

# Formalisation de modèles multi-agents par les réseaux de Petri : Application à l'étude d'un système de gestion de la chasse à l'Est-Cameroun

I. Bakam<sup>a</sup>, F. Kordon<sup>y</sup>, C. Le Page<sup>z</sup>, F. Bousquet<sup>z</sup>

## 1 Introduction

Les systèmes multi-agents sont très adaptés pour modéliser les phénomènes dans lesquels les interactions entre diverses entités sont assez complexes pour être appréhendées par les outils classiques de modélisation mathématique. C'est ainsi que cette approche est de plus en plus utilisée dans les problèmes de gestion de l'environnement et particulièrement dans la gestion des ressources naturelles renouvelables [Bah 98], [Barreteau 98], [Rouchier 98]. La puissance d'expression des modèles multi-agents qui permettent de représenter des entités autonomes en interactions, dotées de comportement et pouvant évoluer dans un environnement [Ferber 95], est mise à l'épreuve lorsqu'il faut analyser le système et identifier des propriétés globales et générales. L'utilisation des méthodes formelles de spécification pour représenter les modèles multi-agents semble être la voie indiquée pour analyser ces mondes virtuels qui ne sont très souvent étudiés que par simulation. Mais comme le souligne Singh [Singh 99], si de nombreux formalismes existent, le choix du formalisme adéquat reste un challenge non trivial. Nous nous sommes situés à mi-chemin entre les équations différentielles et les systèmes multi-agents, en utilisant les réseaux de Petri colorés pour représenter et analyser un modèle multi-agent de gestion de l'activité de chasse.

De nombreux travaux ont été réalisés autour de l'utilisation des réseaux de Petri pour représenter les modèles multi-agents [Magnin 93], [Segrouchni 94], cependant ils ont surtout porté sur la modélisation des comportements cognitifs des agents. Nous essayons de prendre en compte l'espace métrique du système, tant dans la distribution des agents que dans leurs comportements de déplacement. Dans la suite, nous présentons le modèle multi-agent de la chasse, le réseau de Petri "équivalent" que nous en avons déduit et les analyses formelles que nous avons faites. Nous concluons par une discussion sur l'usage des méthodes formelles pour cette classe de problèmes, au regard de notre expérience.

## 2 Modèle multi-agent de l'activité de chasse

Le cas d'étude qui guide notre démarche est basé sur la question de thèse d'Ani Takforyan [Takforyan 96] dans laquelle elle évalue la viabilité des pratiques de chasse villageoise dans

---

<sup>a</sup>Département d'Informatique, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé 1, BP 812 Yaoundé, Cameroun. ibakam@uycdc.uninet.cm

<sup>y</sup>Laboratoire d'Informatique de Paris 6/SRC, Université Pierre & Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France. Fabrice.Kordon@lip6.fr

<sup>z</sup>Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, TERA/ERE, Campus International de Baillarguet, BP 5035 34032 Montpellier, France. {lepage, bousquet}@cirad.fr

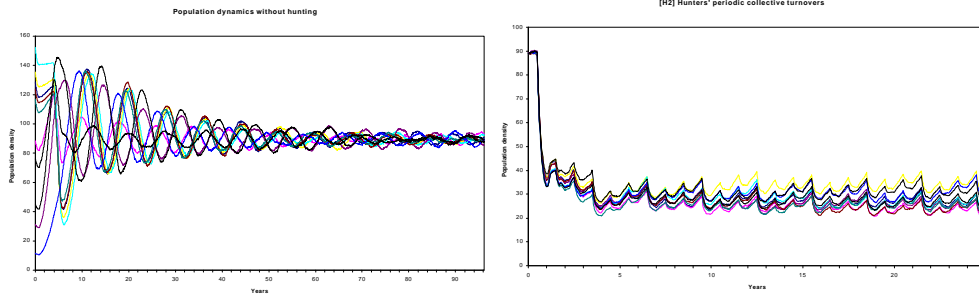


Figure 1: Résultats des simulations multi-agents : la variation de la taille de la population en dynamique hors chasse à gauche, et soumise à la chasse à droite

la forêt avoisinante de Djémiong à l'Est-Cameroun. Les enquêtes de terrain ont permis de recueillir des données sur le comportement du céphalophe bleu (espèce la plus chassée), les types de pièges, le volume des prises et les stratégies des chasseurs. Ces données portent sur l'organisation locale de la chasse, l'évolution des pratiques dans le temps et la place de cette activité dans les économies villageoises. On se pose la question de savoir si les règles et pratiques locales vont dans le sens d'une dégradation de la ressource, ou si elles forment de facto un système viable de gestion.

