquet. 2010. « Participatory Agent-Based Simulation for Renewable Resource Management: The Role of the Cormas Simulation Platform to Nurture a Community of Practice ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 15 (1): 10.
- Le Page, Christophe, Sylvie Lardon, Pierre Bommel, Christian Baron, et François Bousquet. 1999. « Entités spatiales génériques et modèles de simulation multi-agent ». In *JFIADSMA'99*. Vol. Saint-Gilles, La réunion. 8-10 novembre 1999: Hermès.
- Le Page, Christophe, et Arthur Perrotton. 2017. « KILT: A Modelling Approach Based on Participatory Agent-Based Simulation of Stylized Socio-Ecosystems to Stimulate Social Learning with Local Stakeholders ». In , 31-44. Springer International Publishing. São Paulo, Brazil: Sukthankar G., Rodriguez-Aguilar J. A. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71679-4_3.
- Livet, Pierre, Denis Phan, et Lena Sanders. 2014. « Diversité et complémentarité des modèles multi-agents en sciences sociales ». *Revue française de sociologie* 55 (4): 689-729.

<https://doi.org/10.3917/rfs.554.0689>.

- Locher, Fabien. 2013. « Les pâturages de la Guerre froide : Garrett Hardin et la “Tragédie des communs” ». *Revue d'histoire moderne & contemporaine* 60-1 (1): 7-36. <https://doi.org/10.3917/rhmc.601.0007>.
- Magni-Berton, Raül. 2008. « Holisme durkheimien et holisme bourdieusien. Étude sur la polysémie d'un mot ». *L'Année sociologique* 58 (2): 299-318. <https://doi.org/10.3917/anso.082.0299>.
- Manzo, Gianluca. 2007. « Progrès et “urgence” de la modélisation en sociologie. du concept de “modèle générateur” et de sa mise en œuvre ». *L'Année sociologique* 57 (1): 13-61. <https://doi.org/10.3917/anso.071.0013>.
- Manzo, Gianluca. 2014a. « La simulation multi-agents : principes et applications aux phénomènes sociaux ». 55-4, 2014, Les Presses de Sciences Po édition.
- Manzo, Gianluca. 2014b. « Potentialités et limites de la simulation multi-agents : une introduction ». *Revue française de sociologie* 55 (4): 653-88. <https://doi.org/10.3917/rfs.554.0653>.
- Maturana, Humberto R, et Francisco J Varela. 1994. *L'arbre de la connaissance*. Ed. Addison-Wesley France.
- Meadows, D, et D Meadows. 1993. « Fish Banks news, Fish Banks limited and Laboratory for Interactive Learning ». University of New Hampshire: Durham, NH, USA.
- Meadows, Denis, Donella Meadows, Jørgen Randers, et William Behrens. 1972. « The Limits to Growth ». Club of Rome. New York: Universe Books.
- Mellor, Stephen J., et Marc Balcer. 2002. *Executable UML: A Foundation for Model-Driven Architectures*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Melo, Gustavo, Emilie Coudel, et Pierre Bommel. 2014. « What futures for the Amazonian floodplains? A participatory prospective approach of a biodiversity hotspot under economic and climate change ».
- Meurisse, Thomas. 2004. « Simulation multi-agent: du modèle à l'opérationnalisation ». Thèse de Doctorat, Université de Paris 6.
- Michel, Fabien. 2004. « Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents ». Montpellier II, , sciences et techniques du Languedoc.
- Michel, Fabien, Pierre Bommel, et Jacques Ferber. 2002. « Simulation distribuée interactive sous MadKit. » In *JFSMA*, 175–178.
- Michel, Fabien, Abdelkader Gouaich, et Jacques Ferber. 2003. « Weak interaction and strong interaction in agent based simulations ». In , 43-56. Springer.
- Morales Grosskopf, Hermes Morales, Pedro Arbeletche, Pierre Bommel, Julio Cesar Burges, Marcelo Champredonde, Jorge Corral, Jean Francois Tourrand, et others. 2010. « Modeling rangeland management change in Uruguay. » *Cahiers Agricultures* 19 (2): 112–117. <https://doi.org/10.1684/agr.2010.0385>.
- Morand, Bernard. 2000. « Le diagramme : à la périphérie ou au cœur de la cognition ? » In *Rencontres interdisciplinaires sur les représentations graphiques dans les systèmes complexes naturels et artificiels*. Rochebrune, France.

