

Systèmes multi-agents et viabilité des systèmes irrigués

Olivier Barreteau* — François Bousquet**

* CEMAGREF, Groupement de Montpellier
361 rue J.-F. Breton, BP 5095
34033 Montpellier Cedex
barreteau@montpellier.cemagref.fr

** CIRAD, Campus International de Baillarguet
BP 5035. 34032 Montpellier Cedex
bousquet@cirad.fr

RÉSUMÉ. La viabilité des systèmes irrigués pose problème dans la vallée du fleuve Sénégal et ailleurs. Nous faisons l'hypothèse que leur viabilité dépend des modes de coordination entre paysans. A la suite d'enquêtes sur le terrain permettant d'appréhender la diversité des pratiques, nous avons mis au point un système multi-agent pour simuler la dynamique de systèmes irrigués. Ce système irrigué virtuel repose essentiellement sur des règles collectives et individuelles relatives à l'usage et à la répartition de l'eau et du crédit. Après avoir testé sa pertinence pour traiter la question de la viabilité des systèmes irrigués, nous l'avons utilisé pour explorer différents scénarios. Nous avons alors montré qu'aucun ensemble de règles collectives ou individuelles n'explique à lui seul la viabilité d'un système irrigué, ce qui renvoie au débat sur les relations individuel/ collectif pour la gestion des ressources comme pour les systèmes multi-agents.

ABSTRACT. The viability of irrigated systems in the Senegal River Valley is being brought into question today due to their under-utilization. We assume that their viability depends on the way their different components behave and interact. A field work was designed to grasp the diversity of individual and collective behaviors and interactions encountered. This led to the development of a multi-agent system model, a kind of virtual irrigated system, with a special focus on rules in use for access to credit, water allocation and cropping season assessment as well as organization and coordination of farmers. This model is then used to explore consequences of different sets of individual and collective rules. Viability of simulated irrigated systems appears to be linked to none of them. This result refers to the question of relations between individuals and groups for resource management as well as multi agent systems.

MOTS-CLÉS : système multi-agent, système irrigué, coordination entre paysans, Sénégal.

KEY WORDS : multi agent system, irrigated system, coordination between farmers, Senegal

1. Introduction

Les travaux en intelligence artificielle ont donné lieu au développement d'outils de modélisation et de simulation puissants. Parmi ceux-ci, l'intelligence artificielle distribuée a donné les systèmes multi-agents, à la fois outils de résolution de problèmes [BON 88] et mode de représentation de systèmes complexes. Leur principal intérêt consiste dans leur capacité à simuler des interactions entre entités autonomes [GLE 94], pouvant éventuellement se situer à des niveaux d'organisation différents. Ces questions d'interaction et de communication entre agents constituent actuellement un champ de recherche en soi [MUL 96 ; WOO 98].

Les questions relatives à la gestion des ressources renouvelables en propriété commune reposent sur la compréhension du fonctionnement de systèmes complexes au sein desquels interagissent des acteurs sociaux individuels et collectifs de rôles et de poids différents et des éléments d'un milieu naturel partagé. Ces interactions sont directes ou passent par l'environnement.

Nous avons cherché à appliquer ce type d'outil pour travailler sur une question de cette nature : la gestion de systèmes irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal. Il s'agit d'abord de constituer un outil permettant une meilleure compréhension des modes de coordination en œuvre au sein d'un système irrigué puis de le faire évoluer vers un outil d'aide à la négociation. Cette expérience a permis de tirer quelques enseignements pour d'autres travaux sur la gestion des ressources.

Dans la suite nous présentons le contexte et l'outil mis en place puis quelques exemples d'usage de ce modèle pour tester sa pertinence et avancer sur la compréhension de la viabilité de ces systèmes, et enfin des éléments de discussion pour représenter le collectif dans des systèmes multi-agents appliqués à la gestion des ressources.

2. Contexte et définitions

La moyenne vallée du fleuve Sénégal a connu un développement rapide de l'irrigation à partir du milieu des années 70 [SEC 90, DIE 90]. Cependant la majorité des aménagements encore mis en œuvre aujourd'hui ont été réhabilités une fois voire plusieurs [LER 95]. Cette situation pose la question de leur viabilité.

De nombreuses définitions de système irrigué existent dans la littérature [OST 93]. Un système irrigué gravitaire est ici défini comme un réseau de canaux, transportant de l'eau depuis un ou plusieurs points sources, jusqu'à des parcelles en vue de productions agricoles par des paysans, éventuellement regroupés en organisations de producteurs, et pratiquant des échanges entre eux et avec leur environnement. Le tout est géré par une organisation émanant des utilisateurs ou non. Ils sont le lieu de nombreuses interactions entre les acteurs individuels et/ou collectifs *via* le milieu ou directes.

Suite à une série de travaux dans le domaine de la gestion des ressources en propriété commune [SEN 91, OST 92], nous faisons l'hypothèse que la coordination

entre les paysans est importante pour la viabilité des systèmes irrigués. Pour cela, sur la base d'études sur le terrain dans la région de Podor, nous avons mis en place un outil de représentation des systèmes irrigués permettant d'explorer les conséquences de différents modes de coordination entre paysans et nous l'avons utilisé pour simuler différents scénarios de règles collectives et de comportements individuels.

3. Les systèmes multi-agents

L'objectif de cet outil de représentation est de participer à la compréhension du fonctionnement des systèmes irrigués du point de vue des liens entre les modes de coordination en œuvre entre les paysans et la viabilité de ces systèmes irrigués.

Cet objectif implique que cet outil de représentation :

- prenne en compte les différentes interactions en œuvre au sein d'un système irrigué.
- permette de simuler la dynamique du système.
- puisse intégrer des connaissances issues de diverses disciplines.
- ait un moyen de contrôle des processus en œuvre afin de pouvoir les répéter.

Or les méthodes actuellement en usage pour des représentations interdisciplinaires de systèmes irrigués ne répondent pas à tous ces besoins. Les méthodes reposant sur des couplages de modèles ne permettent pas bien de prendre en compte les interactions en œuvre : seules les interactions entre les modules ou internes à chaque module sont prises en compte. Les méthodes reposant sur les démarches systémiques sont plus dédiées à la représentation de la structure des systèmes qu'à leur dynamique et posent des problèmes particuliers quand plusieurs acteurs sont en interaction [LEG 95, REY 96], ce qui est le cas pour les systèmes irrigués représentés.

Par contre les systèmes multi-agents [FER 95] constituent un outil de représentation qui place explicitement les interactions au centre de leur démarche. Un SMA est constitué d'un ensemble de processus informatiques se déroulant en même temps partageant des ressources communes et communiquant entre eux [BOU 97]. Mettant en œuvre des processus en interaction, ces outils sont particulièrement bien adaptés à une simulation de la dynamique des systèmes représentés. Chaque agent agit en fonction de règles qui lui sont propres, ces règles pouvant concerner aussi bien l'écoulement de l'eau des canaux vers les parcelles que le choix d'accorder ou de ne pas accorder un prêt à un paysan. La condition d'interdisciplinarité est bien satisfaite. Enfin ces règles, qui sont des contrôles des processus en œuvre, peuvent constituer des paramètres du modèle. Des SMA ont ainsi déjà été utilisés ou sont en cours d'utilisation pour des questions semblables sur la gestion de ressources renouvelables en propriété commune [BAK 97, BOU 94].