En vue d'étudier cette question, nous avons

- simulé les comportements sociaux des céphalophes (marquage des territoires, reproduction) pour étudier l'émergence de l'organisation sociale (familles)
- construit et étudié par simulations le modèle multi-agent de l'activité de chasse.

Grâce à l'environnement de simulation multi-agent CORMAS<sup>1</sup> dédié aux problèmes de gestion de ressources [Bousquet 98], nous avons mis en oeuvre le modèle multi-agent qui se définit par :

- un espace fait d'un quadrillage de cellules qui possèdent des attributs représentant l'état du sol (eau, route, piège)
- des agents animaux définis par l'âge, le sexe, la position dans l'espace
- des agents chasseurs qui choisissent des zones de piégeage au cours des saisons.

Nous avons procédé à deux phases de simulations (Figure 1) :

- la dynamique hors chasse

On reproduit ici les comportements des animaux (déplacements, reproduction...) dans leur environnement naturel. Ils ne sont soumis à aucun prélèvement de nature anthropique. Ces simulations permettent de retrouver les densités de population qui avoisinent celles des zones non chassées, telles que décrites dans la littérature [Dubost 80], soit environ 70 individus au km<sup>2</sup>.

- l'activité de chasse proprement dite

Cette phase a consisté à reproduire le comportement des chasseurs durant dix années successives. Ce comportement consiste à alterner des aires de chasse au début de chaque saison. Les scénarios de simulation ont permis de montrer l'influence de la distribution spatiale et des stratégies des chasseurs sur la viabilité de la ressource [Bousquet 99].

<sup>1</sup><http://www.cirad.fr/presentation/programmes/espace/cormas/>

## 3 Le modèle réseau de Petri

Les simulations correspondent à des évolutions particulières du système, c'est-à-dire à des chemins dans le graphe des états accessibles du système. A elles seules, elles ne renseignent pas sur la non existence de situations de blocage (extinction de la population) que les systèmes de gestion de la faune cherchent à éviter, et ne permettent pas de répondre aux questions sur la viabilité du système en fonction des conditions initiales et des hypothèses d'évolution. Les réseaux de Petri nous semblent être un bon compromis entre les systèmes multi-agents qui offrent un riche pouvoir d'expression mais ne permettent pas de vérification formelle, et les modèles d'équations différentielles très adaptés à une analyse formelle, mais inefficaces lorsqu'il faut représenter des entités autonomes en interactions ou des comportements qualitatifs.

### 3.1 Les réseaux de Petri

Un réseau de Petri est un graphe biparti comprenant deux sortes de noeuds : les places et les transitions. Les arcs de ce graphe relient les transitions aux places ou les places aux transitions. Les places contiennent des jetons ou marques qui vont de place en place en franchissant les transitions suivant les règles de franchissement.

De manière formelle [Naquet 92], un réseau de Petri est défini par  $\langle P; T; W \rangle$  où  $P$  est un ensemble fini de places,  $T$  est un ensemble fini de transitions et  $W : (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$  est la fonction de valuation. On associe à ce triplet un marquage  $M : P \rightarrow \mathbb{N}$  qui définit la distribution des marques dans les places et le réseau est alors dit marqué.

#### 3.1.1 Réseaux de Petri colorés et la plate-forme Macao CPN-AMI

Lorsque le nombre d'entités du système à modéliser est important, la taille du réseau de Petri devient rapidement énorme ; et si les entités présentent des comportements similaires, l'usage des réseaux colorés permet de condenser le modèle. Les réseaux de Petri colorés sont des réseaux de Petri dans lesquels les jetons portent des couleurs. Une couleur est une information attachée à un jeton. Cette information permet de distinguer des jetons entre eux et peut être de type quelconque [Kurt 97]. Ainsi, les arcs ne sont pas seulement étiquetés par le nombre de jetons mais par leurs couleurs. Le franchissement d'une transition est alors conditionné par la présence dans les places en entrée du nombre de jetons nécessaires, qui en plus satisfont les couleurs qui étiquettent les arcs. Après le franchissement d'une transition, les jetons qui étiquettent les arcs d'entrée sont retirés des places en entrée tandis que ceux qui étiquettent les arcs de sortie sont ajoutés aux places en sortie de cette transition. Les réseaux colorés n'apportent pas de puissance de description supplémentaire par rapport aux réseaux de Petri, ils permettent juste une condensation de l'information. A tout réseau de Petri coloré marqué correspond un réseau de Petri qui lui est isomorphe.