- Mullon, Christian. 2005. « Vers un usage concerté de la modélisation et de la simulation dans les recherches interdisciplinaires ». *Natures Sciences Sociétés* 13 (2): 172-73.
- Neumann, Martin. 2013. « Social Constraint ». In *Simulating Social Complexity: A Handbook*, édité par Bruce Edmonds et Ruth Meyer, 335-64. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-93813-2_14.
- OMG. 2008. « Model Driven Architecture, MDA Guide Version 1.0.1 ».
- OMG. 2017. « Unified Modeling Language Specification v2.5.1 ». <http://www.omg.org/spec/UML/2.0/>.
- Orléan, André. 2004. « What is a collective belief? » In *Cognitive economics*, 199-212. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Ostrom, Elinor. 1990. *Governing the commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge university press. ISBN 978-0-521-40599-7
- Pepper J.W., et Smuts B.B. 2000. « The evolution of cooperation in an ecological context: an agent-based model ». *Dynamics of human and primate societies: agent-based modeling of social and spatial processes*, 2000, Oxford University Press édition, sect. T.A. Kohler and G.J. Gumerman, eds.
- Petitjean, Olivier. 2010. « Les biens communs, modèle de gestion des ressources naturelles ». Passerelle dph no 02, Ritimo, Paris.
- Piaget, Jean. 1968. *Le structuralisme*. PUF.
- Rykiel Jr, Edward J. 1996. « Testing ecological models: the meaning of validation ». *Ecological modelling* 90 (3): 229-44.
- Saltelli, Andrea, Stefano Tarantola, et Francesca Campolongo. 2000. « Sensitivity analysis as an ingredient of modeling ». *Statistical Science* 15 (4): 377-95.
- Schaefer, Milner B. 1954. « Some Considerations of Population Dynamics and Economics in Relation to the Management of the Commercial Marine Fisheries ». *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 14 (5): 669-81. <https://doi.org/10.1139/f57-025>.
- Searle, John R. *The construction of social reality*. Simon and Schuster, 1995.
- Squazzoni, Flaminio, et Niccolò Casnici. 2013. « Is Social Simulation a Social Science Outstation? A Bibliometric Analysis of the Impact of JASSS ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 16 (1): 10. <https://doi.org/10.18564/jasss.2192>.
- Uhnak, Peter, et Pierre Bommel. 2016. « Facilitating the design of ABM and the code generation to promote participatory modelling ». In *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Modelling and Software*, 827-35. Toulouse, France. July 10-14: Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M., Rizzoli, A.E.
- Uhnák, Peter, et Robert Pergl. 2016. « The OpenPonk modeling platform. » In *Proceedings of the 11th edition of the International Workshop on Smalltalk Technologies*, 14. ACM.
- Venturini, Tommaso, Pablo Jensen, et Bruno Latour. 2015. « Fill in the Gap: A New Alliance for Social and Natural Sciences ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 18 (2): 11. <https://doi.org/10.18564/jasss.2729>.

- Voinov, Alexey, et Francois Bousquet. 2010. « Modelling with stakeholders ». *Environmental Modelling & Software, Thematic Issue - Modelling with Stakeholders*, 25 (11): 1268-81. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007>.
- Watzlawick, Paul. 1978. *La réalité de la réalité: confusion, désinformation, communication*. Editions du seuil.
- Weber, Jacques. 1995. « Gestion des ressources renouvelables: fondements théoriques d'un programme de recherche ». In *Rendre possible*, 35-52. Editions Quæ.
- Weber, Jacques, et Denis Bailly. 1993. « Prévoir, c'est gouverner ». *Natures Sciences Sociétés* 1 (1): 59-64.
- Weber, Jacques, Jean-Marie Betsch, et Philippe Cury. 1990. « A l'interface hommes-nature: les ressources renouvelables ». In *Colloque National Recherche et Environnement*, 39-50. CNRS Programme Environnement.
- Weber, Jacques, et Jean-Pierre Revéret. 1993. « Biens communs: les leurre de la privatisation ». *Le monde diplomatique*, no 2: 71-73.
- Zeigler, Bernard P., Herbert Praehofer, et Tag Gon Kim. 2000. *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. Academic Press.