

Mieux prendre en compte le temps dans les simulations individus-centrées

Frédéric Amblard, Nicolas Dumoulin

Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes (LISC)

Cemagref

24, avenue des Landais BP 50085

63172 Aubière Cedex

France

email : frederic.amblard@cemagref.fr

Introduction

Acheter un nouveau téléphone portable, investir dans les actions d'une compagnie, se munir du dernier gadget à la mode, tous ces comportements ont en commun des éléments qui ne sont généralement pas pris en compte dans les modèles classiques de diffusion de l'innovation ou de phénomènes de modes. Ainsi, si l'influence sociale qui entre en jeu au cours de l'adoption de nouvelles innovations ou de nouveaux produits est souvent introduite, soit en appliquant simplement une règle de majorité sur le voisinage social (Galam, 1997) soit en modélisant directement les interactions entre individus (Deffuant et al., 2002), classiquement ces modèles de simulation utilisent une mise à jour aléatoire des individus en suivant une loi uniforme sur l'ensemble des individus. Cette approximation néglige cependant des dynamiques spécifiques aux phénomènes considérés pour lesquels l'influence de la temporalité et sa prise en compte dans le modèle n'est pas neutre.

Cependant, il nous faut convenir que les hypothèses simplificatrices réalisées sur le temps dans les simulations individus-centrées sont souvent justifiées en première approximation. En effet, la réduction du modèle du temps à des activations aléatoires résulte souvent d'une difficulté à prendre en compte le facteur temps dans les simulations. Cette difficulté provient selon nous en partie de la difficulté d'obtenir des données temporelles, longitudinales, sur le système réel, en particulier en sociologie. Il est donc alors pertinent, selon nous, de se baser sur une hypothèse minimale qui consiste à conserver uniquement une relation d'ordre entre les activations des individus dans le modèle ou une relation d'ordre entre leurs changements d'état.

Cependant, si l'on positionne la discussion par rapport aux démarches de modélisation au sens de construction de modèles, et en particulier par rapport aux démarches de modélisation incrémentales, il nous semble que si l'amélioration de certains éléments du modèle (au sens d'augmentation du réalisme, de la complexité ou de diminution de l'abstraction), comme celui de l'agent, des interactions ou de l'environnement est souvent réalisée, ce n'est que rarement le cas du modèle du temps dans ces modèles. On assiste ainsi fréquemment à des constructions incrémentales de modèles qui parviennent à des modèles finaux de complexité

relativement élevée mais qui pourtant conserve une gestion du temps très élémentaire, voir simpliste.

La thèse que nous défendrons ici concernera donc la prise en compte de la complexité des modèles du temps dans les méthodes de construction incrémentales de modèles. Nous nous focalisons sur la fréquence des événements envisagée à différents niveaux, plutôt que sur la représentation de la temporalité par les entités du modèle elles-mêmes. Pour ce faire, nous présenterons tout d'abord une de ces méthodes, DAMMASS (Amblard et al., 2001), en proposant d'intégrer le modèle du temps dans la boucle de modélisation. Dans une seconde partie, nous exposerons les problèmes classiques de sa représentation et de sa gestion dans les simulations, puisque quelle que soit l'option de modélisation retenue, le temps sera formalisé sous l'une de ces formes. Et, nous présenterons trois pistes possibles pour représenter le temps de manière plus réaliste. Le premier exemple concernera le passage d'un modèle de jeu coopératif synchrone à une désynchronisation des événements dans le modèle. Les individus doivent alors adopter des stratégies prenant en compte une forme de stratégie temporelle. Le deuxième exemple se focalisera sur la temporalité des interactions dans des modèles de simulation sociale individus-centrés incluant un réseau social. Les relations deviennent ici des entités structurantes de la temporalité, en leur associant des fréquences d'interactions qui contraignent l'émergence de comportements collectifs. Notre dernier exemple concernera la gestion par l'individu au sein du modèle de sa temporalité, dans le cadre d'un modèle de diffusion de l'information dont la propagation est progressivement amortie au cours du temps. Nous discuterons enfin ces trois exemples dans le cadre de la méthodologie de construction de modèles incrémentale ainsi que l'extension de ces idées à d'autres domaines ou d'autres modèles.

Méthode de construction incrémentale de modèles individus-centrés

Décomposition des modèles sociaux

La modélisation de systèmes complexes peut impliquer la construction de modèles computationnels complexes. La gestion de cette complexité aussi bien dans la conception du modèle qu'au cours de son implémentation en utilisant des méthodes de modélisation efficaces (Overstreet, 1982 ; Zeigler et al., 2000) reste un défi encore à l'heure actuelle. Si ces dernières étaient mises au point dans le passé pour surpasser les faibles puissances computationnelles, les méthodologies sont utilisées maintenant pour affronter la complexité computationnelle et proposer des modes de construction qui permettent de l'organiser.