Nous avons utilisé l'environnement logiciel CPN-AMI<sup>2</sup> développé au LIP6<sup>3</sup>. Cet environnement est dédié à la théorie des réseaux de Petri colorés et supporte la spécification, la validation, la vérification formelle et le prototypage conforme d'applications coopératives. Ses outils permettent de vérifier des formules de logique temporelle (model checking), de calculer des propriétés structurelles (invariants, verrous, trappes), de simuler, de déboguer et d'engendrer du code [Kordon 99]. L'accès aux outils se fait à travers une interface utilisateur (Macao) qui est un éditeur de graphes générique.

---

<sup>2</sup><http://www.lip6.fr/cpn-ami>

<sup>3</sup>Laboratoire d'Informatique de Paris 6

## 3.2 Le modèle

Le modèle RdP colorés de l'activité de chasse est fait de modules qui correspondent chacun à une hypothèse ou à un groupe d'hypothèses. Les hypothèses, extraites du modèle multi-agent, décrivent le modèle et favorisent une approche modulaire. Dans ce modèle, les agents animaux sont représentés par des jetons de la place Population. A chaque animal correspond un jeton regroupant les informations le concernant (âge, position dans l'espace, état). Nous utilisons une approche par composition de réseaux, dans laquelle les sous-systèmes ou modules sont d'abord conçus, en partageant entre eux des places communes. Chaque module Hx possède une place Start\_Hx et une place End\_Hx (non colorées et 1-bornées). Dès que Start\_Hx contient un jeton, cela entraîne le démarrage d'une exécution du module Hx. Cette exécution s'achève avec le marquage de End\_Hx. Ces places dites de séquençement permettront ensuite de "plonger" le module dans le système global. Les modules sont d'abord étudiés séparément et on peut vérifier certaines propriétés locales. Ils sont par la suite assemblés en fusionnant les places partagées.

### 3.2.1 Les hypothèses du modèle

#### <sup>2</sup> H1 : Hypothèses de déplacement

(a) Les animaux se déplacent de façon aléatoire dans les 4 directions (Nord, Sud, Est, Ouest) ; (b) Les animaux qui se déplacent sur une cellule piégée sont pris dans le piège suivant une probabilité de prise ; (c) Les animaux pris dans un piège sortent du système (mort) ; (d) Le nombre d'animaux dans une cellule est majoré ; (e) Tous les animaux se déplacent à chaque pas de temps.

#### <sup>2</sup> H2 : La population d'animaux augmente suivant un taux d'accroissement ...xé.

#### <sup>2</sup> H3 : Hypothèses de croissance

(a) Les animaux grandissent ; (b) Les animaux ayant atteint un âge maximum ...xé sortent du système.

#### <sup>2</sup> H4 : Le séquençement des différentes actions est bien dé...ni.

Nous avons ainsi élaboré un module H1 de déplacement, un module H2 qui accroît la taille de la population, un module H3 de croissance des animaux et un module H4 qui établit le séquençement des trois premiers modules. Le réseau complet possède 20 places, 23 transitions et 155 arcs et est trop grand pour être présenté ici ; la figure 2 montre une vue partielle du module de déplacement qui, par la prise en compte de l'espace, illustre l'originalité de l'approche et est le module principal du modèle. Le fonctionnement complet de ce module est détaillé ci-après.

### 3.2.2 Description des places principales :

La place Population contient les jetons représentant les animaux du modèle. A un animal correspond un jeton  $\langle Id; Age; X; Y; Etat \rangle$  où Id est un numéro, Age est exprimé en semestres, X et Y sont les coordonnées de sa position dans l'espace.