Ce type d'outil paraît donc *a priori* pertinent pour notre objectif d'exploration des conséquences de différents modes de coordination entre les paysans pour la viabilité des systèmes irrigués.

4. Du terrain au modèle

La construction du modèle s'est appuyée sur la connaissance plus précise de 5 systèmes irrigués situés autour de Podor dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal au sein desquels un petit nombre de paysans ont été suivis plus particulièrement. Cet échantillon à deux niveaux d'organisation a été choisi de sorte à couvrir la diversité des règles collectives et des comportements individuels relatifs à la mise en œuvre des systèmes irrigués. Ce processus de modélisation s'est fait en plusieurs étapes : des phases d'investigation sur le terrain ont alterné avec des phases de modélisation et de simulations : les phases sur le terrain conduisent aux hypothèses de modélisation et aux scénarios de simulation, les autres à de nouveaux angles d'approche sur le terrain. Il s'est agi en fait d'une démarche de construction des thèmes d'enquêtes et du modèle en parallèle, selon une modélisation d'accompagnement [BOU 97].

Typiquement, dans la moyenne vallée du Sénégal, un périmètre irrigué est constitué d'une station de pompage ou d'un GMP qui prend l'eau dans le fleuve ou un de ses défluent, la met dans un réseau principal éventuellement hiérarchisé, sur lequel sont branchés des irrigateurs le long desquels se situent les parcelles sur lesquelles sont produites le riz. A l'aval certains aménagements sont équipés d'un réseau de drainage. Chaque composante du périmètre est mise en œuvre ou gérée par l'un des acteurs à qui elle est attribuée, paysan ou groupe de paysans du système. Chacun de ces acteurs met en œuvre ces activités selon des règles et en fonction d'objectifs qui leur sont propres et dont les modalités varient de l'un à l'autre. Par exemple, chaque paysan a un objectif de mise en culture : un premier type de paysan cultive sa parcelle pour en tirer un revenu, un deuxième pour en tirer les ressources alimentaires de la famille, un troisième pour conserver l'accès à la terre dans le contexte d'une loi foncière où la terre appartient à l'Etat et est attribuée aux paysans pour être mise en valeur, un quatrième type concerne des jeunes au chômage qui cultivent en attendant de trouver un autre emploi. De même, l'attribution de l'eau entre les paysans dont les parcelles se situent le long d'un même irrigateur se fait selon diverses modalités selon les systèmes irrigués observés : libre service, tour d'eau strict ou tour d'eau arrangé.

Ces groupes peuvent être différents pour chacune des raisons d'être ou regroupés en un seul et même groupe regroupant tous les paysans d'un même système irrigué. Entre ces groupes et ces paysans ont lieu des échanges de biens, riz, intrants ou argent, d'informations ou encore de services. Les interactions au sein des systèmes irrigués sont soit directes *via* des communications, soit indirectes *via* l'aménagement. Enfin tous ces acteurs du système sont en relation avec d'autres acteurs extérieurs au système : famille, village, commerçants, administration...

La rapide description du terrain ci-dessus est un premier niveau de modélisation mais reste trop complexe pour être utilisée pour l'exploration des conséquences de modes de coordination particuliers sur la viabilité. Une formalisation plus poussée, telle que la constitution d'un SMA est nécessaire.

5. SHADOC, un système irrigué virtuel

Ce processus de modélisation a débouché sur un Simulateur Hydro-Agricole Décrivant les modes d'Organisation et de Coordination (SHADOC). Le modèle sous-jacent repose sur quelques hypothèses quant aux ressources utilisées et aux activités représentées. Suite aux différentes étapes du processus de modélisation, nous faisons l'hypothèse de représenter le système irrigué comme le lieu de la maîtrise et de la répartition de deux ressources : le crédit et l'eau [BAR 97]. Au niveau de la succession des activités, la campagne agricole est alors divisée en trois phases :

- recherche de crédit et préparation de la campagne.
- entretien de l'irrigation des parcelles.
- bilan de la campagne.

Même si ce n'est pas toujours exprimé comme tel pour la fluidité du texte, dans toute cette partie, il n'est question que du modèle et donc d'agents informatiques, objets, attributs et méthodes plutôt que de paysans, parcelles, critères ou règles.

Le diagramme de classes UML [MUL 97] présenté en figure 1 décrit la structure de cette modélisation en retenant les principales classes d'objet et quelques attributs à titre d'exemple.

Le périmètre représenté est constitué d'une station de pompage, d'un canal principal, emblématique du réseau principal réel, sur lequel sont branchés 5 irrigateurs alimentés par des vannes de taille variable mais ne pouvant être modifiée au cours de la simulation, le long desquels se situent un nombre variable de parcelles.

La population à qui est affecté l'aménagement met en scène des agents paysan selon un modèle à plusieurs niveaux : des agents en interaction, des paysans s'échangeant du crédit et exploitant un périmètre irrigué, des groupes avec différentes raisons d'être.

Chaque parcelle est attribuée à un paysan n'ayant lui-même qu'une seule parcelle. Chaque paysan fait partie de trois groupes différents :

- un groupe dont la raison est l'attribution de l'eau parmi les paysans ayant leur parcelle le long d'un même irrigateur. A chaque irrigateur correspond ainsi un groupe rassemblant tous les paysans ayant leur parcelle le long de cet irrigateur.
- un groupe dont la raison est la gestion de la station de pompage qui rassemble tous les paysans.
- un groupe dont la raison est l'accès au crédit et la distribution de celui-ci parmi ses membres. La liste des membres de ce groupe est *a priori* distincte des groupes d'attribution de l'eau.