Une taxonomie pour la modélisation des systèmes a été introduite dans la terminologie multi-modèles dans le milieu des années 80 (Ören, 1984) et la technique appelée multi-modélisation dérive principalement des approches multi-formalismes (Zeigler, 1979). Un multi-modèle est considéré comme une

composition de différents sous-modèles homogènes ou hétérogènes à plusieurs niveaux d'abstraction. Cette approche permet la construction de modèles hiérarchiques de systèmes réels qui ne peuvent pas être simulés facilement en utilisant une approche monolithique (Fishwick, 1995). Malgré cette abondance il y a actuellement un besoin pour la conception de frameworks qui distinguent clairement les différentes parties du modèle. Les frameworks sont vus comme des macro-architectures logicielles, alors que les patrons de conception (Gamma et al., 1995) peuvent être envisagés comme des micro-architectures. Nous proposons ici l'hypothèse que le modèle de simulation individu-centré correspond à une collection de sous-modèles. Chacun d'entre eux peut refléter différentes hypothèses émises à propos des individus, des processus d'interactions, de l'environnement ou des organisations. Dans ce cadre, le réductionnisme peut nous aider comme outil méthodologique pour concevoir des classes d'entités dans un modèle. Les principales classes dans le cadre de la modélisation de systèmes sociaux que nous avons identifiées sont l'Agent, la Relation, l'Environnement et l'Organisation. Ils sont envisagés récursivement comme des sous-modèles et dans ce sens peuvent être composés de plusieurs sous-modèles (cf. Fig. 1).

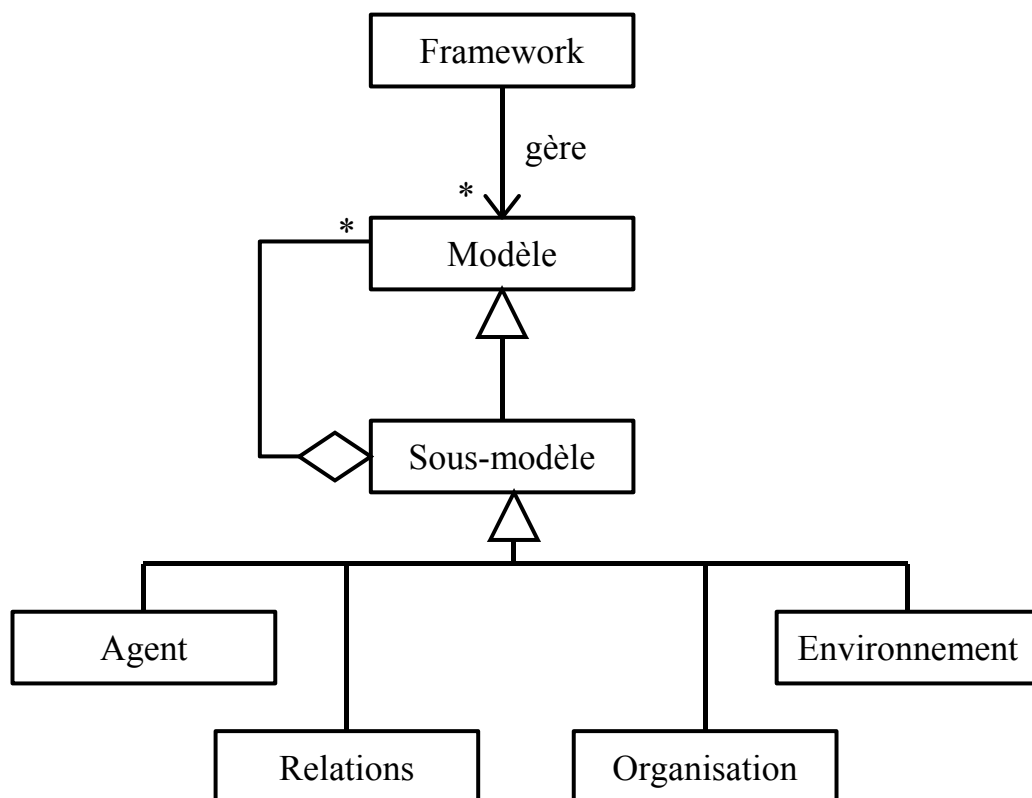


Fig. 1. Méta-modèle UML du framework

Modèles généraux, modèles spécifiques et collections de modèles

La principale source de complexité que nous avons isolée dans la littérature en modélisation des systèmes sociaux provient d'une part de l'émergence d'effets

collectifs non spécifiés explicitement lors de l'élaboration des comportements individuels et d'autre part de la diversité des causes qui peuvent conduire à cette émergence. Face à cette contrainte pour modéliser ces systèmes, les chercheurs ont deux formes d'approches. D'une part, certains vont construire des modèles très simples, motivés par l'observation de propriétés émergentes à partir de caractéristiques particulières du comportement des individus par exemple la coopération, la ségrégation ou l'influence (Schelling, 1960 ; Axelrod, 1997). D'autre part, certains construisent des modèles spécifiques, dans le but de comprendre un phénomène social spécifique dans un contexte d'étude donné et essayent de le faire correspondre à l'expertise ou aux données collectées. Le but du modélisateur, qui est de modéliser un phénomène social général ou de l'appliquer à un système social spécifique, permet de situer le modèle réalisé dans une des deux catégories. Récemment, un courant de plus en plus observé tend à la réalisation de modèles qui sont des collections de modèles (Epstein et Axtell, 1996 ; Axelrod, 1997). En partant de modèles très simples, on ajoute des propriétés de manière incrémentale pour capturer de plus en plus de propriétés du système social modélisé. Par conséquent, les modèles croissent de plus en plus en complexité computationnelle. Il y a dès lors besoin d'un framework qui ne prend pas comme point de départ la réalisation d'un modèle isolé mais qui aide le processus de modélisation en permettant la manipulation de l'ensemble des modèles composant le processus de modélisation.