La place Espace contient des jetons représentant les cellules spatiales. Chaque jeton est un triplet  $\langle X; Y; Attr \rangle$ , où X et Y sont les coordonnées de la cellule et Attr représente la présence ou l'absence d'un piège.

La place EspVide contient des jetons  $\langle X; Y \rangle$  représentant les positions libres dans les cellules. Elle permet de modéliser le nombre maximum d'animaux par cellule. A chaque cellule  $\langle X; Y; Attr \rangle$  correspondent m positions  $\langle X; Y \rangle$  de la place EspVide, si cette cellule peut accueillir m animaux supplémentaires. Il est associé à EspVide une place duale EspOcc dont les jetons  $\langle X; Y \rangle$  représentent les positions spatiales occupées.





| configurations  | chasse permanente     |        |                 |                            |        |                 | alternance de saisons de chasse et de pause (2) |        |                 |
|---|-----------------------|--------|-----------------|----------------------------|--------|-----------------|---|--------|-----------------|
|   | pièges maintenus (1a) |        |                 | alternance des pièges (1b) |        |                 |   |        |                 |
|   | nœuds                 | arcs   | nœuds terminaux | nœuds                      | arcs   | nœuds terminaux | nœuds   | arcs   | nœuds terminaux |
|  | 389584                | 412081 | 2               | 776396                     | 820866 | 12              | 565206  | 583922 | 0               |
|  | 443260                | 469479 | 6               | 884760                     | 936715 | 0               | 724103  | 748391 | 0               |

Figure 3: Statistiques des graphes de marquages accessibles correspondant aux trois scénarios étudiés : le système est viable lorsqu'il n'y a aucun noeud terminal.

IdT représente bien la taille de la population et que les identifiants utilisés dans la place Population sont bien toutes les valeurs entières comprises entre 1 et IdT.

La présence d'un jeton < Id > dans la place TailleBis enclenche à nouveau le processus de déplacement de l'animal représenté par le jeton de la place Population qui a cet identifiant. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que < Id > prenne la valeur 0, et la transition f\_indepl sera alors tirée. Cette transition produit un jeton dans la place End\_H1, ce qui marque la fin de l'exécution du module.

## 4 Analyse du modèle réseau de Petri

Les simulations de la dynamique du réseau de Petri nous ont permis de valider chaque module pendant son élaboration, en vérifiant s'il présente le comportement attendu sur de petits marquages initiaux. Il existe deux approches principales d'analyse d'un réseau de Petri : l'identification des propriétés structurelles et l'analyse par model checking du graphe des marquages accessibles [Kurt 97]. L'analyse structurelle est fondée sur les propriétés algébriques du réseau, tandis que le graphe des marquages accessibles est un graphe orienté dont les noeuds correspondent aux états accessibles du système et les arcs aux transitions franchissables entre ces états. Après la phase de "débugage", nous avons vérifié la cohérence du système grâce aux propriétés d'invariants structurels. Mais cette analyse structurelle n'a servi qu'à valider les mécanismes de contrôle des processus.

Cette étude ayant davantage un intérêt qualitatif, nous avons utilisé les paramètres minimaux de manière à pouvoir obtenir des graphes d'accessibilité de taille raisonnable, tout en rejetant sur le plan comportemental le modèle multi-agent et donc la réalité. Nous sommes donc partis d'un espace  $2 \times 2$  où chaque cellule peut contenir au plus deux animaux et 50% des cellules sont piégées. Avec une population initiale de 4 animaux, nous avons étudié plusieurs scénarios résumés dans le tableau de la figure 3.

La non existence de noeuds terminaux correspond à la vivacité du réseau de Petri, c'est toujours le cas lorsque les saisons de chasse et de pause sont alternées (2). Par contre, lorsque la chasse se fait de façon permanente (1a et 1b), le graphe comporte des noeuds terminaux, ce qui est équivalent à l'existence dans ces conditions de schémas d'évolution conduisant à l'extinction de la population. Le scénario (1b) dans lequel on maintient les pièges au cours des saisons en changeant leurs positions fait apparaître une différence de résultats selon les configurations spatiales. Nous avons déduit que le mode de déplacement des animaux (4-connexité du voisinage) justifie que dans la deuxième configuration, le système reste viable puisque les animaux se trouvant dans les cellules non piégées se déplacent toujours vers les cellules non piégées lors du changement des positions de pièges.