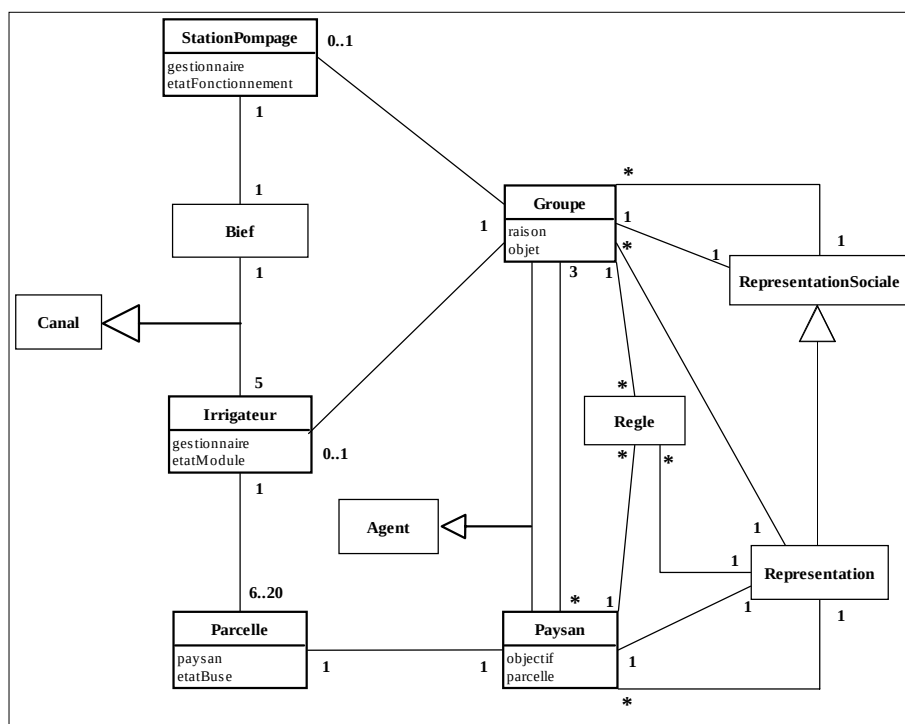


Figure 1. Diagramme de classes de SHADOC

Chaque agent agit selon une base de règles qui lui est propre. Cette base de règles est une liste composée d'instances de la classe Règle. Chaque règle est décrite par un type, une modalité et éventuellement un paramètre associé à cette modalité. Le type correspond à l'activité sur laquelle porte la règle, par exemple le remboursement, et la modalité à la manière dont cette activité est effectuée, par exemple ne rembourser qu'aux groupes. A chaque type de règle correspondent plusieurs modalités au choix de l'utilisateur. Chaque paysan agit aussi en fonction d'un objectif qui lui est propre parmi l'ensemble {#production, #nourriture, #fauteDeMieux, #foncier} qui reprend les différents types d'objectifs observés sur le terrain.

A cette structuration se superpose également une partition de la population selon des réseaux d'affinité sociale. Chaque paysan a une représentation du monde au sein de laquelle se trouve sa représentation de l'état de sa parcelle et de la station de pompage ainsi que son réseau d'affinité sociale constitué de références à d'autres agents paysan avec lesquels il va volontiers coopérer : échanges d'informations, de

services, d'expériences¹... Ce réseau d'affinité sociale est *a priori* indépendant des autres groupes. Il existe enfin une dernière partition de la population en fonction du statut social de chaque paysan, représenté ici selon 4 niveaux ordonnés. La représentation des paysans contient aussi une liste d'acointances qui constitue pour un agent donné la liste des agents avec qui il est en relation et les règles que cet agent estime être les leurs.

Le tableau 1 ci-dessous résume les différentes classes utilisées dans le modèle SHADOC et, pour chacune d'entre elles, le nombre d'instances. Les classes Règle et Communication, bien que très importantes dans le modèle, ne sont pas reprises dans ce tableau, car leurs instances ont une existence éphémère et contextuelle, leur nombre varie au cours de la simulation. Ce tableau donne néanmoins une estimation de la complexité résiduelle de SHADOC.

Classe	nombre d'instances
StationPompage	1
Bief	1
Irrigateur	5
Parcelle	$30 \leq N_p \leq 100$
Paysan	N_p
Groupe	$7 \leq N_g \leq 11$
Représentation(Sociale)	$N_g + N_p$

Tableau 1. Effectif d'agents et d'objets présents dans SHADOC

La dynamique d'ensemble du modèle est représentée du point de vue d'un paysan sur la figure 2. A cette dynamique des activités des paysans et des groupes est associée une dynamique de l'eau et de croissance du riz détaillée dans [BAR 98].

La phase #credit se passe en trois étapes : évaluation du besoin pour être autorisé à faire la campagne, recherche du crédit correspondant à ce besoin, demande d'autorisation pour faire la campagne. L'évaluation du besoin peut se faire de deux manières différentes selon les hypothèses faites sur les communications entre les niveaux d'organisation groupe et paysan : les paysans tiennent compte des règles collectives d'accès à l'eau et au crédit telles qu'ils connaissent ou qu'ils se les représentent s'ils n'ont pas accès à l'information. Dans ce dernier cas, les paysans utilisent leur attribut #représentation qui comporte les règles qu'ils se représentent être celles qu'utilisent les autres agents avec qui ils sont en relation. La figure 3 représente les interactions en œuvre dans l'étape de recherche de crédit à proprement

¹ Un agent de la classe Groupe a aussi un attribut "copains" dans sa représentation, qui est une instance de la classe ReprésentationSociale, celui-ci rassemble les autres groupes connus par cet agent comme ayant la même raison que lui.

parler. Pour un paysan donné, la réussite de la phase est concrétisée par l'obtention du crédit pour les intrants et l'autorisation de faire la campagne. Il passe alors en phase #irrigation. Un échec, c'est-à-dire une absence de succès avant une date fixée, le conduit à abandonner la campagne et à passer en phase #repos.