Couplage de l'approche Vowels et de l'abstraction décroissante

La décomposition en plusieurs parties, pour qu'elle soit compréhensible et incluse efficacement dans le processus de modélisation, doit être réalisée en suivant un framework général qui organise les sous-modèles. Dans ce cadre, nous utiliserons l'approche VOWELS (Demazeau, 1995). Par comparaison avec d'autres frameworks qui se focalisent souvent sur la conception de l'agent et de plusieurs niveaux d'organisations (Ferber et Gutknecht, 1998), la méthodologie VOWELS est principalement caractérisée par l'usage primitif, récursif et égal des sous-modèles d'Agents, d'Environnement, d'Interactions et d'Organisations pour résoudre des problèmes ou simuler des systèmes.

Comme cette approche nous donne un cadre pour décomposer un modèle donné, nous devons définir un processus de modélisation associé qui permet les étapes classiques en simulation, à savoir la conception, l'implémentation, la vérification et la validation (Kleijnen, 1995 ; Balci, 1998). De plus, parce que nous croyons qu'une famille de modèles est plus riche en informations pour le modélisateur qu'un seul, le processus de modélisation doit expliciter le moyen de passer d'un modèle à l'autre en suivant la croissance en complexité et la décroissance en abstraction. Pour le processus de modélisation nous avons alors choisi la méthodologie d'abstraction décroissante (Lindenberg, 1992). Nous commençons ainsi par des modèles simples mais abstraits représentant des caractéristiques

générales puis nous y ajoutons des propriétés pour modéliser des phénomènes plus réalistes. Le point final du processus est un modèle aussi complexe que nécessaire, mais aussi simple que possible.

Cette approche permet de valider de manière plus sécurisée le modèle final, car elle fournit une description plus complète du système réel, à différents grains. Le premier modèle simple nous permet de comprendre les propriétés dynamiques basiques du modèle. Nous les faisons correspondre avec des propriétés générales provenant par exemple de la littérature sociologique, en définissant une similarité entre la structure du système réel et la structure du modèle. La granularité du modèle est alors augmentée progressivement jusqu'à ce que le modèle semble trop détaillé par rapport aux données observées sur le système modélisé.

DAMMASS

De manière à se conformer aux conditions énoncées ci-dessus, nous retenons une architecture de framework dérivée du fameux patron de conception MVC (Model View Controller) divisée en trois parties. Le Simulateur gère tous les points concernant l'exécution du modèle. La partie Modèle détaillée ci-dessous contient toutes les classes concernant le modèle lui-même. L'interface permet à l'utilisateur de paramétrer le Simulateur et le Modèle indépendamment, pour observer la simulation en cours d'exécution et ses résultats.

En appliquant l'abstraction décroissante énoncée précédemment, nous pouvons, à partir d'un modèle donné, faire décroître son abstraction pour accroître son réalisme suivant un (ou plusieurs) de ces quatre axes :

- *Le modèle de l'Agent* : les propriétés internes de l'individu, comme son système de représentation ou son système décisionnel, peuvent être plus détaillées, de nouveaux comportements peuvent être ajoutés au modèle de l'agent.

- *Le modèle de Relation* : les interactions qui ont lieu entre les entités peuvent être détaillées davantage. Cela peut concerner les échanges entre deux entités ou un protocole de communication plus détaillé. En fait, nous pourrions considérer qu'il y a autant d'axes Relation pour accroître le réalisme qu'il y a de relations possibles entre les différentes catégories d'entités.

- *Le modèle d'Organisation* : il implique une croissance des caractéristiques prises en compte par l'organisation, par exemple l'introduction de niveaux d'organisation dans une organisation existante ou de nouveaux comportements de groupes dans un modèle.

- *Le modèle de l'Environnement* : la croissance en réalisme doit correspondre à l'ajout de critères environnementaux et à leur dynamique.

L'impression d'indépendance entre ces axes peut être cependant trompeuse. Cette décomposition implique de toute évidence certaines dépendances entre les axes. Par exemple, nous identifions un couplage majeur entre le modèle d'agent et le modèle de relation en ce sens qu'augmenter la granularité du modèle d'interaction implique souvent d'augmenter la granularité du modèle d'agent. Malgré tout, ce

n'est pas toujours le cas et l'accroissement en complexité du modèle d'interactions peut parfois être un changement de la structure du modèle de cette influence. Nous pouvons par exemple partir d'une influence moyenne du voisinage social de l'individu et progresser vers un modèle d'interactions à seuil dans lequel les individus seront influencés par leurs voisins seulement si la différence entre leurs opinions est inférieure à un seuil donné qui est un attribut de l'interaction. Nous accroissons alors le réalisme du modèle d'interactions tout en laissant inchangés les attributs d'un modèle d'agent. Remarquons ici que nous avons pour l'instant éludé la question du temps dans les simulations, question que nous allons maintenant traiter.

Problématique du temps dans les simulations

La problématique du temps dans les modèles de simulation est loin d'être une préoccupation récente puisqu'elle pourrait être associée aux débuts de l'utilisation de la simulation comme outil de modélisation et plus seulement comme outil de résolution numérique. Ainsi, si l'on suit la définition de Coquillard et Hill (1997), « *la simulation est l'abstraction d'un système plongé dans le temps* ». Le temps faisant ainsi partie de cet objet, il s'agit bien de le prendre en compte et d'explicitier cette composante. Par la suite les utilisateurs de la simulation ont distingué clairement deux aspects de la temporalité dans les simulations : la représentation du temps qui correspond au modèle conceptuel et la gestion effective du temps dans le modèle qui correspond à son implémentation.