## 5 Conclusion

Nous nous sommes proposés dans cette étude d'exprimer et d'analyser par une méthode formelle un modèle multi-agent en vue de valider les résultats obtenus par simulation. La démarche de formalisation a aidé à la clarification du modèle car la rigueur d'expression oblige à lever toutes les ambiguïtés. Cependant, à cause de l'explosion de la taille du graphe des marquages accessibles, cette formalisation ne peut être menée qu'au prix de nombreuses simplifications sur le modèle initial. Mais il est indéniable que la richesse de l'analyse que nous procurent ces méthodes nous renseigne beaucoup mieux que de simples simulations multi-agents. Nous nous sommes intéressés principalement au comportement qualitatif du modèle, et nous avons observé les corrélations entre la distribution spatiale, les stratégies de chasse et les comportements des animaux.

**Remerciements** 1 Ce travail a bénéficié du financement du CIRAD par l'action incitative ciblée "Validité des systèmes multiagents et Aide à la décision", et du CNRS à travers le projet "Systèmes écologiques et action de l'homme".

## References

- [Bah 98] Alassane Bah, Richard Canal, Patrick D' Aquino & François Bousquet. Les Systèmes Multi-Agents Génétiques Pour L'étude de la Mobilité Pastorale En Zone Intertropicale Sèche. Actes du colloque SMAGET, 1998.
- [Barreteau 98] Olivier Barreteau & François Bousquet. SHADOC: A Multi-Agent Model to Tackle Viability of Irrigated Systems. Annals of Operations Research, 1998.
- [Bousquet 98] François Bousquet, Innocent Bakam, Hubert Proton & Christophe Le Page. Cormas : Common-Pool Resources and Multi-Agents Systems. Lectures Notes of Artificial Intelligence 1416, vol. 2, pages 826–837, 1998.
- [Bousquet 99] François Bousquet, Christophe Le Page, Innocent Bakam & Ani Takforyan. A Spatially Explicit Individual-Based Model of Blue Duikers Population Dynamics: Multi-Agent Simulation of Bushmeat Hunting in an Eastern Cameroonian Village. submit in Ecological Modelling, 1999.
- [Dubost 80] Gerard Dubost. L'écologie et la Vie Sociale Du Céphalophe Bleu (Cephalophus Monticola Thunberg), Petit Ruminant Forestier Africain. Journal of Comparative Ethology, vol. 54, pages 205–266, 1980.
- [Ferber 95] Jacques Ferber. Les systèmes multi-agents. vers une intelligence collective. InterEditions, 1995.
- [Kordon 99] Fabrice Kordon & Emmanuel Paviot-Adet. Using CPN-AMI to Validate a Safe Channel Protocol. The toolset proceedings of the International Conference on Theory and Applications of Petri Nets, Williamsburg, USA, June 21-25 1999.
- [Kurt 97] Jensen Kurt. Coloured petri nets : Basic concepts, analysis methods and practical use, volume 1. Springer, 1997.
- [Magnin 93] Laurent Magnin & Jacques Ferber. Conception de Systèmes Multi-Agents Par Composants Modulaires et Réseaux de Petri. Actes des Journées du PRC-IA, pages 129–140, 1993.

- [Naquet 92] Vidal Naquet & Choquet Geniet. Réseaux de petri et systèmes parallèles. Armand Colin, 1992.
- [Rouchier 98] Juliette Rouchier & Melanie Requier Desjardins. Un Travail Interdisciplinaire : Élaboration D'un Modèle de la Transhumance À L'extrême Nord Du Cameroun. Actes du colloque SMAGET, 1998.
- [Segrouchni 94] El Fallah Segrouchni. Représentation et Manipulation de Plans À L'aide Des Réseaux de Petri. Actes des 2èmes Journées Francophones IAD-SMA, Mai 1994.
- [Singh 99] Munindar P. Singh, Anand S. Rao & Michael P. George. Formal Methods in DAI: Logic Based Representation and Reasoning. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, 1999.
- [Takforyan 96] Ani Takforyan. Vers Une Gestion Locale de la Faune Sauvage En Afrique ? Le Cas de l'Est-Cameroun. Actes du colloque panafricain "Gestion communautaire des ressources naturelles renouvelables et développement durable", juin 1996.