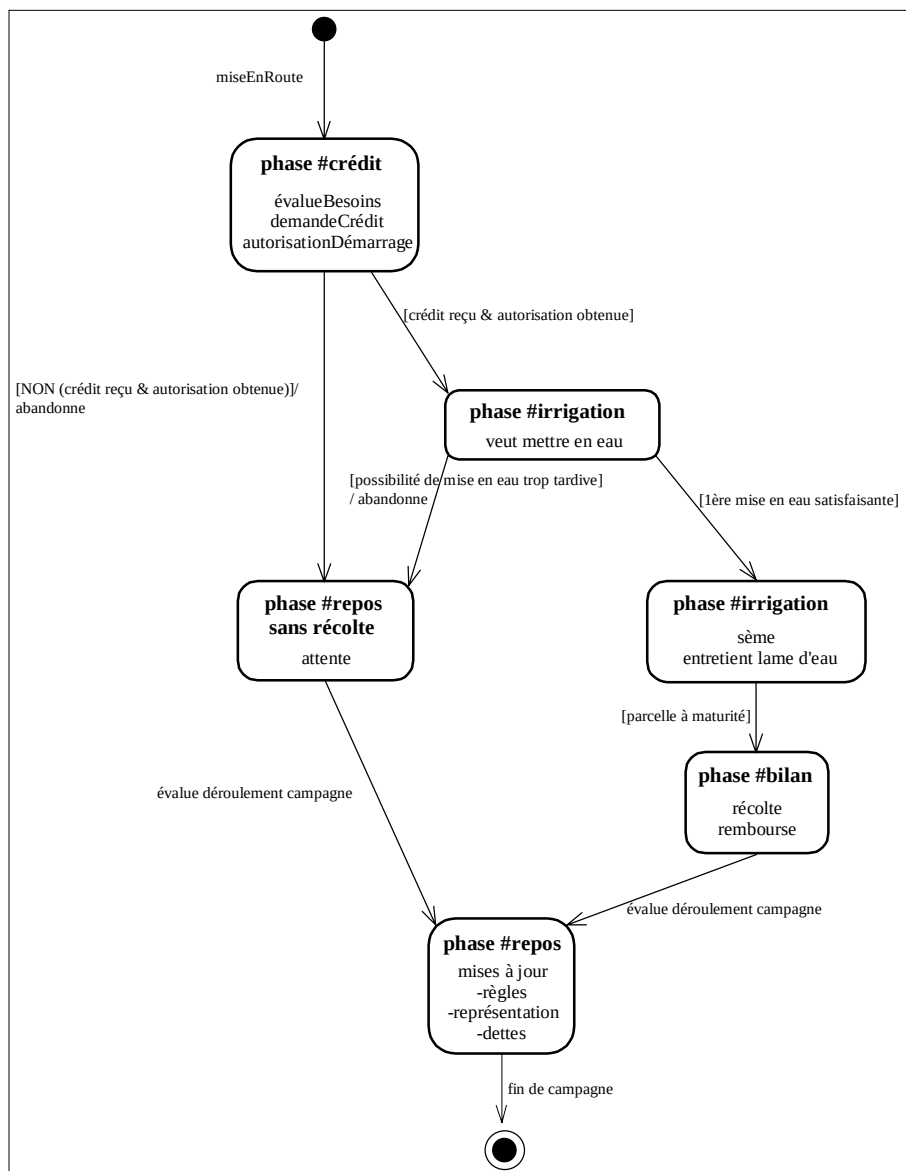


Figure 2. Diagramme d'état de SHADOC au cours d'une campagne

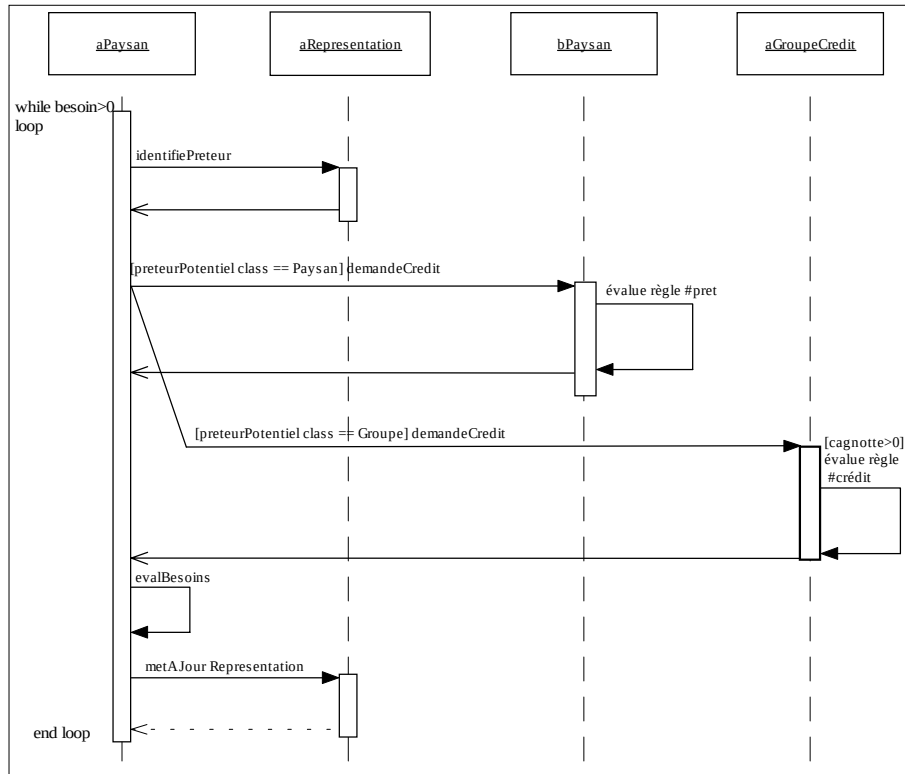


Figure 3. Diagramme de séquences de la recherche de crédit

La station de pompage est démarrée par le groupement ayant en charge sa gestion quand sa règle relative à cette action est validée. Ceux qui sont passés en phase #irrigation, tentent alors de démarrer la campagne, c'est-à-dire de remplir d'eau la parcelle et de semer, puis de la mener à bien sans incident de stress hydrique en fonction de leur objectif qui règle la fréquence de leur passage sur leur parcelle et leur niveau d'investissement et en fonction de la règle d'allocation de l'eau en vigueur sur leur maille. Durant cette phase, à chaque pas de temps d'une journée, chaque paysan se pose la question de son déplacement sur sa parcelle en fonction d'un tirage aléatoire, de la représentation qu'il se fait de l'état de sa parcelle et de son objectif. Sur la parcelle, en fonction de l'état observé, de la règle d'allocation de l'eau en vigueur et des échanges de tours d'eau auxquels il peut procéder avec des paysans de son réseau d'affinité sociale, il ouvre ou ferme la buse qui l'alimente. Les interactions mises en œuvre dans cette activité d'entretien sont représentées par un diagramme de séquences en figure 4. En fin de campagne, chaque paysan ayant semé reçoit un revenu correspondant à sa récolte et procède éventuellement au remboursement de tout ou partie de ses crédits en fonction de sa règle

correspondante. Durant cette phase, ceux qui ne parviennent pas à semer avant une date fixée abandonnent et passent en phase #repos.