La représentation du temps

Concernant la représentation du temps dans les simulations individus-centrées, nous retrouvons les représentations classiques utilisées dans le domaine de la simulation en général. Ainsi, nous distinguons trois types de représentations :

- *Le temps continu*, la variable représentant le temps dans la simulation est alors un nombre réel et l'état du système peut être défini quelle que soit sa valeur.

- *Le temps discret*, la variable représentant le temps étant un entier, les états du système sont définis pour chacune de ses valeurs et la représentation de l'évolution du système correspond à une fonction constante par morceaux.

- *L'approche évènements discrets* (Zeigler et al., 2000) se focalise sur l'occurrence des évènements dans la simulation plutôt que sur le temps directement.

Cependant, le plus souvent, et particulièrement en simulation sociale, le temps n'est pas une dimension sur laquelle le modélisateur peut travailler avec précision. Il peut être difficile, par exemple, d'évaluer la date d'occurrence de la prochaine rencontre entre deux personnes ou même d'émettre des hypothèses quant à celle-ci. Pour résoudre ce problème de la temporalité du système modélisé, la solution communément adoptée est de prendre des hypothèses minimales et donc de se baser uniquement sur une relation d'ordre temporelle entre les états du système

plutôt que sur une véritable gestion du temps dans la simulation. Il en résulte ainsi fréquemment une utilisation de l'approche temps discret.

La gestion du temps

La représentation du temps dans les simulations sociales peut ainsi être ramenée dans tous les cas à une relation d'ordre temporelle entre les états du système. Deux éléments sont cependant déterminants pour caractériser la manière dont ce temps est géré dans ces modèles. Il s'agit d'une part de l'activation ou du scheduling : le moyen par lequel les individus ou les entités sont activés ; et d'autre part de la mise en relation des individus qui correspondrait davantage à la cardinalité de l'interaction, au nombre d'éléments qui entrent en jeu au cours de l'interaction.

L'activation est un point important dans les modèles de simulation individu-centrée. Le mécanisme ou la technique d'activation retenue influence beaucoup les sorties du modèle (Axtell, 2000 ; Lawson et Park, 2000). En considérant la manière dont le modélisateur représente le temps dans son modèle, nous distinguons classiquement deux principales catégories (Coquillard et Hill, 1997) pour le gérer.

Concernant l'*approche événements discrets* la date d'occurrence des événements dans la simulation est généralement calculée au cours de la simulation et les événements sont souvent ordonnés dynamiquement en fonction de cette date dans un échancier. Les problèmes de concurrence entre événements sont résolus en général par l'utilisation d'une fonction de résolution de conflits au sein d'un noyau de synchronisation. Si nous considérons maintenant l'*approche temps discret* dite également « par horloge », nous pouvons distinguer différentes manières de gérer l'activation des entités du modèle :

- L'*activation synchrone ou activation avec double buffering* (Travers, 1996), correspond à une mise à jour en deux passes de l'état des individus. La première passe correspond au calcul de l'état suivant de chaque individu de la population, la mise à jour n'étant pas effectuée mais stockée dans des variables temporaires. La deuxième passe correspond à la mise à jour des nouveaux états pour chacun des individus.

- L'*activation asynchrone* correspond à une mise à jour en une passe où chaque individu est sélectionné aléatoirement, la mise à jour calculée et effectuée. Concernant l'activation asynchrone, plusieurs méthodes de sélection d'un individu peuvent être mises en place :

- L'*activation asynchrone simple*, utilisée par exemple dans Epstein et Axtell (1996), consiste à tirer aléatoirement un individu à chaque pas de temps (ou itération) et à le mettre à jour ensuite. Comme souligné par Michel et al. (2001) cette méthode permet d'éviter le problème de la gestion de la concurrence entre les événements.

- L'*activation n-asynchrone* est utilisée pour introduire la contrainte qu'à chaque pas de temps, tous les individus doivent avoir été activés une fois et une seule. Elle consiste, à chaque itération, à activer un par un tous les individus

aléatoirement dans une liste tout en construisant la liste des individus pour la prochaine itération. Chaque individu étant mis à jour juste après son activation.

Intégration d'un modèle du temps à DAMMASS

Si l'objet conceptuel qui représente le temps (souvent unique et commun à tous les individus du modèle) dans les simulations possède un aspect computationnel qui sera implémenté suivant une des stratégies exposées précédemment et qui correspondra à une des représentations du temps énoncées, peu de modèles intègrent un aspect temporel qui serait plus élaboré au sein des processus. Et pourtant, les processus temporels à l'œuvre dans le système modélisé entrent souvent en ce qui concerne la représentation du temps, en contradiction profonde avec le modèle. Il est donc pertinent d'inclure dès lors le modèle du temps comme une direction supplémentaire dans le framework de construction incrémentale de modèle pour approcher davantage le système réel. Si l'on se base donc sur un premier niveau de complexité concernant le modèle du temps et qui correspondrait à un modèle du temps représenté comme un temps discret et géré sous la forme d'un scheduling asynchrone à partir d'une distribution uniforme, il est pertinent de s'interroger sur les directions à prendre pour « complexifier » le temps dans les modèles. De manière à se diriger vers une réponse à cette question, nous allons aborder brièvement trois exemples particuliers dans lesquels nous avons investigué différents modèles du temps.