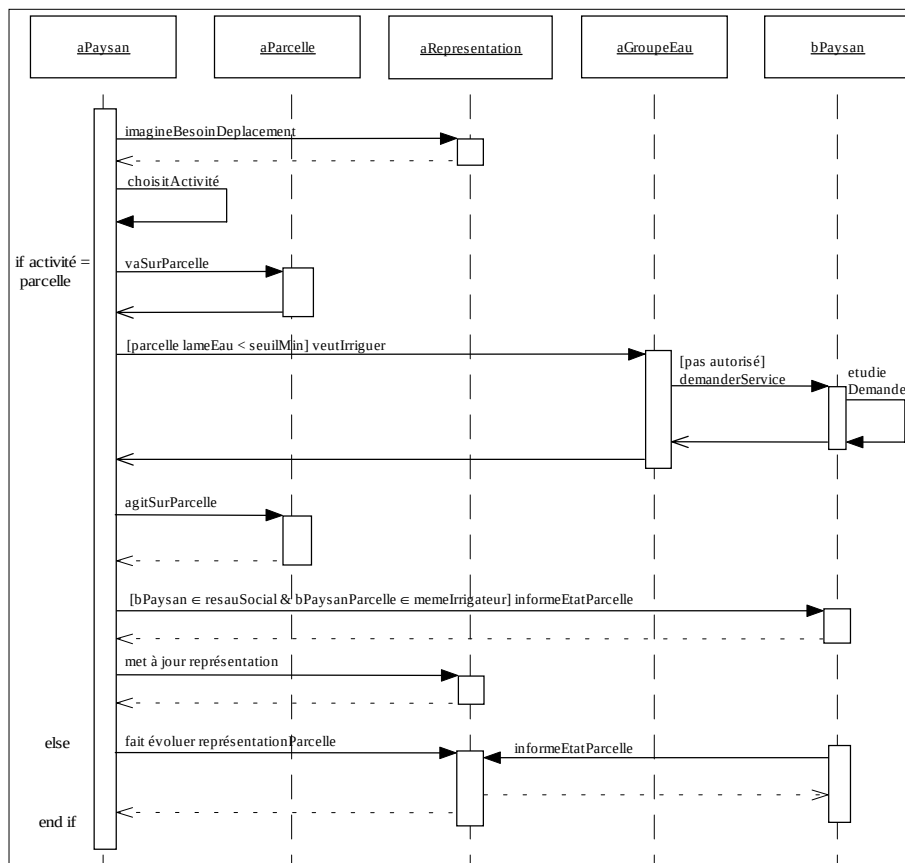


Figure 4. Diagramme de séquences de l'entretien de la lame d'eau

Les paysans en phase #bilan ainsi que les paysans en phase #repos n'ayant pas fait la campagne procèdent ensuite au bilan de la campagne, c'est-à-dire à une évaluation de leurs résultats en fonction d'un critère qui leur est propre et à un changement éventuel de leurs règles. Cette étape d'évaluation et de changements de règles est particulièrement importante pour la dynamique du système représenté, elle a lieu de la même manière pour les groupes. Elle relève d'un processus d'apprentissage par imitation : si un paysan, respectivement un groupe, n'est pas satisfait du déroulement d'une campagne, il va demander aux autres paysans de son réseau d'affinité sociale, respectivement aux autres groupes de même attribut #raison, quel a été leur résultat. Selon le choix fait par l'utilisateur du modèle, le paysan non satisfait, respectivement le groupe, peut alors ne rien changer ou reprendre les règles

du paysan, respectivement du groupe, qui a eu le meilleur résultat pour son critère ou celui qui a eu un résultat correct avec un ensemble de règles proche du sien, ou encore changer en imitant le meilleur une première fois puis revenir à la situation antérieure s'il n'est toujours pas satisfait. Informatiquement, le processus d'imitation revient pour un agent à remplacer ses propres instances de règles par des copies de celles de l'agent qu'il cherche à imiter.

Après cette phase de bilan de campagne, les paysans et les groupes sont alors prêts pour une nouvelle campagne éventuelle. La simulation dure tant qu'il n'y a pas de blocage dans la limite de 15 campagnes. Ce choix d'une limite maximum de 15 campagnes a été fait pour tenir compte du choix de ne pas représenter dans le modèle les processus de dégradation des canaux.

6. Mise en œuvre du modèle

Le modèle ainsi décrit a été implanté en SmallTalk sur PC et porté ensuite sur station pour la réalisation de simulations. Le déroulement d'une simulation est visualisé sur l'interface présentée en figure 5.

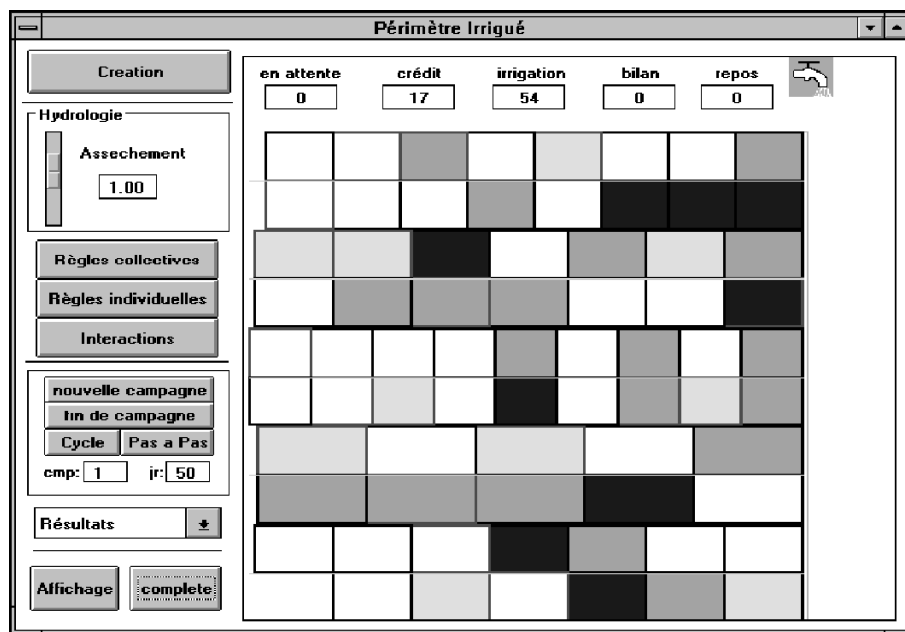


Figure 5. Interface du modèle SHADOC

Cette interface permet de suivre l'évolution des parcelles représentées au fur et à mesure de l'avancée de la simulation. Elle peut se faire selon différents points de vue

au choix de l'observateur : niveau d'eau, cagnotte du paysan attributaire de la parcelle, état cultural de la parcelle. En cours de simulation, il est également possible d'interrompre le fonctionnement de celle-ci et en cliquant sur une parcelle d'observer l'état de ses différents attributs et de ceux du paysan attributaire dont elle dépend. L'évolution de cette interface peut également être shuntée pour des séries de simulations à comparer ultérieurement, telles que celles présentées au paragraphe suivant. En fin de simulation, des courbes présentant l'évolution de la mise en culture, de l'échange de communication, de la population de règles ou des cagnottes des paysans sont également disponibles.

Dans la version initiale du modèle réalisée sur un PC portable 486 DX4 à 100 MHz avec 24 Mo de mémoire vive, une simulation avec l'interface dure environ une heure pour un scénario dont les paramètres permettent d'atteindre les 15 campagnes d'affilée. Il s'agit là de la configuration minimum nécessaire pour utiliser SHADOC. Pour des simulations sans l'interface sur des machines plus puissantes tel qu'un PC équipé d'un processeur à 350 MHz, le temps d'une simulation « longue » descend à moins de 10 minutes, ce qui est tout à fait satisfaisant pour l'usage que nous en faisons.

7. Usages du modèle

Pour chacune des règles en œuvre, plusieurs modalités sont proposées. L'usage du modèle consiste alors à choisir un scénario constitué de paramètres décrivant la structure de l'aménagement et les modalités de règles collectives et individuelles utilisées par chaque paysan et groupe, et à simuler l'évolution du système pour de telles conditions initiales. Les paramètres concernant la structure de l'aménagement sont le coefficient d'assèchement quotidien des parcelles en eau et le nombre de parcelles le long de chaque irrigateur peut varier. La plupart des paramètres concernent en fait les règles collectives et individuelles mises en œuvre, dans un ensemble de choix cependant fini. Quelques exemples de choix possibles sont présentés dans le tableau 2.

Un scénario est alors un ensemble de valeurs affecté à cet ensemble de paramètres.