Exemple de la désynchronisation des jeux coopératifs

Dans le très classique dilemme du prisonnier itéré (Von Neuman et Morgenstern, 1947), une hypothèse des plus surprenante est réalisée pour son application à la modélisation de problèmes de coopération : le fait que les décisions des joueurs sont synchronisées (chaque joueur prend la décision de coopérer ou non en parallèle) et qu'elles sont de plus équilibrées (en fin de jeu chaque joueur aura eu le même nombre d'opportunités de coopérer ou pas). Les stratégies qui peuvent être mises en place par les joueurs au cours de ce jeu sont dès lors biaisées par ce synchronisme et cet équilibre des opportunités. Celles-ci correspondent la plupart du temps à des stratégies de type stimulus-réponse (éventuellement avec mémoire) à des décisions prises par les autres joueurs au cours des itérations précédentes.

Le cas de la coopération chez les vampires (Wilkinson, 1990) nous offre une piste intéressante pour nourrir le débat sur ces limitations. Chez *desmodus rotundus* (notre vampire) la principale source de nourriture est le sang que les vampires puisent auprès de troupeaux au cours de séances de chasse nocturnes. Ces chasses ne sont pas toujours fructueuses, et le taux d'échec est particulièrement élevé chez les plus jeunes. Pour compenser cette variabilité du succès à la chasse, un comportement observé consiste à régurgiter le sang collecté aux vampires qui en réclament. Dugatkin (1997) analyse ce phénomène volontariste comme un exemple particulièrement saillant de la coopération chez les animaux. A l'aide de cet

exemple, nous pouvons ainsi décomposer le problème de la coopération dans ce cadre comme la succession des éléments suivants : une mise en situation de demande (l'échec à la chasse), la demande de coopération (le choix du partenaire et la formalisation) et la réponse du partenaire sélectionné (l'acceptation ou le refus). Cette décomposition et plus particulièrement le fait d'envisager la coopération comme étant un élément généré de manière exogène sous la forme d'un besoin nous amène à considérer des stratégies de coopération de type différent. En particulier lorsque le besoin est généré sous la forme d'une contrainte externe qui peut potentiellement s'appliquer à l'ensemble de la population (le destin qui frappe) sous la forme d'une probabilité p d'être mis en situation de besoin et donc de demander de l'aide. L'élément majeur de cette approche tient dans le fait qu'un joueur peut être mis en situation de décider de coopérer ou non plusieurs fois de suite sans que son *alter ego* ait l'occasion de lui rendre la pareille. Comment ou jusqu'où dans ce cas décider de coopérer ? La classe de stratégies que nous avons examinée dans ce cas (Dumoulin, 2002) sont des stratégies d'investissement dans la coopération, qui correspondent à un nombre critique N_d de demandes que le joueur tolère et pour lesquelles il accepte de coopérer avant de pouvoir rendre la pareille. Les cas extrêmes $N_d = \infty$ et $N_d = 0$ correspondant aux stratégies aveugles qui existent également dans le cas synchronisé de toujours accepter et toujours refuser. Un autre élément important du modèle est le nombre d'individus N_i auprès desquels un individu en situation de demande peut effectuer sa demande de coopération à chaque itération.

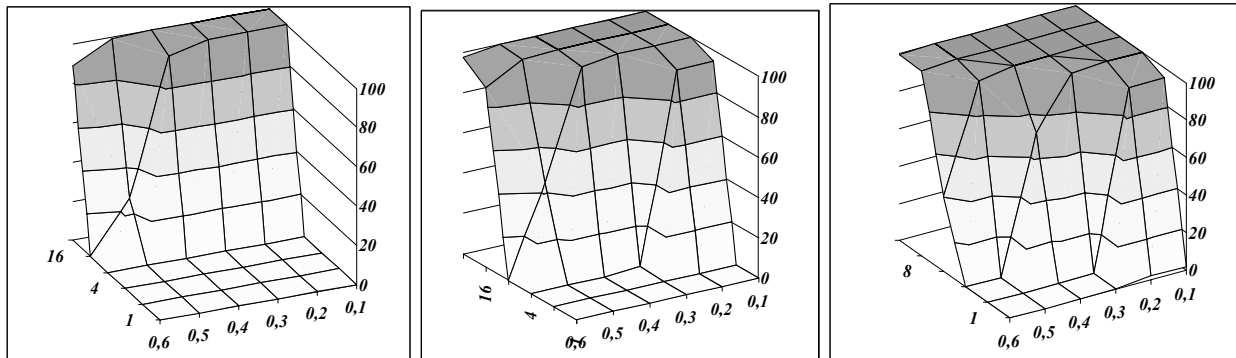


Fig. 2. Taille moyenne de la population finale (10000 itérations) sur 30 répliques en fonction de p variant de 0.1 à 0.6, N_i variant de 1 à 32 par puissance de 2, de gauche à droite pour $N_d=1$, $N_d=5$ et $N_d=10$.

Aussi, dans ce cas, nous observons que la modification de la gestion du temps, qui a entraîné des modifications dans les processus de décision des individus, permet d'identifier de nouveaux types de stratégies non pertinentes dans le cas de décisions synchrones. Ce cas de complexification du modèle du temps a été porteur à notre sens de nouvelles connaissances sur le système réel envisagé.

Exemple de l'affectation de fréquences aux interactions sur réseau

Dans le cadre de la modélisation de processus d'interactions entre individus dans un système social, une hypothèse plus réaliste (bien que correspondant à un grain de modélisation plus fin) consiste non pas à activer des individus ou des relations à partir d'une loi uniforme, mais plutôt pour prendre en compte des probabilités de rencontres hétérogènes qui peuvent jouer un rôle important dans le modèle, d'associer des fréquences de rencontres aux relations entre individus. Nous allons présenter ici le cas où ces fréquences d'interactions dépendent d'un espace social sous-jacent.

Notre problématique est dans ce cadre de reconstruire à partir d'un espace social dans lequel nous parvenons à localiser chacun des individus du modèle, le réseau social sous-jacent en appliquant un algorithme stochastique dépendant de la proximité entre individus dans cet espace pour la création des liens et l'introduction de fréquences d'interactions à ces derniers. Ce modèle a été proposé dans le cadre de la modélisation de l'adoption de mesures agri-environnementales par des agriculteurs (Deffuant, 2001). Les enquêtes de terrain réalisées au cours de ce projet ont permis de distinguer deux types principaux d'interactions : les interactions de voisinage, d'une fréquence de l'ordre de la semaine et les interactions professionnelles qui ont lieu au cours d'évènements professionnels à des fréquences plus faibles.

Ainsi pour prendre en compte cet élément important provenant des enquêtes, nous avons distingué dans le modèle de réseau social les relations suivantes :

- Les *liens de voisinage* qui connectent deux agriculteurs habitant à proximité, les interactions de voisinage ayant lieu au cours du travail quotidien ont une fréquence de l'ordre de une à quelques interactions par semaine.

- Les *liens professionnels* qui connectent avec des probabilités plus élevées des agriculteurs qui ont des systèmes de production similaires. Les interactions ont lieu typiquement au cours de rencontres professionnelles et leur fréquence est typiquement de l'ordre de une interaction par mois.

- Les *liens aléatoires* qui connectent des agriculteurs séparés par une distance plus grande. Ces liens peuvent être établis pour de nombreuses raisons (anciens voisins, anciens collègues, amis, famille...) et possèdent un caractère aléatoire. En considérant que ces liens correspondent à des distances plus élevées, la fréquence des contacts est plus faible que pour les précédents.

Nous avons adapté les algorithmes proposés par (Watts, 1999) pour générer ces réseaux sociaux. Les paramètres nécessaires à leur construction sont :

- La connectivité moyenne au voisinage : n_l
- La distance maximum pour les liens de voisinage : d_l
- La connectivité moyenne des liens professionnels : d_p
- La relation d'équivalence pour les liens professionnels : $\pi(i, j)$
- La connectivité moyenne des liens aléatoires : n_o
- Les fréquences associées à chaque type de liens : f_b, f_p et f_o .

Soit N le nombre d'agriculteurs, l'algorithme de génération du réseau social inclut les étapes suivantes : Pour le réseau de voisinage nous considérons tous les couples d'agriculteurs (i, j) tels que la distance entre les agriculteur F_i et F_j soit inférieure à d_l . Nous choisissons alors aléatoirement $n_l * N$ couples parmi ceux-ci auxquels nous associons donc une relation de fréquence f_l .

Pour le réseau professionnel, le réseau est construit à partir d'une relation d'équivalence $\pi(i, j)$, qui inclut des critères économiques. Pour chaque couple d'agriculteurs i et j , $\pi(i, j)$ est *vrai* s'ils ont un système de production identique. Dans chaque classe d'équivalence, nous choisissons alors aléatoirement $n_p * n_{ci}$ liens (n_{ci} étant le nombre d'agents dans la classe d'équivalence i), auxquels nous associons la fréquence f_p .

Pour le réseau aléatoire, nous choisissons simplement $N * n_o$ couples d'agriculteurs dans la population auxquels nous associons la fréquence f_o .

Il nous faut préciser que si un couple d'individus est sélectionné dans différentes catégories (réseaux multiplexes), nous associons la somme des fréquences correspondantes aux différents types de liens au nouveau lien créé.

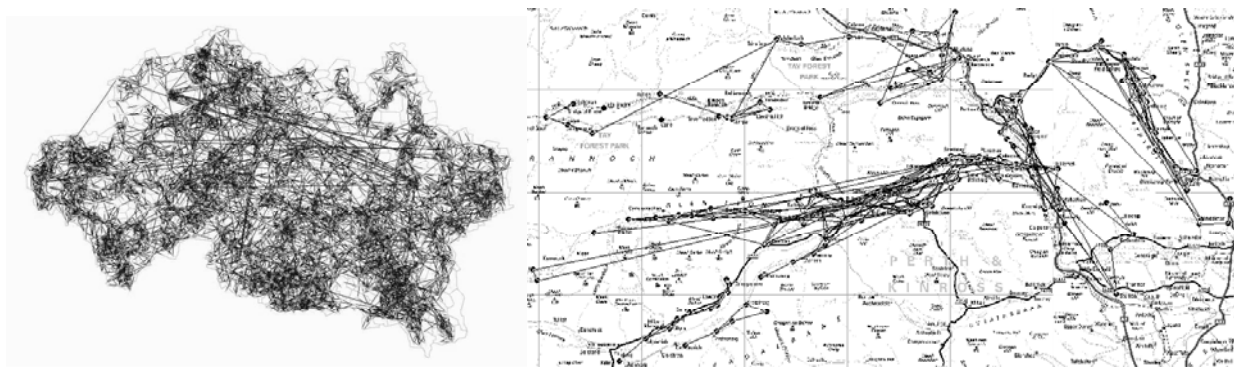


Fig. 3. Exemples de réseaux générés à gauche pour le département de l'Allier (France) et à droite pour la zone de Breadalbane (Ecosse).