Ainsi décrit, l'espace des scénarios possibles est très vaste. Les méthodes usuelles d'échantillonnage basées sur des plans factoriels se sont alors révélées inadaptées. C'est pourquoi nous avons commencé par constituer un ensemble de 100 scénarios dont tous les paramètres sont tirés au hasard parmi l'ensemble de leurs valeurs possibles. Etant donné la présence de plusieurs tirages aléatoires au cours du déroulement des processus représentés, chaque scénario a donné lieu dans un premier temps à une série de 20 simulations dont on a cherché à comparer les évolutions dans le temps.

La viabilité d'un système irrigué est vue dans la suite comme sa capacité à continuer à fonctionner avec un taux de parcelles mises en culture assez élevé sans intervention extérieure. C'est pourquoi nous avons observé les simulations du point

de vue de l'évolution des niveaux d'intensité culturale. La figure 6 donne un exemple d'une série de simulations d'un scénario donné.

paramètre du scénario	format	ensemble de valeurs
taille irrigateurs	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5)$	n_i entier, $n_i \in [6, 20]$
assèchement	X (en cm/jr)	$x \in \{0.8 ; 0.9 ; 1.0 ; 1.1 ; 1.2\}$
nombre groupe crédit	N_c	N_c entier, $N_c \in [1, 5]$
nombre réseau d'affinités	N_a	N_a entier, $N_a \in [1, 5]$
règles d'allocation de l'eau	$(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5)$	$r_i \in \{\text{\#séquentiel}, \text{\#libreService}\}$; une règle par groupement associé à une maille
règles d'accès au crédit	$(r_i)_{1 \leq i \leq N_c}$	$r_i \in \{\text{\#individuel}, \text{\#collectif}, \text{\#fondsDisponibles}, \text{\#selonBesoins}\}$; une règle par groupement d'accès au crédit.
règle de bilan des groupes	$(r_i)_{1 \leq i \leq (N_c + 5 + 1)}$	$r_i \in \{\text{\#idem}, \text{\#meilleur}, \text{\#proximité}, \text{\#retour}\}$; une règle par groupement
objectif individuel	(n_1, n_2, n_3, n_4)	n_i pourcentage de la population ayant l'objectif i parmi $\{\text{\#production}, \text{\#nourriture}, \text{\#foncier}, \text{\#fauteDeMieux}\}$
critère de satisfaction individuel	$(n_1, n_2, n_3, n_4, n_5)$	n_i pourcentage de la population ayant le critère i parmi $\{\text{\#production}, \text{\#dateDémarriage}, \text{\#dateRécolte}, \text{\#endettement}, \text{\#cagnotte}\}$

Tableau 2. Exemples de paramètres composant les scénarios de simulation

Cette figure montre une variabilité importante des simulations due à la représentation de processus par des facteurs aléatoires. Il est donc impossible de discuter de la viabilité d'un scénario particulier à partir d'une simulation. Cependant on observe également sur la figure 6 une répartition des simulations en deux groupes : 5 simulations durent « longtemps », alors que les 15 autres ne dépassent pas 5 campagnes avec des parcelles mises en culture. La même variabilité et la même répartition en deux groupes des simulations sont observées sur la plupart des scénarios de l'échantillon étudié. Une simulation particulière ne pouvant être un bon indicateur de la viabilité d'un scénario, nous nous sommes alors intéressés à la validité d'un indicateur basé sur un taux de simulations longues sur une série de simulations.

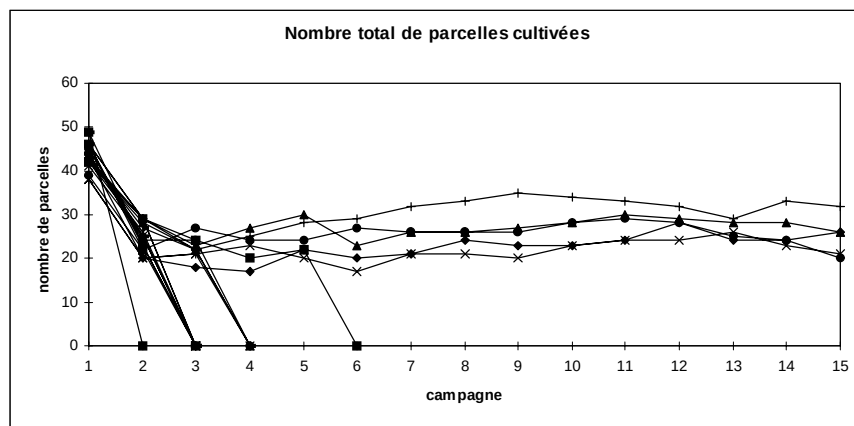


Figure 6. Evolution de l'intensité culturale pour 20 répétitions d'un scénario

Pour cela, nous avons dans un premier temps défini une simulation comme viable si elle atteint une intensité culturale supérieure ou égale à 25 % au moins une fois à la sixième campagne ou après. Ces deux paramètres ont été retenus afin de pouvoir déterminer quelles simulations pouvaient être considérées comme longues : nombre de campagnes enchaînées et nombre de parcelles mises en culture pour qu'une campagne puisse être prise en considération. La réalisation de 5 séries de 20 simulations pour chaque scénario a permis ensuite de classer les scénarios en trois catégories avec moins de 10 % d'erreur de classement par série :

- les scénarios non viables donnant lieu à 0 ou 1 simulation viable au sein d'une série de 20.
- les scénarios un peu viables donnant lieu à 2 à 9 simulations viables au sein d'une série de 20.
- les scénarios viables donnant lieu à au moins 10 simulations viables au sein d'une série de 20.

La possibilité de constituer une partition des scénarios en fonction de leur viabilité montre que le modèle construit est pertinent pour tenir un discours théorique sur cette viabilité. Ceci ne veut pas dire que ces discours sont valides, mais qu'ils sont cohérents. Ils doivent être confrontés aux connaissances du terrain ou peuvent orienter de nouvelles études sur le terrain. L'intérêt du modèle tiendra alors dans la richesse de l'usage et des conclusions qui peuvent être faits à partir de ces théories.

Un exemple d'usage consiste dans l'exploration de scénarios pour expliquer l'effet éventuel de certains paramètres sur la viabilité d'un scénario.

Les paramètres liés aux comportements individuels sont en fait des vecteurs de proportions de paysans se comportant selon une modalité donnée. Il s'agit de vecteurs de variables quantitatives. Une analyse discriminante selon le test de Manly

[MAN 91] avec le logiciel ADE4 [CHE 97] a été conduite pour chaque paramètre pour tester l'hypothèse que certaines régions de l'espace des modalités d'une règle donnée correspondent à une même classe de viabilité du scénario. Cette analyse montre alors qu'il n'y a ni bons ni mauvais paysans *a priori*. Les paramètres liés aux règles collectives sont qualitatifs et non ordonnés. Ils constituent des partitions de l'espace des scénarios. Des tests du χ^2 ont montré qu'il n'y a pas de corrélation entre chacune de ces partitions prises indépendamment et la classe de viabilité ainsi obtenue. Les règles collectives ne peuvent pas non plus, par elles-mêmes, expliquer la viabilité d'un scénario.