Comme exposé précédemment, ce modèle prend explicitement en compte et à un niveau d'abstraction relativement élevé, l'hétérogénéité temporelle des interactions révélées par les enquêtes. Si nous revenons maintenant au modèle, une fois le réseau social généré, (il s'agit dans le cas présent d'un réseau statique), la méthode de gestion du temps retenu pour cette simulation est relativement différente des méthodes classiques puisque nous n'activons pas des agents ou des individus dans la simulation, mais nous sélectionnons aléatoirement des relations du réseau social construit en fonction des fréquences associées à chaque lien. Ainsi ce que l'on pourrait appeler une *activation asynchrone par fréquence d'interaction* est sans doute moins généralisable que les approches classiques présentées précédemment, mais peut être considérée comme intermédiaire entre l'approche à événements discrets et l'approche temps discret. Une relation (un lien du graphe) étant sélectionnée aléatoirement de manière biaisée en fonction des fréquences d'interactions précédemment définies, l'interaction correspondante est alors

réalisée. De manière générale ce type de modèle permet non seulement d'intégrer des différences temporelles (au sens de fréquences de rencontres) au sein du modèle mais également si l'on utilise des algorithmes classiques en théorie des graphes ou en analyse des réseaux sociaux, de prendre en compte au niveau global des notions de flux d'informations privilégiés ou de débits d'information plus ou moins grands suivant les liens considérés et donc une hétérogénéité à ce niveau.

Amortissement de la diffusion de l'information, l'effet « *Scoop* »

Dans les simulations de diffusion de l'innovation classiques, les états individuels sont mis à jour aléatoirement de manière asynchrone. Nous proposons une fonction mathématique simple pour représenter la dynamique de propagation des discussions au sujet d'une innovation particulière. Le modèle repose sur deux variables affectées à chaque individu :

- La proportion de son réseau social avec laquelle il veut discuter,
- La proportion de son réseau avec laquelle il a déjà discuté.

Quand un individu reçoit une information, nous considérons que la proportion de son réseau avec laquelle il veut discuter est $1 - \gamma$. A chaque itération, il discutera de l'innovation avec certains individus de son réseau et la proportion de son réseau avec laquelle il a déjà discuté est alors modifiée en proportion. Il cesse de parler de la mesure dès que les deux nombres sont égaux.

On associe alors aux individus avec lesquels il a discuté, une proportion de réseau avec laquelle ils veulent discuter de l'information de $1 - 2\gamma$. Les individus suivants auront une proportion de $1 - 3\gamma$, ainsi de suite jusqu'à $1 - k\gamma \leq 0$.

Pour comprendre la règle mathématique, on doit imaginer un individu quand il reçoit une information. Il veut alors discuter avec $1 - \gamma$ de son réseau. Chaque fois qu'il interagit avec un autre individu, il parle de l'innovation et donne à son interlocuteur l'envie de faire de même avec une proportion inférieure de γ de son réseau (cf. Fig. 4). Cela signifie que γ contrôle la profondeur de propagation des discussions quand un événement, une information parvient à un individu. Cette profondeur d de propagation est donnée par :

$$d = E\left(\frac{1}{\gamma}\right) \text{ où } E(x) \text{ est la partie entière de } x.$$

Ce modèle a pour but de représenter plus particulièrement la diffusion de discussions quand un individu particulier est exposé aux médias ou à des messages d'ordre institutionnels (Deffuant, 2001). Un point important est que la propagation de la discussion peut également être lancée par un individu de sa propre initiative par exemple lorsqu'il adopte l'innovation.

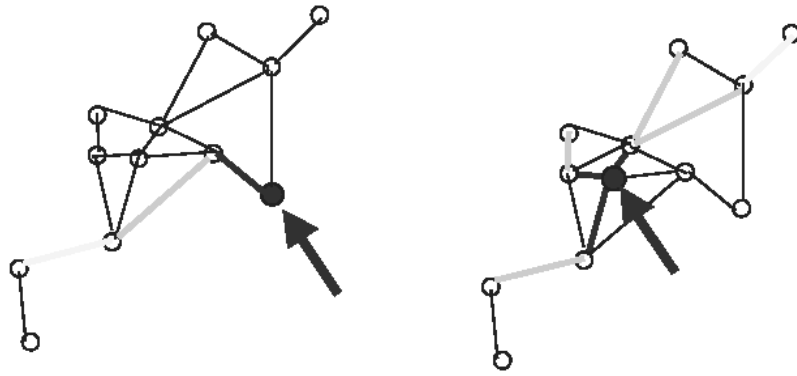


Fig. 4. Deux exemples de propagation des discussions pour $\gamma = 0.2$ dans le même réseau. Les nœuds du graphe représentent les individus et les liens correspondent à leurs relations. La flèche noire indique l'individu qui reçoit le premier l'information. Les dégradé de gris sur les liens de taille plus importante représentent la diffusion progressive de la discussion. Nous pouvons voir ici l'influence de la position de l'individu dans le réseau sur la diffusion. Dans le cas de gauche, le nombre total de discussion est 3, dans celui de droite il est de 8.