L'exploration de scénarios ne se limite pas à des scénarios tirés au hasard. L'effet d'une valeur d'un paramètre particulier peut aussi être étudié en comparant les simulations d'un scénario donné avec celles du même scénario dont seul le paramètre étudié aurait été modifié. Ainsi nous avons retenu cinq scénarios pour lesquels nous avons testé toutes les modalités possibles de la règle de changement de règles du groupe ayant en charge le pompage. Il est alors apparu que le blocage de la capacité d'apprentissage du groupe de raison pompage a toujours un effet amplificateur par rapport au scénario initial : le taux de simulations viables augmente ou diminue fortement. On peut alors supposer à partir de ces expériences que la stabilité du contexte dans lequel évoluent les paysans est favorable à la viabilité d'un système irrigué à condition que les conditions initiales ne soient pas « trop mauvaises ». Cette hypothèse formulée à partir des résultats des simulations renvoie à de nouvelles observations sur le terrain pour être discutée [BAR 98].

Enfin, comme nous avons vu qu'aucun paramètre, qu'il soit de comportement individuel ou de règle collective, ne peut expliquer indépendamment la viabilité d'un scénario, nous nous sommes intéressés à des ensembles de règles collectives ou de comportements individuels. Cette fois le modèle a été utilisé pour tester l'hypothèse que la viabilité d'un système irrigué viendrait d'un « bon » ensemble de règles collectives ou d'une « bonne » population de paysans. Pour cela nous avons échangé les paramètres relatifs aux règles collectives, respectivement aux comportements individuels, entre scénarios des classes *viable* ou *un peu viable*, et nous avons simulé les nouveaux scénarios ainsi obtenus, appelés scénarios croisés. Les résultats des simulations ont montré que pour tout ensemble de règles collectives, respectivement de comportements individuels, il existe un scénario croisé de la classe *non viable* comprenant cet ensemble et un ensemble de comportements individuels, respectivement de règles collectives, donnant lieu par ailleurs à un scénario viable [BAR 98]. Ainsi même si l'hypothèse testée est vraie, de tels bons ensembles sont rares et il serait risqué de vouloir imiter les règles en œuvre sur un système irrigué donné pour améliorer le fonctionnement d'un autre. Par contre, une hypothèse alternative cohérente avec ces simulations réside dans la nécessité d'une adéquation entre règles collectives et comportements individuels pour qu'un système soit viable. Dans ce cas, seules des règles collectives négociées avec tous les acteurs ont une chance de donner lieu à des systèmes irrigués viables : d'où la nécessité d'outils d'aide à la négociation.

8. La représentation du collectif

Ces résultats sur la nécessité d'une adéquation entre règles collectives et comportements individuels pour la viabilité d'un système irrigué renvoient à un débat important dans le domaine de la gestion des ressources, pouvant se résumer rapidement à la relation entre individu et société : la société est-elle le produit des actions de ses membres ou s'impose-t-elle à leurs comportements ? [OST 90 ; BOL 91] L'usage des SMA pour traiter de questions sur la gestion des ressources permet donc bien de s'impliquer dans des débats concernant celles-ci. Cette question de relation entre niveaux d'organisation individuel et collectif est également une question dans le domaine des systèmes multi-agents. Des approches « émergentistes » ou « bottom-up » sont confrontées à des approches « top down » dans lesquelles le niveau collectif s'impose à ses éléments [GLA 95 ; RAO 92]. L'analyse des apports de ce type d'expérience de modélisation-simulation pour les systèmes multi-agents est donc intéressante pour cette question [ROU 98].

Dans cette expérience sur les systèmes irrigués, le niveau d'organisation collectif, la classe Groupe, et le niveau d'organisation individuel, la classe Paysan, héritent tous deux d'une même classe Agent au niveau de laquelle sont situés les attributs et méthodes nécessaires pour l'envoi et la réception de message. Les interactions entre collectif et individuels dépassent ainsi les modes d'interaction habituels rencontrés aussi bien dans les approches « top down » que « bottom up » : un emboîtement en poupées russes des différents niveaux d'organisation dont les instances n'interagissent entre niveaux différents que via des relations de décomposition ou de recomposition. Ainsi la plate-forme GEAMAS, avec une approche à la fois « top down » et « bottom up », prévoit trois niveaux d'organisation d'agents, aux rôles distincts, dont les relations sont constituées de contrôles ou d'information sur la reconstitution des réseaux d'interaction [MAR 97].

Cette possibilité d'interaction entre instances de niveaux d'organisation différents permet de sortir du débat entre les deux approches proposées. Elle s'appuie sur les observations faites sur le terrain où le même paysan contredira sur sa parcelle les ordres qu'il donne en tant que responsable de groupement. Même si cela nous rapproche de la notion de rôle développée dans AALAADIN [FER 98] pour laquelle un agent donné aura différents types de comportements selon les organisations dans lesquelles il se situe, l'instanciation d'agents de niveau différents permet de représenter des négociations entre ces niveaux d'organisation observées sur le terrain. Cette représentation par deux agents différents permet également d'éviter d'avoir à résoudre au préalable les conflits potentiels dus à la multiplicité des rôles d'un agent donné.

Cette architecture utilisée pour représenter les relations entre individus et collectifs n'est pas spécifique à SHADOC. Cette expérience a servi de base à une forme de représentation du collectif dans une plate-forme de modélisation initialement tournée vers les questions de gestion des ressources en propriété commune, CORMAS [BOU 98]. Dans cette plate-forme, les entités collectives

héritent d'une même métaclasse que les entités individuelles qui les composent et peuvent communiquer avec elles. Sur cette question de relations entre individu et collectif, cette plateforme permet également, *via* un observateur de liens de visualiser dans un premier temps des formes collectives que l'on peut choisir d'instancier ensuite, ce qui permet d'avoir différents points de vue sur des modes de gestion en propriété commune et de simuler les conséquences du choix de l'un ou de l'autre [ROU 98].

9. Conclusion et perspectives

SHADOC constitue ainsi un simulateur permettant d'explorer différents scénarios d'évolution d'un système irrigué dont on maîtriserait différents paramètres tant sur les règles collectives que sur les comportements individuels. Un premier ensemble de simulations a permis de montrer que l'outil ainsi construit est pertinent pour tenir un discours sur la viabilité des systèmes irrigués dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal.

Il est actuellement en cours d'utilisation pour des scénarios relatifs aux modes de coordination entre paysans ainsi qu'entre acteurs de différents niveaux d'organisation : possibilités de communication, processus d'apprentissage. C'est un usage de recherche dont un des résultats concerne la probable nécessité d'une cohérence entre règles collectives et comportements individuels pour la viabilité d'un système irrigué.

Cette expérience de modélisation apporte également en retour au monde des systèmes multi-agents un point de vue nouveau dans le débat sur les relations entre individus et collectif, entre approche « top-down » et « bottom up », en permettant des interactions directes entre niveaux d'organisation différents, point de vue repris dans une plate-forme de modélisation pour la gestion des ressources en propriété commune.

D'autres usages sont envisagés pour ce type d'outil : en formation pour montrer la variabilité des conséquences de choix de règles collectives sur les évolutions d'un système irrigué en fonction des hypothèses de comportements individuels, en aide à la négociation enfin dans le cadre de processus de réhabilitation de systèmes irrigués existant. Les travaux sur ces nouveaux usages permettent d'avancer sur la question de la validation de modèles basés sur des systèmes multi-agents [BAR 99].

10. Bibliographie

- [BAK 97] BAKAM I., TAKFORYAN A., PROTON H., BOUSQUET F., WEBER J., « Simulations spatio-temporelles d'interactions entre chasseurs et ressources par les systèmes multi-agents : illustration par le cas de la chasse dans l'Est-Cameroun », communication au 23^{ème} congrès de l'Union internationale des biologistes du gibier, Lyon, septembre 1997, 8 p.

- [BAR 97] BARRETEAU O., BOUSQUET F., WEBER J., « Modes de gestion et viabilité de périmètres irrigués : questions de représentation », in: *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, coord. F. Blasco, 1997, Elsevier, p. 153-159.
- [BAR 98] BARRETEAU O., « Un système multi-agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d'organisation », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et de Forêts.
- [BAR 99] BARRETEAU O., BOUSQUET F., « Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents », 7^{èmes} *Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, S^t Gilles, 8-10 novembre 1999, coord. M.-P. Gleizes et P. Marcenac, 1999, Hermès, p. 67-80.
- [BOL 91] BOLTANSKI L., THÉVENOT L., *De la justification, les économies de la grandeur*, Gallimard, 1991.
- [BON 88] BOND A.H., GASSER L., *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan et Kaufman, 1988.
- [BOU 94] BOUSQUET F., « Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas de la pêche au Niger », Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard Lyon I, 1994.
- [BOU 97] BOUSQUET F., BARRETEAU O., MULLON C., WEBER J., « Modélisation d'accompagnement : systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables », *Actes du Colloque international Quel environnement au 21^{ème} siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie*, GERMES, Paris, 1997, sous presse.
- [BOU 98] BOUSQUET F., BAKAM I., PROTON H., LE PAGE C., « Cormas : common-pool resources and multi-agent systems », 11th *IAEE conference, Barcelone, 1-4 juin 1998, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 1416, p. 826-838, Springer.
- [CHE 97] CHESSEL D., THIOULOUSE J., DOLÉDEC S., OLIVIER J.-M., *ADE-4, variables instrumentales*, <http://biomserv.univ-lyon1.fr/ADE-4.html>, Université Lyon 1, 1997.
- [DIE 90] DIEMER G., SPEELMAN J.J., « Conception dans la perspective du paysan, réflexions sur le développement hydro-agricole dans la vallée du Sénégal », in: *Conception viable d'aménagements hydro-agricoles paysans en Afrique sub-saharienne*, Wageningen, Netherlands, 1990.
- [FER 95] FERBER J., *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, InterEditions, 1995.
- [FER 98] FERBER J., GUTKNECHT O., « A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems », *Proceedings Third International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'98)*, Paris, 3-7 juillet 1998, IEEE Computer Society press, p. 128-135.
- [GLA 95] GLANCE N.S., HUBERMAN B.A., « Organizational fluidity and sustainable cooperation », in: *From reaction to cognition*, éd. C. Castelfranchi et J.P. Muller, p. 89-103, Springer, 1995.
- [GLE 94] GLEIZES M.-P., GLIZE P., TROUILHET S. « Etude des lois de la conversation entre agents autonomes », *Revue internationale de systémique*, vol. 8, n° 1, 1994, p. 39-50.

- [LEG 95] LE GAL P.-Y., « Gestion collective des systèmes de culture en situation d'incertitude : cas de l'organisation du travail en double culture dans le Delta du fleuve Sénégal », Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon, 1995.
- [LER 95] LERICOLLAIS A., SARR A., « Histoires de périmètres », in: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, eds. P. Boivin et al., 1995, p. 5-36, ORSTOM éditions, Paris.
- [MAN 91] MANLY B.F.J., *Randomization and Monte Carlo methods in biology*, Chapman and Hall, London, 1991.
- [MAR 97] MARCENAC P., « Modélisation des systèmes complexes par agents », *Technique et Science Informatiques*, vol.16, n° 8, 1997, p. 1013-1037.
- [MUL 96] MÜLLER J.-P., *The design of intelligent agents, a layered approach*, Springer, 1996.
- [MUL 97] MULLER P.-A., *Modélisation objet avec UML*, Eyrolles, 1997.
- [OST 90] OSTROM E., *Governing the commons : the evolution of institutions for collective action*, Cambridge University Press, 1990.
- [OST 92] OSTROM E., *Crafting institutions for self governing irrigation systems*, ICS press, 1992.
- [OST 93] OSTROM E., BENJAMIN P., « Design principles and the performance of Farmer Managed Irrigation Systems in Nepal », in: *Performance measurement in Farmer Managed Irrigation Systems*, eds. S. Manor and J. Chambouleyron, 1993, p. 53-62, IIMI.
- [RAO 92] RAO A.S., GEORGEFF M.P., SONNENBERG E.A., « Social plans: a preliminary report », in: *Decentralized AI 3*, eds. E. Werner et Y. Demazeau, 1992, Elsevier.
- [REY 96] REY J., « Apports de la gestion industrielle au management des périmètres irrigués : comment mieux piloter la production ? », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1996.
- [ROU 98] ROUCHIER J., BARRETEAU O., BOUSQUET F., PROTON H., « Evolution and co-evolution of individuals and groups in environment », *Proceedings Third International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'98)*, Paris, 3-7 juillet 1998, IEEE Computer Society press, p. 254-260.
- [SEC 90] SECK S.M., « Gestion et organisation des aménagements irrigués en exploitation paysanne dans la vallée du Sénégal », *Revue de géographie de Lyon*, vol. 65, p. 38-45, 1990.
- [SEN 91] SENGUPTA N., *Managing common property, Irrigation in India and the Philippines*, Sage publication, New Delhi, India, 1991.
- [WOO 98] WOOLDRIDGE M., « Verifiable semantics for agent communication languages », *Proceedings Third International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'98)*, Paris, 3-7 juillet 1998, IEEE Computer Society press, p. 349-356.

Article reçu le 4 février 1999

Version révisée le 30 septembre 1999

Rédacteur responsable : Bernard PHILIPPE

Olivier Barreteau est ingénieur du Génie Rural, des Eaux et des Forêts et docteur en sciences de l'eau. Il est actuellement ingénieur de recherche dans l'UR irrigation au Cemagref après une thèse réalisée au Cirad. Ses travaux portent sur les outils et méthodes pour l'aide à la négociation sur la gestion de l'eau.

François Bousquet est ingénieur en sciences de l'eau et docteur en modélisation. Il est actuellement chercheur au Cirad. Ses activités de recherche portent sur la modélisation et la gestion des ressources renouvelables.