Conclusion

Notre point de discussion principal n'est pas une critique à proprement parler des hypothèses simplificatrices réalisées sur le temps dans les simulations individus-centrées. La réduction de celui-ci à des activations aléatoires à partir d'une distribution uniforme résulte souvent d'une difficulté à prendre en compte le facteur temps dans les simulations. Il est donc souvent pertinent en première instance de se baser sur une hypothèse minimale qui consiste à conserver uniquement une relation d'ordre entre les activations des individus dans le modèle. Notre contribution ici se résumerait plutôt à des propositions pour aller un peu plus loin. Nous avons proposé en effet ici trois exemples différents d'intégration du temps dans des modèles qui restent à un haut niveau d'abstraction. Ainsi, en prenant un peu de recul par rapport aux démarches de modélisation et en particulier aux démarches de modélisation incrémentales, il nous semble que si la croissance en complexité de certains éléments du modèle, comme celui de l'agent, des interactions ou de l'environnement sont souvent pris en compte, ce n'est que rarement le cas pour les modèles du temps et l'on assiste fréquemment à des constructions incrémentales de modèles qui parviennent à des modèles finaux de complexité relativement élevée en ce qui concerne les composants mais qui pourtant conservent une gestion du temps très élémentaire, voir trop simpliste. Il s'agirait donc de proposer d'introduire le temps dans les méthodologies de construction incrémentale de modèles comme DAMMASS (Amblard et al., 2001) par exemple.

Références

- Amblard, F., Ferrand, N. et Hill, D.R.C., 2001. "How a conceptual framework can help to design models following decreasing abstraction", in *Proceedings of 13th SCS-European Simulation Symposium*, Marseille, France, octobre 2001, pp.843-847.

- Axelrod, R., 1997. *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton University Press.
- Axtell, R., 2000. "Effects of Interaction Topology and Activation Regime in Several Multi-agent Systems." in *Multi-agent based simulation*. S.Moss et P.Davidsson (eds.), Springer, p.33-48.
- Balci, O., 1998. "Verification, Validation, and Testing", dans *Handbook of Simulation*, J.Banks (ed.), John Wiley and Sons, pp.335-393.
- Coquillard, P. et Hill, D.R.C., 1997. *Modélisation et Simulation des Ecosystèmes*, Masson.
- Deffuant, G., 2001. "Improving Agri-environmental Policies: A Simulation Approach to the Cognitive Properties of Farmers and Institutions", Final report of project FAIR 3 CT 2092. <<http://www.lisc.clermont.cemagref.fr/Images/Project/freport.pdf>>.
- Deffuant, G., Amblard, F., Weisbuch, G. et Faure, T., 2002. « How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model », *JASSS*, vol. 5, n°4.
- Demazeau, Y., 1995. "From interactions to collective behaviour in agent-based systems", dans *Proceedings of the 1995 European Conference on Cognitive Sciences*, Saint-Malo, France.
- Dumoulin, N., 2002. "Modélisation d'une colonie de chauves-souris vampires en vue de réaliser une application ludo-éducative », mémoire de Maîtrise d'Informatique, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Dugatkin, L.A., 1997. *Cooperation among animals: An evolutionary perspective*. Oxford University Press.
- Epstein, J. et Axtell, R., 1996. *Growing Artificial Societies, Social Science from the bottom up*, MIT Press.
- Ferber, J. et Gutknecht, O., 1998. "A Meta-Model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems", dans *Proceedings of the 1998 International Conference on Multi-Agent Systems*.
- Fishwick, P.A., 1995. *Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds*, Prentice Hall.
- Galam, S., 1997. "Rational Group decision making: A random field Ising Model at T=0", *Physica A*, vol. 238, pp.66-80.
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R. et Vlissides, J., 1995. *Design Pattern – Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley.
- Kleijnen, J.P.C., 1995. « Verification and validation of simulation models », *European Journal of Operational Research*, vol.82, pp.145-162.
- Lawson, B.G. et Park, S., 2000. « Asynchronous time evolution in an artificial society mode », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 3, n°1.
- Lindenberg, S., 1992. „The method of decreasing abstraction”, dans *Rational Choice Theory: Advocacy and Critique*, J.S.C.T.J.Fararo (ed.), Sage Publications, pp.3-20.
- Michel, F., Ferber, J. et Gutknecht, O., 2001. « Generic Simulation Tools based on MAS Organization » in *Proceedings of Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, 10th European Workshop on Multi-Agent Systems*, Annecy, Suisse, May 2001.
- Ören, T.I., 1984. "Model-Based Activities: A Paradigm Shift", dans *Simulation and Model-Based Methodologies: An Integrative View*, T.I.Ören, B.P.Zeigler et M.S.Elsaz (eds.), Springer Verlag, New York, pp.3-40.
- Overstreet, C.M., 1982. "Model Specification and Analysis for Discrete Event Simulation", Ph.D, Dissertation, CS dept, Virginia Tech, Blacksburg.
- Schelling, T., 1960. *The strategy of conflict*, Cambridge, Harvard University Press.
- Travers, M.D., 1996. "Programming with agents: new metaphors for thinking about computation", PhD dissertation, MIT.
- Von Newman J. et O. Morgenstern, 1947. *Theory of games and economic behavior*, Princeton University Press.
- Watts, D., 1999. *Small Worlds. The Dynamics of Networks between order and randomness*, Princeton University Press.
- Wilkinson G., 1990. *Food Sharing in Vampire Bats*, Univ. Press, Baltimore and London.
- Zeigler, B.P., 1979. "Multi-level Multiformalism Modelling: An Ecosystem Example", dans *Theoretical Systems Ecology*, E.Halfton (ed.), Academic Press.
- Zeigler, B.P., Praehofer, H. et Kim, T.G., 2000. *Theory of Modelling and Simulation: 2nd Ed.: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*, Academic Press.